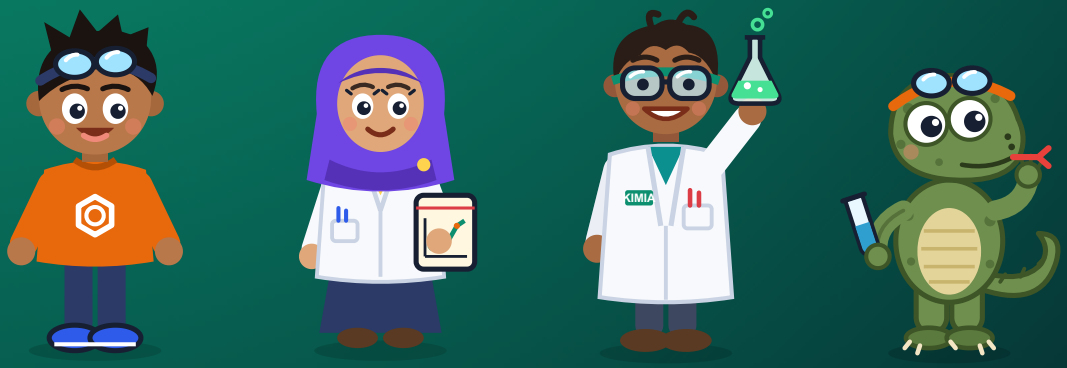
Chemipedia

BUKU LENGKAP · VERSI CETAK

Chemipedia

Kimia Itu Asyik!

Buku kimia interaktif untuk anak Indonesia: SD, SMP, SMA, IGCSE, IB, sampai olimpiade.



dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD

Editor: Abdullah Hanif Hidayat

Didukung oleh Aurumgen Academy

Edisi 1 · 2026 · Versi interaktif: aurumgen.my.id/chemipedia

Tentang buku ini

Buku ini adalah versi cetak dari Chemipedia. Bagian yang di layar dapat digeser dan dimainkan (Rumus Hidup, Grafik Hidup, Lab Mini, animasi langkah) ditampilkan sebagai gambar, sedangkan latihan lengkap ada di PDF Bank Soal dan LKPD.

Chemipedia · Kimia Itu Asyik! Edisi 1 (2026).

Penulis: **dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD**
Editor: **Abdullah Hanif Hidayat**
Didukung oleh Aurumgen Academy.

© 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD. Hak cipta dilindungi undang-undang. Dokumen ini boleh dicetak dan diperbanyak untuk keperluan pembelajaran nonkomersial dengan tetap mencantumkan sumber.

Semua soal dan LKPD adalah karya asli. Label "gaya IGCSE", "gaya IB", dan "gaya olimpiade" menunjukkan tingkat dan format, bukan salinan soal resmi. Disusun selaras dengan Capaian Pembelajaran 2025 (Keputusan Kepala BSKAP No. 046/H/KR/2025) dan pendekatan Pembelajaran Mendalam.

Versi interaktif dengan komik bergerak, Rumus Hidup, Grafik Hidup, Lab Mini, Adu Cepat, dan latihan berskor: aurumgen.my.id/chemipedia

Daftar isi

Cara belajar dengan Chemipedia 6

BAGIAN A · DUNIA KIMIA

1 Kimia Ada di Mana-mana 11

2 Materi, Wujud & Perubahannya 39

3 Campuran & Teknik Pemisahan 71

4 Pengukuran dalam Kimia 102

BAGIAN B · ATOM & TABEL PERIODIK

5 Perjalanan Model Atom 133

6 Partikel Atom, Isotop & Massa Atom 167

7 Konfigurasi Elektron & Bilangan Kuantum 195

8 Tabel Periodik & Sifat Keperiodikan 222

9 Kimia Unsur di Nusantara 257

BAGIAN C · IKATAN & WUJUD ZAT

10 Ikatan Ion 295

11 Ikatan Kovalen & Struktur Lewis 323

12 Bentuk Molekul: VSEPR & Hibridisasi 354

13 Gaya Antarmolekul & Ikatan Logam 385

14 Wujud Gas & Hukum-Hukum Gas 419

BAGIAN D · STOIKIOMETRI

15 Bahasa Kimia: Rumus & Tata Nama 452

16 Persamaan Reaksi & Hukum Dasar Kimia 484

17 Konsep Mol 515

18 Stoikiometri Reaksi 536

BAGIAN E · ENERGI, LAJU & KESETIMBANGAN

19 Termokimia 564

20 Entropi & Energi Bebas Gibbs 597

21 Laju Reaksi 626

22 Kesetimbangan Kimia 658

BAGIAN F · LARUTAN & ASAM-BASA

23 Larutan & Konsentrasi 687

24 Sifat Koligatif Larutan 716

25 Sistem Koloid 748

26 Asam & Basa 776

27 Titrasi, Penyangga & Hidrolisis 810

28 Kelarutan & Hasil Kali Kelarutan 841

BAGIAN G · REDOKS & ELEKTROKIMIA

29 Reaksi Redoks 873

30 Sel Volta & Baterai 905

31 Elektrolisis & Korosi 936

BAGIAN H · KIMIA KARBON & KEHIDUPAN

32 Hidrokarbon & Minyak Bumi 969

33 Gugus Fungsi 1002

34 Reaksi & Mekanisme Organik 1036

35 Polimer & Material 1069

36 Biokimia: Molekul Kehidupan 1104

BAGIAN I · INTI, LINGKUNGAN & ANALISIS

37 Kimia Inti & Radioaktivitas 1138

38 Kimia Lingkungan & Kimia Hijau 1172

39 Detektif Molekul: Analisis & Spektroskopi 1205

LAMPIRAN

Peta Rumus: semua Rumus Hidup 1244

Penutup, glosarium & panduan guru 1262

Cara Belajar dengan Chemipedia

Kenalan dulu, yuk!



Bima

Anak SMP dari Malang yang selalu ingin mencoba. Kacamata pelindung tidak pernah lepas dari dahinya. Tebakannya cepat, kadang meleset, tetapi ia tidak pernah kapok bertanya "kenapa?".



Laras

Sahabat Bima dari Makassar. Teliti, rapi, dan selalu mencatat data di buku lab-nya. Kalimat andalannya: "Datanya mana? Kita ukur dulu."



Kak Tirta

Kakak mentor yang bekerja di laboratorium. Humoris, gemar analogi dari dapur dan pasar, dan sangat cerewet soal keselamatan kerja: "Kacamata dulu, baru bereksperimen!"



Kimo si Komodo

Maskot cerdik dari Pulau Komodo. Ia suka fakta unik, jembatan keledai, dan trik cepat yang tetap bisa dijelaskan. Lidahnya bercabang, tetapi penjelasannya selalu lurus.



Klub Unsur

Atom-atom yang punya kepribadian: **Natrium** yang royal memberi elektron, **Klorin** yang rakus menerima, **Oksigen** yang populer, **Karbon** bertangan empat yang suka bergandengan, **Hidrogen** si mungil, dan **Neon** si bangsawan yang cuek.

Lima janji Chemipedia

Lihat partikelnya dulu

Setiap konsep dimulai dari "apa yang dilakukan atom dan molekul". Rumus datang belakangan, sebagai cara menghitung cerita itu.

Boleh diutak-atik

Putar molekul, setarakan reaksi, tuang larutan, panaskan gas. Kimia paling mudah dipahami saat kamu "bereksperimen" sendiri.

Dekat dengan hidupmu

Tempe, kunyit, cabai, garam Madura, belerang Ijen, nikel Sulawesi, air PDAM. Kimia Nusantara ada di sekitarmu.

Aman dan bertanggung jawab

Setiap percobaan rumah memakai bahan dapur yang aman, lengkap dengan piktogram bahaya dan aturan keselamatan.

Tangga sampai puncak

Dari soal Pemula untuk SD sampai soal gaya IGCSE, IB, dan Olimpiade Kimia, semuanya dengan pembahasan.

Cara belajar di Chemipedia

Setiap bab mengikuti alur yang sama. Kamu akan **memahami**, **mengaplikasikan**, lalu **merefleksikan**, sesuai semangat Pembelajaran Mendalam yang berkesadaran, bermakna, dan menggembirakan.

1. Komik pembuka
Peristiwa nyata dari dapur, pasar, atau alam.

2. Tebak Dulu!
Pilih prediksimu sebelum belajar. Salah tebak itu bagus!

3. Dunia partikel
Konsep dibuat tampak lewat animasi atom dan molekul.

4. Molekul 3D
Putar, ukur sudut, lihat pasangan elektron bebas.

5. Rumus Hidup
Geser nilainya, lihat hasilnya, kumpulkan kartunya.

6. Lab Mini
Laboratorium virtual yang aman dan bisa diulang.

7. Contoh bertingkat
Contoh → kerjakan bersama → coba sendiri.

8. Awas Jebakan!
Miskonsepsi yang paling sering terjadi.

9. Kimia di Sekitarmu
Dari jamu sampai baterai kendaraan listrik.

10. Tangga Latihan
Soal dari Pemula sampai Olimpiade.

TIGA MODE BACAAN

Di kanan atas ada tombol **Dasar · SMA · Lanjut**. Mode **Dasar** memakai bahasa paling sederhana untuk SD–SMP. Mode **SMA** adalah standar kelas X–XII. Mode **Lanjut** membuka kotak berisi pendalaman IGCSE, IB, dan olimpiade. Tombol mengubah buku menjadi **Lab Malam**.

MENULIS JAWABAN

Di kotak isian angka kamu boleh menulis **desimal** (0,75), **pecahan** (3/4), **notasi ilmiah** (6,02e23 atau 6,02×10^23), atau **pangkat**. Di kotak isian rumus, tulis angka indeks biasa: `H2SO4`, `Ca(OH)2`, `CuSO4.5H2O`, `Fe^3+`.

⚠️ **KESELAMATAN DULU**

Semua "Tantangan Rumah" memakai bahan dapur yang aman. Tetap lakukan bersama orang dewasa, jangan pernah mencicipi atau mencampur bahan kimia rumah tangga (misalnya pemutih dengan pembersih lantai), dan pakai kacamata atau pelindung bila ada.

Pilih jalur belajarmu

🌱 SD – SMP

Bacaan **Dasar**. Mulai dari Bab 1–5, 8, 10, 16, 17, 23, 26, dan 36.

Lv 1 Lv 2

⚔️ SMA · TKA · UTBK

Bacaan **SMA**. Ikuti urutan bab. Fokus pada Molekul 3D, Penyetara Reaksi, Rumus Hidup, dan contoh bertingkat.

Lv 2 Lv 3

🌍 IGCSE · IB

Bacaan **Lanjut**. Perhatikan kotak 🚀, soal berstruktur, analisis data, dan spektroskopi (Bab 39).

Lv 4 Lv 5

🏆 Olimpiade (OSN Kimia)

Bacaan **Lanjut**. Kuasai Bab 12, 18, 22, 27, 30, 34, dan 39, lalu taklukkan Tantangan Olimpiade di Bank Soal.

Lv 5 Lv 6

Tangga 6 level soal

Level	Untuk siapa	Ciri soal
Lv 1 · Pemula	SD – awal SMP	Mengenali konsep, contoh sehari-hari, gambar partikel.
Lv 2 · Penjelajah	SMP (Fase D)	Satu atau dua langkah, membaca tabel, grafik, dan rumus kimia sederhana.
Lv 3 · Pejuang	SMA · TKA · UTBK	Beberapa langkah, konteks nyata, perhitungan kimia, penalaran.
Lv 4 · IGCSE	Gaya Cambridge IGCSE Chemistry	Soal berstruktur dengan kata perintah (*hitung, jelaskan, sarankan*), data percobaan, uji ion.
Lv 5 · IB DP	Gaya IB Chemistry DP	Analisis data, ketidakpastian, mekanisme, energetika, soal berbagian.

Lv 6 · Olimpiade	Gaya OSN Kimia · IChO	Tidak rutin, multitahap, menebak struktur, kesetimbangan & kinetika lanjut.

Peta isi buku

Bagian A · Dunia Kimia

1 Kimia Ada di Mana-mana
2 Materi, Wujud & Perubahannya
3 Campuran & Teknik Pemisahan
4 Pengukuran dalam Kimia

Bagian B · Atom & Tabel Periodik

5 Perjalanan Model Atom
6 Partikel Atom, Isotop & Massa Atom
7 Konfigurasi Elektron & Bilangan Kuantum
8 Tabel Periodik & Sifat Keperiodikan
9 Kimia Unsur di Nusantara

Bagian C · Ikatan & Wujud Zat

10 Ikatan Ion
11 Ikatan Kovalen & Struktur Lewis
12 Bentuk Molekul: VSEPR & Hibridisasi
13 Gaya Antarmolekul & Ikatan Logam
14 Wujud Gas & Hukum-Hukum Gas

Bagian D · Stoikiometri

15 Bahasa Kimia: Rumus & Tata Nama
16 Persamaan Reaksi & Hukum Dasar Kimia
17 Konsep Mol
18 Stoikiometri Reaksi

Bagian E · Energi, Laju & Kesetimbangan

19 Termokimia
20 Entropi & Energi Bebas Gibbs
21 Laju Reaksi
22 Kesetimbangan Kimia

Bagian F · Larutan & Asam-Basa

23 Larutan & Konsentrasi
24 Sifat Koligatif Larutan
25 Sistem Koloid
26 Asam & Basa
27 Titrasi, Penyangga & Hidrolisis
28 Kelarutan & Hasil Kali Kelarutan

Bagian G · Redoks & Elektrokimia

29 Reaksi Redoks
30 Sel Volta & Baterai
31 Elektrolisis & Korosi

Bagian H · Kimia Karbon & Kehidupan

32 Hidrokarbon & Minyak Bumi
33 Gugus Fungsi
34 Reaksi & Mekanisme Organik
35 Polimer & Material
36 Biokimia: Molekul Kehidupan

Bagian I · Inti, Lingkungan & Analisis

37 Kimia Inti & Radioaktivitas

38 Kimia Lingkungan & Kimia Hijau

39 Detektif Molekul: Analisis & Spektroskopi

Selaras dengan kurikulum

Kurikulum	Bab yang paling relevan
IPA SMP (Fase D)	1–5 · 8 (pengantar) · 10–11 (pengantar) · 16 · 17 (pengantar) · 23 · 26 · 36 (bacaan Dasar)
Kimia kelas X (Fase E)	1 · 4 · 5–8 · 15–18 · 38 (kimia hijau)
Kimia XI–XII (Fase F)	7 · 9–14 · 19–37 · 39
Cambridge IGCSE Chemistry 0620	2–4 · 5–6 · 8–11 · 13–19 · 21–23 · 26 · 29–33 · 35 · 38–39
IB Chemistry DP	Structure 1: 2, 5–7, 14, 17 · Structure 2: 10–13, 35 · Structure 3: 8, 32–33, 39 · Reactivity 1: 19–20 · Reactivity 2: 18, 21–22 · Reactivity 3: 26–31, 34
OSN Kimia / IChO	Semua bab. Inti: stoikiometri (17–18), struktur (7, 11–12), termodinamika & kinetika (19–22), larutan (26–28), elektrokimia (29–31), organik (32–34), spektroskopi (39).

Rujukan: Capaian Pembelajaran 2025 (Keputusan Kepala BSKAP No. 046/H/KR/2025). Label "gaya IGCSE/IB/olimpiade" menunjukkan tingkat dan format soal, bukan soal resmi.

BAB 1 · DUNIA KIMIA

01 Kimia Ada di Mana-mana: Dapurmu Adalah Laboratorium

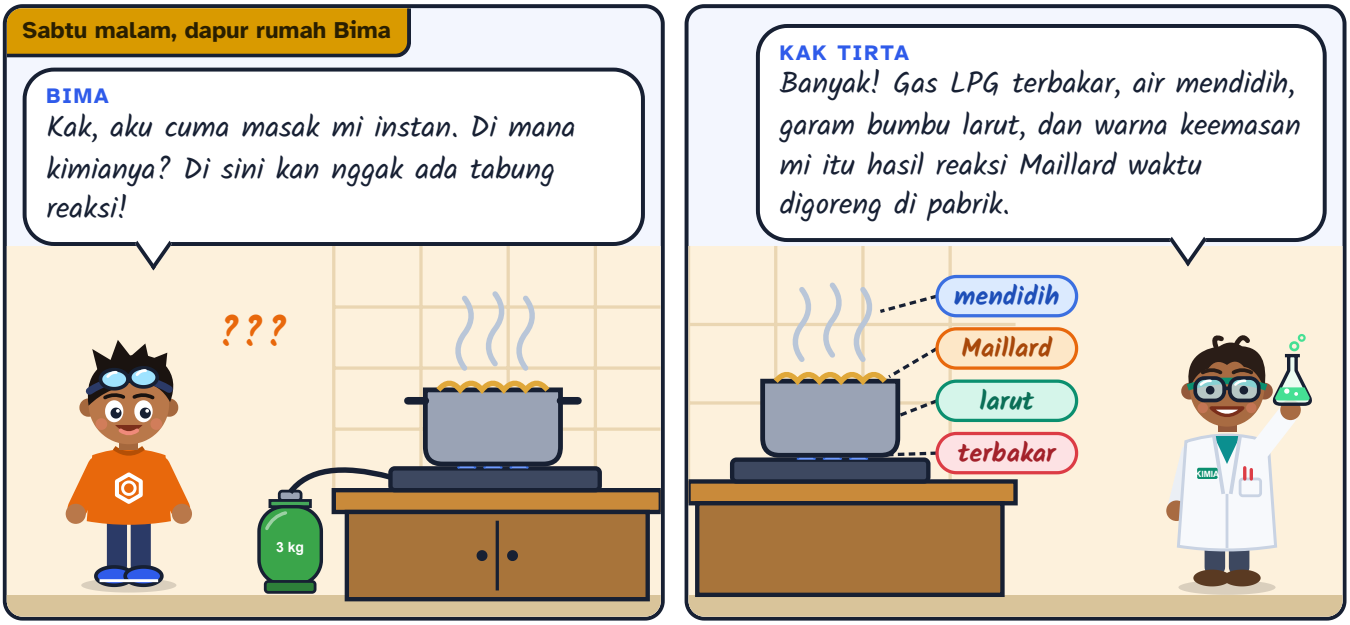
Sebelum sarapan pagi ini, kamu sudah menyalakan puluhan reaksi kimia: di kompor, di wajan, bahkan di dalam perutmu. Bab ini mengajakmu memakai "kacamata kimia" untuk melihat dunia, dari semangkuk mi sampai sehelai batik, dari jamu sampai baterai mobil listrik.

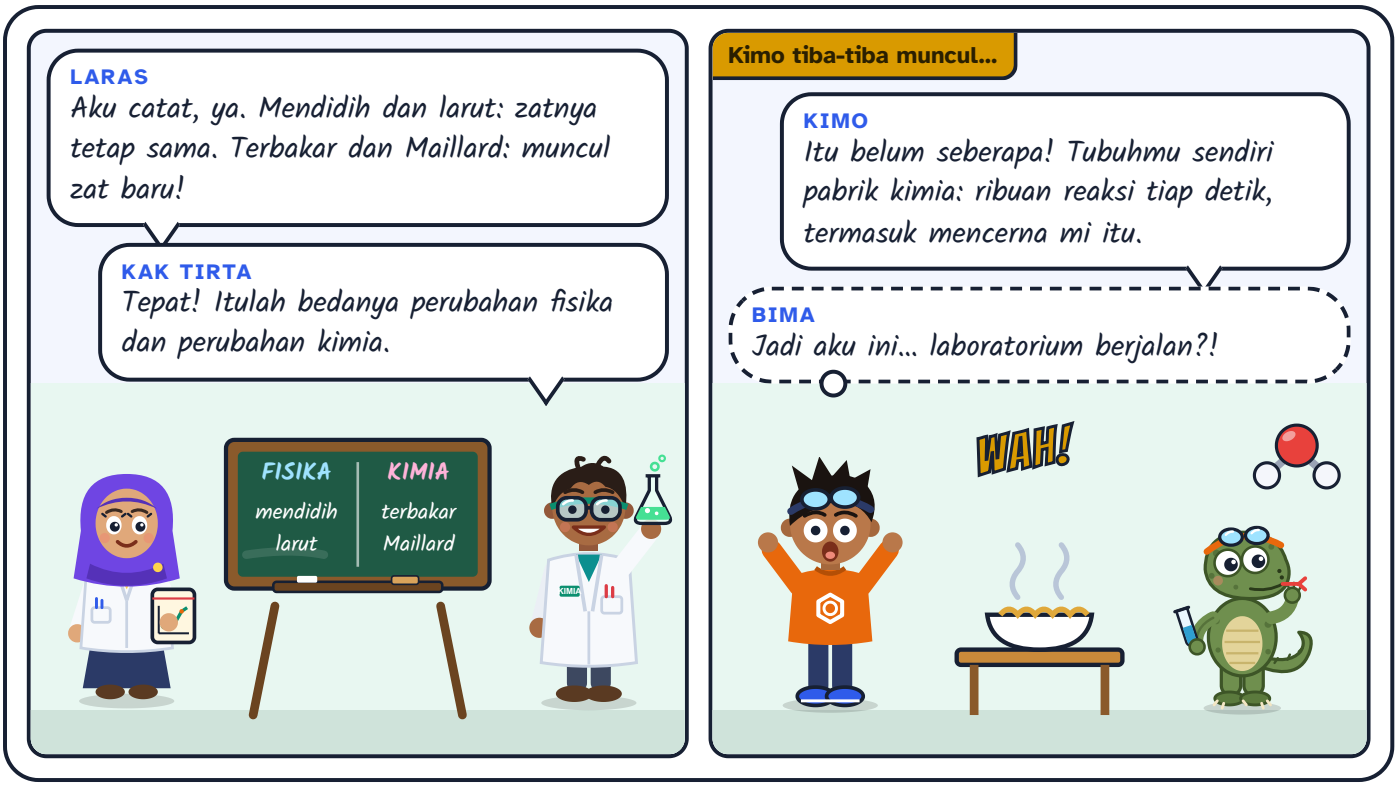
Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **kimia** sebagai ilmu tentang materi dan perubahannya, lalu menemukan contohnya di dapur dan tubuhmu;
- membedakan **perubahan fisika** dan **perubahan kimia** pada tingkat makroskopik, partikel, dan simbol;
- menyebutkan **cabang-cabang kimia** dan profesi yang memakainya di Indonesia;
- merancang **percobaan yang adil** dengan metode ilmiah: hipotesis, variabel bebas, terikat, dan kontrol;
- mengenal **alat laboratorium**, aturan keselamatan, dan **sembilan piktogram bahaya GHS**, serta menghitung massa jenis dan persentase massa.

DI MANA KIMIANYA?

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Bima melihat tulisan "BEBAS BAHAN KIMIA" pada sebotol air minum kemasan. Bagaimana pendapatmu?

- Benar. Air minum memang tidak mengandung bahan kimia.
- Benar, karena airnya diambil dari mata air pegunungan yang alami.
- Keliru. Air itu sendiri adalah zat kimia, ditambah mineral yang terlarut di dalamnya.
- Keliru, tetapi hanya karena botol plastiknya terbuat dari bahan kimia.

Jawabannya: keliru! Segala sesuatu yang punya massa dan menempati ruang tersusun atas zat kimia. Air adalah $\mathrm{H_2O}$, dan "mineral" di dalamnya adalah ion seperti $\mathrm{Ca^{2+}}$, $\mathrm{Mg^{2+}}$, dan $\mathrm{HCO_3^-}$. Tulisan "bebas bahan kimia" hanyalah gaya iklan. Pertanyaan yang lebih cerdas adalah: **zat apa**, dan **berapa banyak**?

1.1 Kimia: ilmu tentang materi dan perubahannya

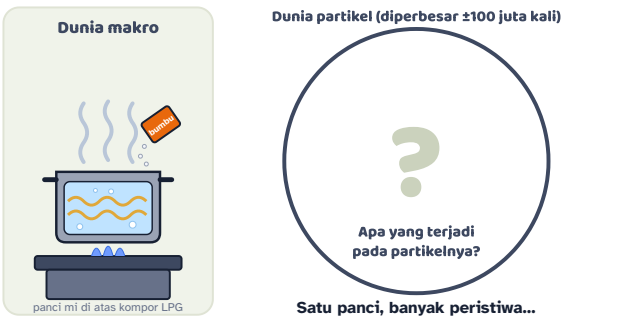
Coba lihat sekelilingmu: meja, udara, air di gelas, bahkan kulitmu sendiri. Semuanya adalah **materi**. Kimia bertanya tiga hal tentang materi: **terbuat dari apa**, **bagaimana sifatnya**, dan **bagaimana ia bisa berubah** menjadi zat lain.

Bahasa sederhana · Bayangkan kimia sebagai ilmu memasak alam semesta. Bahan-bahannya adalah atom, resepnya adalah reaksi, dan dapurnya ada di mana-mana: di kompor, di dalam tanah, di daun, dan di perutmu. Waktu kamu menggoreng tempe, menyalakan kompor, atau melihat besi berkarat, kamu sedang menyaksikan kimia bekerja.

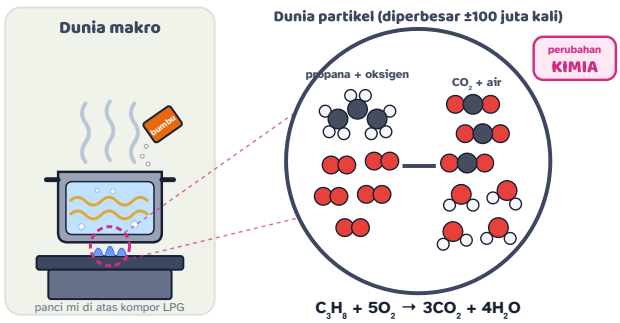
DEFINISI · KIMIA DAN MATERI

Kimia adalah ilmu yang mempelajari materi: susunannya (terbuat dari apa), strukturnya (bagaimana partikelnya tersusun), sifat-sifatnya, perubahan yang dialaminya, dan energi yang menyertai perubahan itu. **Materi** adalah segala sesuatu yang memiliki massa dan menempati ruang.

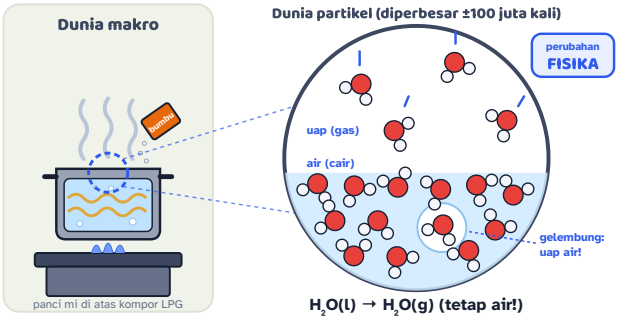
Semua materi tersusun atas partikel yang sangat kecil: atom, molekul, dan ion. Air tersusun atas atom H dan O; garam dapur tersusun atas ion Na dan Cl; gas LPG tersusun atas atom C dan H. Ketuk lambangnya untuk berkenalan. Mari kita pakai "kacamata kimia" untuk melihat apa yang sebenarnya terjadi di panci mi Bima.



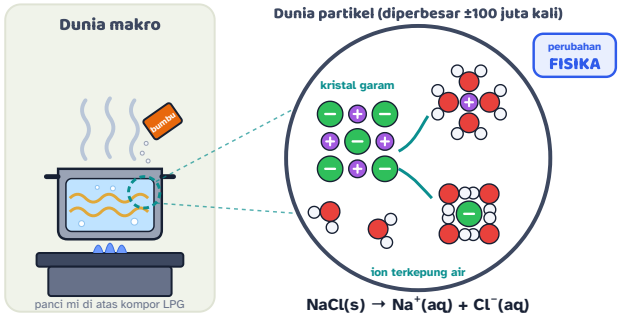
Langkah 1. Ini dunia **makroskopik**: yang bisa kamu lihat, cium, dan rasakan. Api biru, air bergolak, uap mengepul, bumbu ditaburkan. Ketuk **Lanjut** untuk memperbesar kira-kira 100 juta kali!



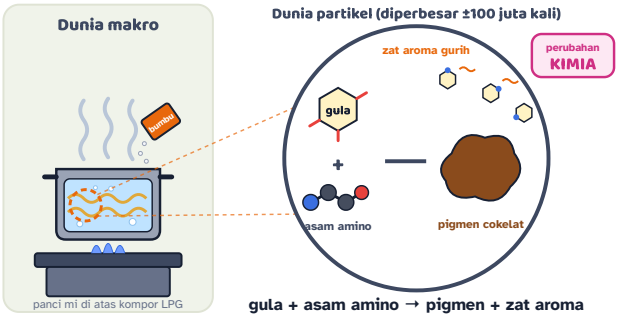
Langkah 2. Api: molekul propana dari LPG bertumbukan dengan oksigen. Ikatannya putus, lalu atom-atomnya bergabung ulang menjadi karbon dioksida dan air. Muncul zat baru, jadi ini **perubahan kimia** (reaksi kimia): $C_3H_8 + 5\,O_2 \quad 3\,CO_2 + 4\,H_2O$. Hitung atomnya: kiri dan kanan sama banyak!



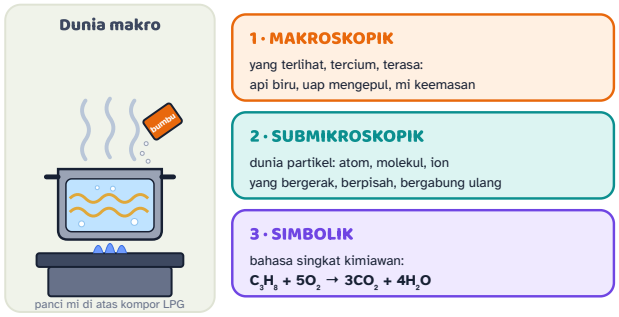
Langkah 3. Mendidih: molekul air bergerak makin cepat sampai lepas dari tetangganya menjadi gas. Gelembung di air mendidih berisi **uap air**, bukan udara. Molekulnya tetap H_2O, jadi ini **perubahan fisika**.



Langkah 4. Larut: molekul air menarik ion Na^+ dan Cl^- keluar dari kristal garam lalu mengepungnya. Perhatikan: sisi oksigen menghadap Na^+, sisi hidrogen menghadap Cl^-. Ionnya tidak berubah; bila airnya diuapkan, garam kembali. Ini juga **perubahan fisika**.



Langkah 5. Keemasan: saat mi digoreng di pabrik (±150 °C), gula dan asam amino di permukaan adonan bereaksi (**reaksi Maillard**). Terbentuk pigmen cokelat-keemasan dan ratusan zat aroma baru. Reaksi yang sama membuat tempe goreng, roti panggang, dan kopi sangrai harum. Ini **perubahan kimia**.



Langkah 6. Tiga cara melihat satu peristiwa: **makroskopik** (yang terlihat), **submikroskopik** (partikel), dan **simbolik** (rumus). Kimiawan yang hebat lincah berpindah di antara ketiganya, dan buku ini akan melatihmu!

ATURAN · PERUBAHAN FISIKA ATAU PERUBAHAN KIMIA?

Tanyakan satu hal: **apakah terbentuk zat baru?**

- **Perubahan fisika**: wujud, bentuk, atau ukuran berubah, tetapi zatnya tetap sama. Contoh: es mencair, air mendidih, gula larut, kayu dipotong.
- **Perubahan kimia** (reaksi kimia): atom-atom bergabung ulang membentuk zat baru dengan sifat baru. Contoh: gas terbakar, besi berkarat, nasi basi, tempe digoreng menjadi cokelat.

Tanda-tanda reaksi kimia: timbul gas, terbentuk endapan, warna berubah, suhu berubah, muncul cahaya, atau bau baru.

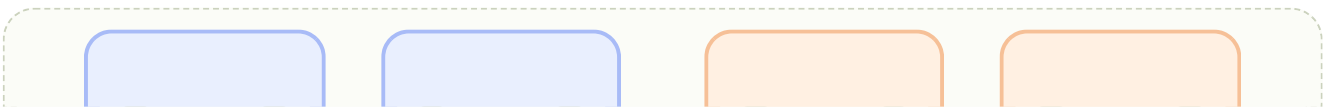
AWAS JEBAKAN

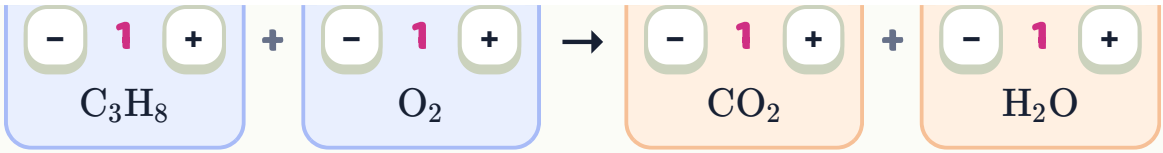
Tanda-tanda reaksi hanyalah petunjuk, bukan bukti. Air mendidih juga bergelembung dan es mencair juga menyerap panas, padahal keduanya hanya perubahan fisika. Selalu kembali ke pertanyaan inti: apakah partikelnya berubah menjadi zat lain?

Peristiwa di sepiring mi	Apa yang terjadi pada partikelnya?	Jenis perubahan
LPG menyala di kompor	propana dan butana bereaksi dengan oksigen menjadi $\mathrm{CO_2}$ dan $\mathrm{H_2O}$	**kimia**
Air mendidih	molekul $\mathrm{H_2O}$ lepas dari cairan menjadi gas	fisika
Garam dan bumbu larut	ion dan molekul bumbu menyebar di antara molekul air	fisika
Minyak bumbu mencair di kuah panas	molekul lemak bergerak lebih bebas	fisika
Mi berwarna keemasan (digoreng di pabrik)	gula + asam amino menjadi pigmen dan zat aroma (Maillard)	**kimia**
Kamu mengunyah mi	enzim amilase di ludah memotong pati menjadi gula sederhana	**kimia**

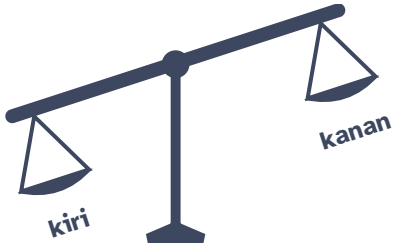
Persamaan reaksi pada langkah 2 tadi adalah bahasa simbolik kimia. Jumlah setiap jenis atom di kiri dan kanan panah harus sama, karena atom tidak bisa muncul atau lenyap begitu saja. Kamu akan belajar menuliskannya di Bab 16, tetapi tidak ada salahnya mengintip sekarang:

PENYETARA REAKSI **Intip Bab 16: setarakan reaksi di dapur dan tubuhmu**





Unsur	Kiri	Kanan	
C	3 ●●●	1 ●	✕
H	8 ○○○○○○○○	2 ○○	✕
O	2 ●●	3 ●●●	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 4 null

Tekan – dan + untuk mengubah koefisien sampai timbangan datar. Reaksi pertama adalah LPG (propana) terbakar, kedua butana dari LPG, ketiga pernapasan sel di tubuhmu, dan keempat peragian tapai (glukosa menjadi alkohol dan gas karbon dioksida). Buntu? Pakai tombol .

MITOS

"Bahan kimia itu pasti berbahaya dan buatan pabrik."

FAKTA

Semua materi adalah bahan kimia: air, oksigen, vitamin C di jeruk, kurkumin di kunyit. Bahaya ditentukan oleh **jenis zat dan dosisnya**, bukan oleh asalnya.

MITOS

"Yang alami pasti aman."

FAKTA

Singkong pahit mengandung zat yang dapat melepaskan sianida, dan banyak jamur liar beracun. Keduanya 100% alami! Itulah sebabnya singkong pahit harus direndam dan dimasak dengan benar.

MITOS

"Kimia itu hanya hafalan rumus."

FAKTA

Kimia adalah cara berpikir: mengamati, menduga, lalu menguji. Rumus hanyalah bahasa singkat untuk menceritakan apa yang dilakukan partikel. Pahami ceritanya, rumusnya ikut teringat.

MITOS

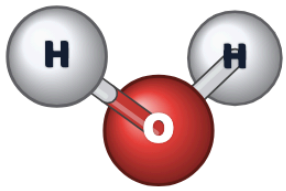
"Produk berlabel 'tanpa bahan kimia' lebih sehat."

FAKTA

Produk tanpa bahan kimia itu mustahil, karena produknya sendiri tersusun atas zat kimia. Baca daftar komposisinya: zat apa dan berapa banyak.

MOLEKUL 3D

Semuanya zat kimia, semuanya alami



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Air H_2O Mr ≈ 18,02 PubChem ↗

Molekul bengkok dengan sudut ±104,5°. Dua pasang elektron bebas pada O membuatnya polar dan mampu berikatan hidrogen.

Air, vitamin C dari jeruk, kurkumin dari kunyit, kapsaisin dari cabai, eugenol dari cengkeh, gingerol dari jahe, kafein dari kopi, dan zat wangi pandan. Semuanya "bahan kimia alami". Putar setiap molekul dan hitung atom karbonnya (bola abu-abu gelap). Molekul mana yang paling besar?

CONTOH **Fisika atau kimia?**

Golongkan peristiwa berikut menjadi perubahan fisika atau perubahan kimia: (a) es batu mencair di es teh, (b) nasi basi berbau asam, (c) gula dilarutkan dalam teh, (d) kembang api menyala berwarna-warni.

1. Tanyakan untuk setiap peristiwa: apakah terbentuk zat baru?
2. (a) Es dan air sama-sama H_2O; hanya wujudnya berubah → **fisika**.
3. (b) Bakteri mengubah zat dalam nasi menjadi asam dan zat berbau → zat baru → **kimia**.
4. (c) Gula masih gula, bisa didapatkan kembali dengan menguapkan airnya → **fisika**.
5. (d) Bahan kembang api terbakar menghasilkan gas, asap, cahaya, dan panas → **kimia**.

Fisika: (a) dan (c). Kimia: (b) dan (d). Kuncinya bukan seberapa "heboh" perubahannya, tetapi apakah zat baru terbentuk.

1.2 Cabang kimia dan profesi kimiawan

Kimia sangat luas, sehingga para ilmuwan membaginya menjadi beberapa cabang. Setiap cabang punya "pertanyaan favorit" sendiri. Dalam praktik, cabang-cabang ini saling meminjam alat dan ide.

Cabang	Pertanyaan favoritnya	Contoh di sekitarmu
Kimia organik	Bagaimana senyawa karbon tersusun dan bereaksi?	kapsaisin cabai, obat, plastik, bensin
Kimia anorganik	Bagaimana sifat logam, mineral, dan garam?	nikel untuk baterai, semen, garam Madura
Kimia fisik	Mengapa dan seberapa cepat reaksi terjadi? Berapa energinya?	kecepatan gula larut, baterai, kompres dingin
Kimia analitik	Zat apa yang ada di sini, dan berapa banyak?	uji formalin pada tahu, kadar gula darah
Biokimia	Reaksi apa yang terjadi di dalam makhluk hidup?	pencernaan, fermentasi tempe dan tapai

Ada juga cabang yang lebih muda, seperti **kimia lingkungan** (kabut asap, sampah plastik, kualitas air sungai), **kimia material** (baterai, semikonduktor, bioplastik), dan **kimia inti** (radioaktivitas untuk kedokteran dan

pembangkit listrik).

Siapa saja yang bekerja dengan kimia?

Profesi	Contoh pekerjaannya
Apoteker	meracik dan memeriksa obat, menjelaskan dosis dan efek sampingnya
Analis pangan dan obat (misalnya di BPOM)	menguji jajanan dari pewarna terlarang Rhodamin B, formalin, dan boraks
Insinyur kimia	menjalankan kilang minyak di Balikpapan dan Cilacap, pabrik pupuk, semen, dan kelapa sawit
Ahli forensik	memeriksa racun, noda, dan serat sebagai barang bukti
Peneliti di BRIN dan kampus	mencari obat dari tumbuhan hutan, bahan bakar nabati, dan bahan baterai
Ahli material dan metalurgi	mengolah bijih nikel Sulawesi menjadi bahan baterai
Peracik aroma dan rasa	meracik parfum dari minyak nilam Aceh dan cita rasa dari rempah
Ahli lingkungan	memantau kualitas air sungai, udara, dan limbah pabrik
Guru kimia	menularkan rasa ingin tahu (dan menjaga semua orang tetap selamat di lab)!

KIMIA NUSANTARA · PENJAGA DI BALIK LAYAR

Setiap kali kamu membeli jajanan berlabel izin edar, ada kimiawan yang bekerja di baliknya. **BPOM** (Badan Pengawas Obat dan Makanan) menguji obat, kosmetik, dan pangan dari zat berbahaya. **BRIN** (Badan Riset dan Inovasi Nasional) meneliti mulai dari obat herbal sampai baterai. Pabrik pupuk di Gresik, Bontang, dan Palembang memberi makan sawah-sawah kita. Semuanya membutuhkan orang yang paham kimia, mungkin suatu hari kamu!



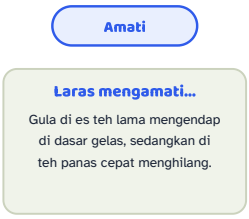
TAMU DARI MASA LALU

Kata *kimia* sampai kepada kita lewat bahasa Arab *al-kīmiyā'*; asal-usul yang lebih tua masih diperdebatkan. Para alkimiawan di dunia Islam abad ke-8 sampai ke-10, seperti tokoh-tokoh yang dikenal sebagai **Jabir ibn Hayyan** dan **Abu Bakar ar-Razi**, menyempurnakan teknik distilasi, kristalisasi, dan penyaringan; ar-Razi bahkan menggolongkan zat menjadi mineral, tumbuhan, dan hewan. Seribu tahun kemudian, pada 1789, **Antoine Lavoisier** di Prancis menerbitkan buku teks kimia modern. Dibantu istrinya, **Marie-Anne Paulze Lavoisier**, yang menggambar alat-alat dan menerjemahkan karya ilmiah, ia menunjukkan bahwa massa tidak hilang dalam reaksi kimia dan menata cara menamai zat. Sayang, Lavoisier dihukum mati pada 1794 di masa Revolusi Prancis.

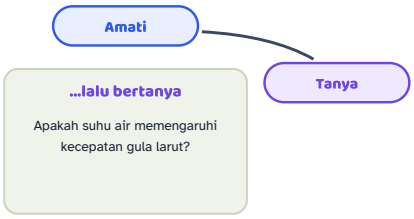
1.3 Metode ilmiah: berpikir seperti detektif

Kimiawan tidak menebak lalu berhenti. Mereka bekerja seperti detektif: mengumpulkan petunjuk, menduga, lalu menguji dugaan itu dengan percobaan. Rangkaian langkah ini disebut **metode ilmiah**. Ikuti kisah Laras dan segelas es teh.

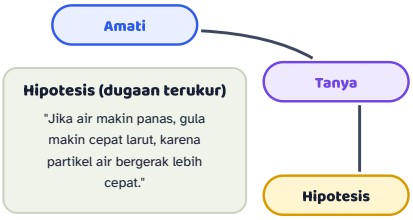
Bahasa sederhana · Metode ilmiah itu sederhana: lihat baik-baik, ajukan pertanyaan, tebak jawabannya, lalu buktikan dengan percobaan. Kalau tebakanmu salah, tidak apa-apa. Itu justru membuatmu belajar sesuatu yang baru!



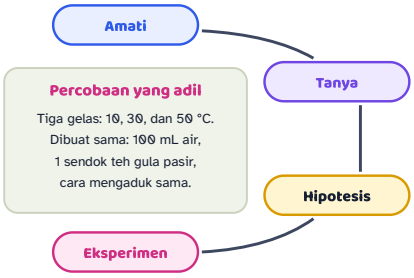
Langkah 1. Mengamati dengan pancaindra dan alat ukur. Pengamatan yang baik itu teliti dan dicatat, bukan sekadar "kayaknya".



Langkah 2. Bertanya: ubah rasa penasaran menjadi pertanyaan yang bisa diuji dengan percobaan.



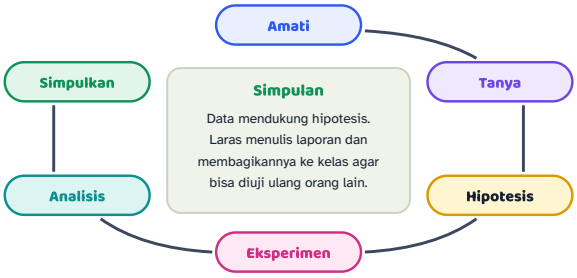
Langkah 3. Hipotesis: jawaban sementara yang bisa diuji, sebaiknya dengan alasannya. Pola "jika ..., maka ..., karena ..." sangat membantu.



Langkah 4. Eksperimen: ubah satu hal saja (suhu), ukur hasilnya (waktu larut), dan jaga hal lain tetap sama.



Langkah 5. Analisis data: susun tabel, hitung rata-rata, buat grafik, lalu cari polanya.



Langkah 6. Simpulkan dan bagikan: apakah data mendukung hipotesis? Laporkan dengan jujur, termasuk bila hasilnya tidak sesuai harapan.



Langkah 7. Setiap jawaban memunculkan pertanyaan baru. Itulah sebabnya sains terus berkembang!

DEFINISI · TIGA JENIS VARIABEL

- **Variabel bebas**: hal yang **sengaja diubah** oleh peneliti (misalnya suhu air).
- **Variabel terikat**: hal yang **diukur** sebagai hasil, karena nilainya bergantung pada variabel bebas (misalnya waktu sampai gula larut).
- **Variabel kontrol**: semua hal yang **dijaga tetap sama** agar perbandingannya adil (volume air, jenis dan massa gula, cara mengaduk, ukuran gelas).

TRIK KAK TIRTA · UBAH–UKUR–JAGA

Bebas = yang aku **UBAH**. Terikat = yang aku **UKUR**. Kontrol = yang aku **JAGA**. Kalau kamu bingung, tulis kalimat: "Aku mengubah ___ untuk melihat pengaruhnya pada ___, sambil menjaga ___ tetap sama."

ATURAN · PERCOBAAN YANG ADIL (*FAIR TEST*)

Dalam satu percobaan, ubah **hanya satu** variabel bebas. Bila dua hal diubah sekaligus dan hasilnya berbeda, kita tidak bisa tahu mana penyebabnya. Ulangi setiap perlakuan beberapa kali agar hasilnya bisa dipercaya.

Tebak Dulu!

Laras ingin tahu apakah suhu air memengaruhi kecepatan gula larut. Rancangan mana yang adil?

Gelas A: air panas dan diaduk. Gelas B: air dingin dan tidak diaduk.

Gelas A: air panas dengan gula halus. Gelas B: air dingin dengan gula batu.

Gelas A dan B sama-sama berisi 100 mL air dan 1 sendok teh gula pasir, diaduk dengan cara sama; hanya suhu airnya yang berbeda.

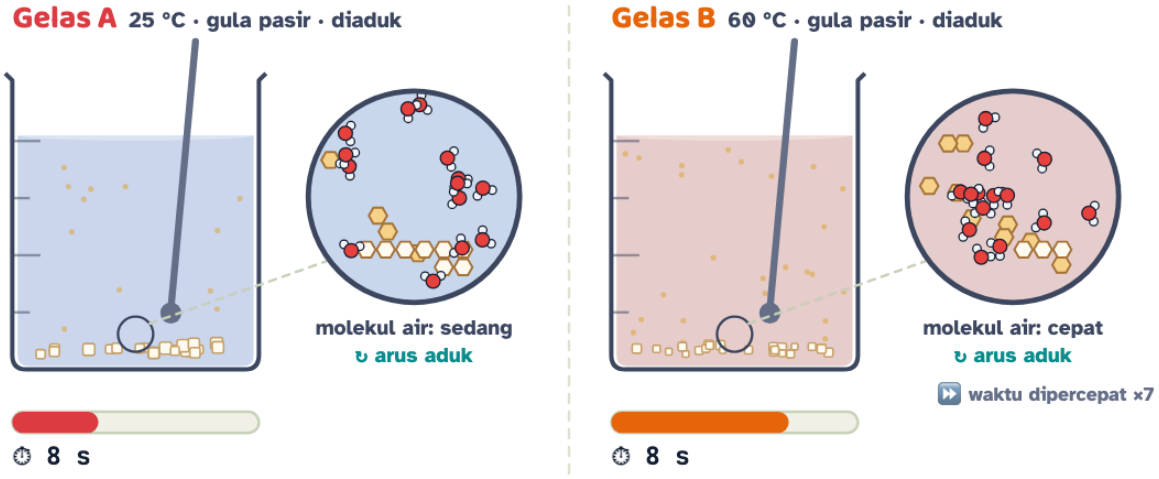
Cukup satu gelas air panas, lalu catat waktunya dengan teliti.

Jawabannya: rancangan ketiga. Pada pilihan pertama dan kedua, dua hal berubah sekaligus, sehingga kita tidak tahu mana yang membuat gula cepat larut. Pilihan keempat tidak punya pembanding sama sekali. Coba sendiri di Lab Mini berikut, termasuk membuat rancangan yang "curang"!

LAB MINI Detektif Variabel: uji gula yang adil

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-1

Misi 1 · Apakah suhu air memengaruhi kecepatan gula larut?
✔ Uji adil: hanya suhu air yang berbeda. Tekan ▶ Jalankan!



Gerak partikel di lensa diperlambat dan dibesar-besarkan agar terlihat.

Waktu larut A	Waktu larut B	Pemeriksa	Misi selesai
⏱ 8 s	⏱ 8 s	adil ✔	☐ suhu · ☐ butir · ☐ aduk

Pilih misi, lalu atur gelas A dan B. Pemeriksa di atas akan menilai: apakah hanya **satu** variabel yang berbeda, dan apakah itu variabel misimu? Tekan ▶ Jalankan dan amati lensa: molekul air bergerak lebih cepat di air panas, sedangkan pengadukan membawa air "segar" ke permukaan kristal. Selesaikan ketiga misi! Coba juga 🎲 rancangan acak, lalu perbaiki sampai adil.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Cepat larut tidak sama dengan banyak larut. Mengaduk dan menghaluskan gula hanya mempercepat gula larut; jumlah gula maksimum yang bisa larut (**kelarutan**) tidak berubah. Suhu berbeda: ia mempercepat *dan* menaikkan kelarutan gula.

Data percobaan biasanya disajikan dalam grafik. Grafik di bawah ini berasal dari data kelarutan nyata: berapa gram zat paling banyak yang dapat larut dalam 100 g air pada setiap suhu.

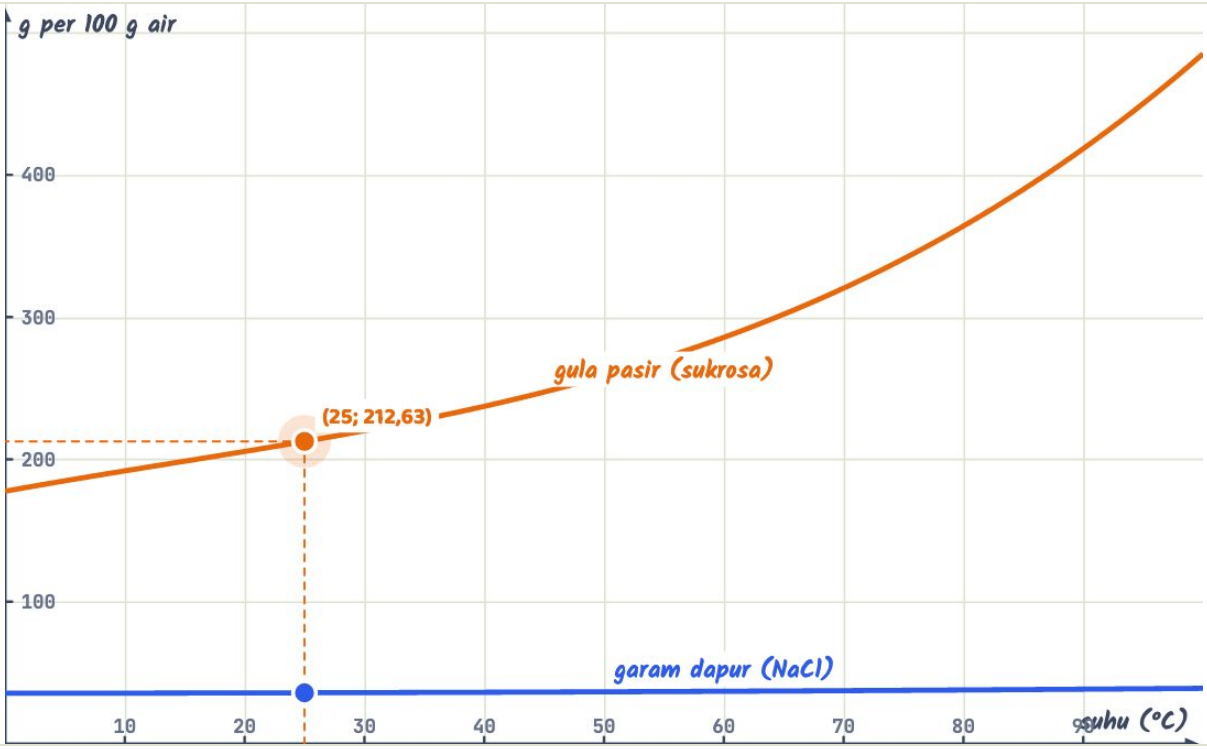
GRAFIK HIDUP

Kurva kelarutan: gula melonjak, garam hampir datar

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-1

$$S = f(T)$$

$$T = 25\ ^\circ\mathrm{C}: \quad S_{\mathrm{gula}} = 212{,}63\ \mathrm{g}, \quad S_{\mathrm{NaCl}} = 35{,}98\ \mathrm{g\ per\ 100\ g\ air}$$



gula maksimum	garam maksimum	gula : garam
213 g/100 g air	36 g/100 g air	5,9 kali

Seret titik oranye. Kenaikan suhu dari 0 °C ke 100 °C hampir melipatgandakan kelarutan gula, tetapi kelarutan garam hanya naik ±10%. Itulah sebabnya petani garam di Madura memakai penguapan oleh panas matahari, bukan pendinginan, untuk mendapatkan kristal garam.

KERJAKAN BERSAMA

Merancang uji pengadukan

Bima ingin membuktikan bahwa mengaduk membuat gula lebih cepat larut. Tentukan variabel bebas, terikat, dan kontrolnya, lalu rancang percobaannya.

1. Yang diubah (bebas): **pengadukan**, yaitu diaduk atau tidak diaduk.
2. Yang diukur (terikat): **waktu sampai gula larut sempurna**, dalam detik.
3. Yang dijaga (kontrol): suhu air, volume air (100 mL), jenis dan massa gula (5 g gula pasir), ukuran gelas, cara menentukan "larut sempurna".
4. Rancangan: dua gelas identik; gelas A diaduk 1 putaran per detik, gelas B didiamkan. Mulai stopwatch bersamaan. Ulangi 3 kali dan hitung rata-ratanya.

Bila gelas A selalu lebih cepat dalam ketiga ulangan, Bima punya bukti yang adil bahwa pengadukan mempercepat gula larut.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

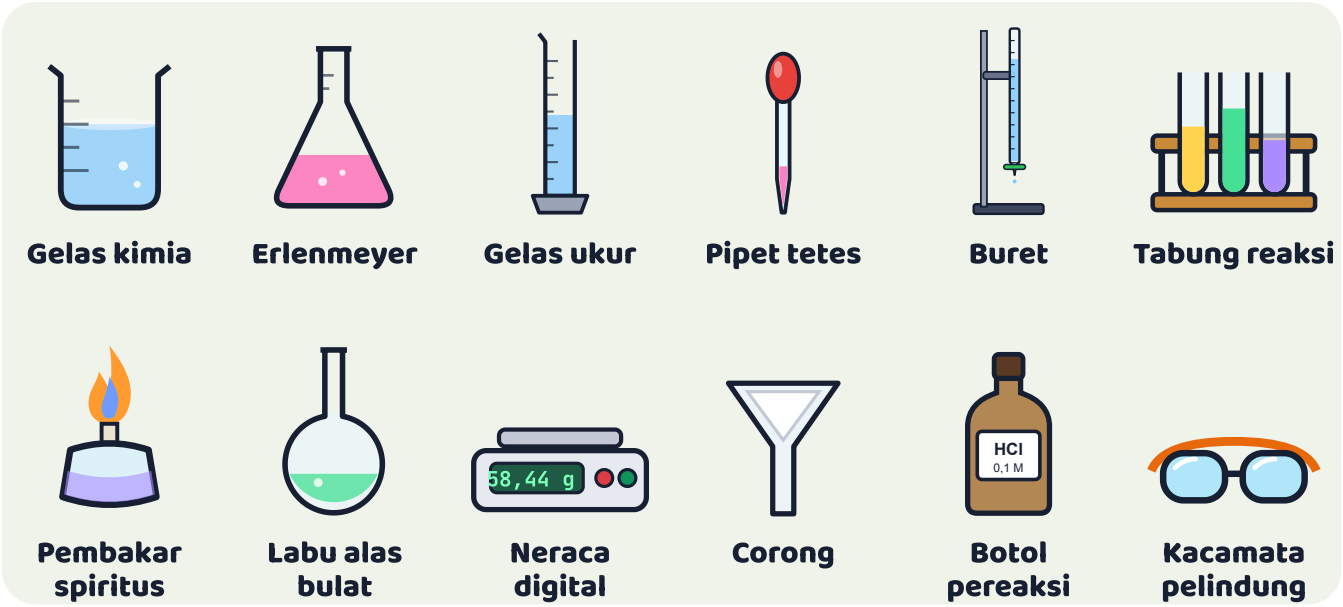
SEBERAPA YAKIN KITA? ULANGAN, RATA-RATA, DAN KETIDAKPASTIAN

Tiga ulangan waktu larut gula: 52 s, 49 s, dan 55 s. Rata-ratanya $(52 + 49 + 55)/3 = 52$ s. Ketidakpastian dapat ditaksir dari setengah rentang: $(55 - 49)/2 = 3$ s, sehingga hasilnya ditulis 52 ± 3 s, atau ketidakpastian relatif $3/52 \times 100\% \approx 6\%$.

- **Galat acak** (misalnya waktu reaksi jari menekan stopwatch) membuat data berserakan di sekitar nilai benar. Dapat dikurangi dengan menambah ulangan.
- **Galat sistematis** (misalnya termometer yang selalu terbaca 2 °C terlalu tinggi) menggeser semua data ke satu arah. Menambah ulangan tidak menolong; alatnya harus dikalibrasi.
- Data yang **presisi** saling berdekatan; data yang **akurat** dekat dengan nilai benar. Data bisa presisi tetapi tidak akurat!

1.4 Alat laboratorium dan dua hitungan pertama

Dapurmu punya panci, gelas takar, dan timbangan. Laboratorium punya "saudara-saudaranya" yang dibuat dari kaca tahan panas dan diberi skala yang jauh lebih teliti. Kenali wajah-wajah mereka:



Dua belas alat dasar laboratorium kimia sekolah. Buret biasanya dijepit pada statif; kacamata pelindung wajib dipakai selama praktikum.

Alat	Fungsi utama	"Saudaranya" di dapur	Ketelitian
Gelas kimia	menampung, mencampur, memanaskan larutan	mangkuk, panci kecil	kasar (skala ±5%)
Labu Erlenmeyer	mengocok larutan tanpa tumpah; wadah titrasi	botol bermulut sempit	kasar
Gelas ukur	menakar volume cairan	gelas takar	sedang (±1%)
Pipet tetes	meneteskan cairan sedikit demi sedikit	sedotan yang ujungnya ditutup jari	tidak untuk mengukur
Buret dan pipet volume	mengukur volume sangat teliti, misalnya saat titrasi	tidak ada!	teliti (buret dibaca sampai 0,05 mL)
Tabung reaksi	mereaksikan zat dalam jumlah sedikit	gelas sloki	tidak untuk mengukur
Pembakar spiritus/Bunsen	memanaskan	kompor	–
Labu alas bulat	memanaskan larutan secara merata, distilasi	ketel	–

Neraca digital	menimbang massa	timbangan dapur	0,01 g (timbangan dapur: 1 g)
Corong	memindahkan cairan; menyaring dengan kertas saring	corong minyak	–

✏️ **TRIK KAK TIRTA · MEMBACA MENISKUS**

Permukaan air di gelas ukur melengkung seperti senyum. Lengkungan ini disebut **meniskus**. Baca skala pada **bagian terbawah lengkungan**, dengan mata **sejajar** permukaan cairan. Membaca dari atas atau bawah membuat angkanya meleset (galat paralaks). Ingat: "gelas kimia menampung, gelas ukur menakar, buret menghitung tetes demi tetes."

Hitungan pertama: massa jenis

Neraca mengukur massa, gelas ukur mengukur volume. Gabungkan keduanya dan kamu mendapat besaran baru yang bisa mengenali zat: **massa jenis** (ρ, dibaca "rho"), yaitu massa setiap satu satuan volume. Benda yang massa jenisnya lebih kecil daripada air (1 g/cm³) mengapung; yang lebih besar tenggelam.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad 1\ \text{mL} = 1\ \text{cm}^3$$

Zat	Massa jenis (g/cm³, ±25 °C)	Di air…
Styrofoam	±0,03	mengapung tinggi
Etanol (alkohol)	0,79	bercampur
Minyak goreng, es	±0,92	mengapung
Air murni	1,00	–
Air laut	±1,03	tenggelam di air tawar, lalu bercampur
Madu	±1,4	tenggelam
Aluminium · besi · emas	2,70 · 7,87 · 19,3	tenggelam

RUMUS HIDUP

Massa jenis: tenggelam atau mengapung?

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Massa jenis adalah seberapa banyak massa yang dijejalkan ke dalam setiap sentimeter kubik.

- m Massa benda g
- V Volume benda cm^3
- ρ Massa jenis g/cm^3

MASSA JENIS

0,92

g/cm^3

mengapung di air | **≈ minyak goreng**

Air sebanyak **100** cm^3 bermassa **100** g, sedangkan bendamu **92** g. Bendamu **0,92** kali lebih berat daripada air bervolume sama.

Cek satuan: g ÷ cm^3 = g/cm^3 ✔ (sama dengan g/mL)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MASSA-JENIS-APUNG

KERJAKAN BERSAMA

Gelang emas dari pasar

Sebuah gelang "emas" bermassa 38,6 g dimasukkan ke gelas ukur berisi 20,0 mL air. Permukaan air naik menjadi 22,5 mL. Apakah gelang itu emas murni ($\rho = 19{,}3$ g/cm³)?

1. Volume gelang = kenaikan air: $V = 22{,}5 - 20{,}0 = 2{,}5$ mL $= 2{,}5$ cm^3.
2. Massa jenis: $\rho = \dfrac{m}{V} = \dfrac{38{,}6\ \text{g}}{2{,}5\ \text{cm}^3} = 15{,}4$ g/cm^3.
3. Bandingkan: $15{,}4 < 19{,}3$. Gelang itu lebih "ringan" daripada emas murni bervolume sama.

Bukan emas murni. Massa jenis ±15,4 g/cm^3 cocok dengan paduan emas (misalnya emas 18 karat yang dicampur perak dan tembaga). Cara ini mirip kisah Archimedes dan mahkota raja!

ADU CEPAT **Massa jenis kilat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-1

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

ρ = m ÷ V. Contoh: 27 g ÷ 10 cm^3 = 2,7 g/cm^3 (aluminium).

Hitungan kedua: persentase massa

Label produk sering menulis kadar dalam persen: "pemutih mengandung natrium hipoklorit 5%", "susu berlemak 3,5%". Artinya, dalam setiap 100 g campuran ada 5 g atau 3,5 g zat itu. Inilah **persentase massa**.

RUMUS HIDUP **Persentase massa: seberapa manis es tehmu?**

$$\%\,\text{gula} = \frac{m_{\text{gula}}}{m_{\text{gula}} + m_{\text{air}}} \times 100\%$$

Bagian massa gula dari seluruh massa minuman, dinyatakan per seratus.

m_{gula} Massa gula g

m_{air} Massa air teh g

$\%\,\text{gula}$ Kadar gula %

KADAR GULA

9,1

%

25 g gula dalam **275** g minuman, kira-kira **2** sendok makan. Itu **50**% dari batas gula harian anjuran Kementerian Kesehatan (50 g).

Cek satuan: g ÷ g × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KADAR-GULA-ESTEH

COBA SENDIRI **Teko es teh dan batas gula harian**

Penjual es teh membuat seteko minuman dari 2.000 g air teh dan 240 g gula. (a) Berapa persen massa gula? (b) Satu gelas berisi 280 g minuman. Berapa gram gula yang kamu minum? (c) Berapa persen dari batas gula harian 50 g? (d) Bila 70 g es batu ditambahkan ke gelas itu dan mencair, berapa persen gulanya sekarang?

1. (a) Massa total $= 2.000 + 240 = 2.240$ g. Kadar $= \dfrac{240}{2.240} \times 100\% = 10{,}7\%$.
2. (b) Gula dalam segelas $= 10{,}7\% \times 280\ \text{g} = \dfrac{240}{2.240} \times 280 = 30\ \text{g}$.
3. (c) $\dfrac{30}{50} \times 100\% = 60\%$ dari batas harian, hanya dari satu gelas!
4. (d) Es menambah massa air, bukan gula: $\dfrac{30}{280 + 70} \times 100\% = \dfrac{30}{350} \times 100\% = 8{,}6\%$.

(a) 10,7% · (b) 30 g · (c) 60% · (d) 8,6%. Es batu membuat minuman terasa kurang manis, tetapi jumlah gula yang kamu minum tetap 30 g.

1.5 Keselamatan kerja dan piktogram bahaya

Kimiawan yang hebat bukan yang paling berani, tetapi yang paling teliti menjaga keselamatan. Hampir semua kecelakaan di laboratorium sekolah bisa dicegah dengan kebiasaan sederhana.

Bahasa sederhana · Di laboratorium, ada aturan seperti di jalan raya. Kita memakai kacamata pelindung seperti pengendara memakai helm. Kita tidak makan dan minum di lab, tidak mencicipi apa pun, dan selalu bertanya kepada guru kalau ragu.

⚠️ **KESELAMATAN**

Keselamatan dulu, percobaan kemudian: tidak ada hasil percobaan yang lebih berharga daripada mata dan kulitmu.

1. Pakai jas lab, **kacamata pelindung**, dan sepatu tertutup. Ikat rambut panjang; selipkan ujung kerudung ke dalam jas lab.
2. Jangan makan, minum, atau mencicipi apa pun di lab.
3. Mencium bau dengan mengibaskan uapnya ke arah hidung, bukan menghirup langsung dari mulut wadah.
4. Saat memanaskan tabung reaksi, arahkan mulut tabung menjauhi dirimu dan temanmu.
5. Baca label dua kali sebelum memakai. Jangan mengembalikan sisa bahan ke botol asal.
6. Buang limbah sesuai petunjuk guru, bukan sembarangan ke wastafel.
7. Ketahui letak keran air, pencuci mata, dan alat pemadam api. Laporkan setiap kecelakaan sekecil apa pun.
8. Bila bahan kimia mengenai kulit atau mata, segera bilas dengan air mengalir selama ±15 menit, lalu lapor ke guru.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · ASAM MASUK KE AIR**

Bila suatu hari gurumu mengencerkan asam pekat, urutannya selalu: **air dulu, asam dituang perlahan ke dalam air**, bukan sebaliknya. Bila air dituang ke asam pekat, panas yang timbul bisa membuat cairan mendidih tiba-tiba dan memercik. Jembatan keledainya: "Asam ikut berenang ke kolam, bukan kolam ditumpahkan ke asam."

Bagaimana kita tahu sebuah bahan berbahaya? Lihat labelnya! Dunia memakai satu sistem lambang bahaya, yaitu **GHS** (*Globally Harmonized System*) buatan Perserikatan Bangsa-Bangsa, yang juga diterapkan di Indonesia. Setiap piktogram berbentuk belah ketupat berbingkai merah. Label juga memuat kata sinyal **"Bahaya"** (lebih serius) atau **"Peringatan"**.



Mudah menyala
bensin, spiritus, LPG



Oksidator
memperhebat api



Eksplosif
kembang api, mesiu



Gas bertekanan
tabung gas



Korosif
air aki, soda api



Toksik akut
beracun walau sedikit



Iritan (tanda seru)
perih di kulit/mata



Bahaya kesehatan
merusak organ jangka panjang



Bahaya lingkungan
meracuni ikan

LAB MINI Rak Bahaya: tempelkan piktogram yang tepat

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-1

Seret piktogram dari kotak bawah ke produk di rak. Ketuk piktogram untuk membaca artinya.



Spiritus	Tabung LPG	Pemutih pekat	Sabun cuci piring	Obat nyamuk
etanol + metanol	propana + butana	natrium hipoklorit	surfaktan	semprot (aerosol)

Kotak piktogram · seret ke produk, atau ketuk untuk membaca artinya



Menyala · Oksidator · Eksplosif · Gas tekan · Korosif · Toksik · Iritan · Kesehatan · Lingkungan

Kotak bergaris putus-putus = piktogram wajib yang belum terpasang.

Piktogram wajib terpasang	Tempelan keliru	Status
0 / 8	0	masih ada yang kurang

Seret piktogram dari kotak bawah ke produk yang cocok. Satu produk bisa punya lebih dari satu bahaya; kotak bergaris putus-putus menunjukkan berapa yang masih kurang. Ketuk piktogram untuk membaca artinya, ketuk produk untuk membaca petunjuknya. Selesaikan kedua rak!

Di rumah pun ada banyak produk berlabel bahaya: pemutih pakaian, pembersih lantai dan porselen, obat nyamuk, spiritus, tiner, pupuk, dan pestisida. Simpan di wadah aslinya, jauh dari jangkauan adik kecil, jauh dari kompor, dan **jangan pernah** memindahkannya ke botol bekas minuman.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Mencampur dua pembersih tidak membuatnya dua kali lebih ampuh. Pemutih yang tercampur pembersih porselen (yang bersifat asam) atau pembersih beramonia melepaskan gas beracun. Pakai satu produk saja, bilas, dan pastikan ruangan berventilasi.

TAMU DARI MASA LALU

Marie Curie, peraih Nobel Fisika (1903) dan Nobel Kimia (1911), meneliti unsur radioaktif radium dan polonium tanpa pelindung, karena bahayanya belum dipahami. Ia meninggal pada 1934 karena penyakit darah yang diduga akibat radiasi. Buku-buku catatannya masih radioaktif hingga kini dan disimpan dalam kotak berlapis timbal di Prancis. Ilmu keselamatan lahir dari pengalaman pahit para perintis seperti dia.

Tantangan Rumah: detektif label bahaya

Bahan: HP untuk memotret, buku catatan, dan produk rumah tangga yang ada (pemutih, pembersih lantai, sabun cuci piring, obat nyamuk, spiritus, pupuk tanaman).

1. Bersama orang dewasa, kumpulkan produk-produk itu di satu tempat yang terang. Jangan membuka tutupnya.
2. Potret labelnya. Catat nama produk, piktogram GHS yang tercetak, kata sinyal ("Bahaya" atau "Peringatan"), dan petunjuk pertolongan pertamanya.
3. Periksa tempat penyimpanannya: jauh dari anak kecil? jauh dari kompor? masih di wadah asli?
4. Buat "peta bahaya rumahku" dan tempelkan di dekat tempat penyimpanan.

Keselamatan: kerjakan bersama orang dewasa; jangan membuka, mencium, mencicipi, atau mencampur isi produk; cuci tangan setelah selesai; kembalikan semua produk ke tempat yang aman.

Pertanyaan: Piktogram apa yang paling sering kamu temukan? Adakah produk yang tidak berlabel piktogram? Adakah produk yang disimpan di tempat berbahaya, dan bagaimana kamu memperbaikinya?

1.6 Kimia untuk Indonesia

Jauh sebelum ada laboratorium modern, nenek moyang kita sudah menjadi kimiawan yang ulung. Mereka belum mengenal rumus, tetapi mereka menguasai peragian, pewarnaan, dan ekstraksi zat dari tumbuhan.

KIMIA NUSANTARA · JAMU, LABORATORIUM DALAM BOTOL

Kunyit asam, beras kencur, dan temulawak adalah ekstrak zat aktif tumbuhan dalam air. Warna kuning kunyit berasal dari **kurkumin**; rasa hangat jahe dari **gingerol**. Kurkumin juga indikator alami: kunyit yang tercampur kapur sirih (bersifat basa) berubah menjadi merah-cokelat. Pada 2023, budaya sehat jamu diakui UNESCO sebagai Warisan Budaya Takbenda dari Indonesia.

KIMIA NUSANTARA · BATIK, KIMIA DI ATAS KAIN

Malam (lilin batik) adalah campuran parafin, gondorukem (getah pinus), dan lilin lebah. Malam menolak zat warna, sehingga bagian kain yang tertutup tetap terang. Pewarna biru alami **indigo** berasal dari daun tarum. Indigo tidak larut dalam air, jadi di bak celup ia diubah dulu menjadi bentuk larut yang berwarna kuning kehijauan. Begitu kain diangkat ke udara, oksigen mengubahnya kembali menjadi biru indigo, tepat di depan matamu! Pembatik juga "mengunci" warna dengan tawas, kapur, atau tunjung, yang masing-masing memberi corak berbeda.

Tempe adalah karya bioteknologi Indonesia: jamur *Rhizopus* menghasilkan enzim yang memecah protein dan lemak kedelai menjadi molekul lebih kecil yang lebih mudah dicerna. Hari ini, kimia membantu Indonesia di bidang yang lebih besar lagi:

- **Pangan.** Pabrik pupuk mengubah nitrogen udara menjadi amonia, lalu amonia dan karbon dioksida menjadi urea, pupuk **nitrogen** untuk sawah: $2\,\mathrm{NH_3} + \mathrm{CO_2} \longrightarrow \mathrm{CO(NH_2)_2} + \mathrm{H_2O}$.
- **Energi.** Indonesia memiliki cadangan **nikel** terbesar di dunia, terutama di Sulawesi dan Maluku Utara. Nikel, bersama **litium** dan **kobalt**, adalah bahan baterai kendaraan listrik. Biodiesel dari minyak sawit sudah dicampurkan ke solar.
- **Kesehatan.** Obat dari tumbuhan hutan tropis, vaksin, dan pengawasan mutu pangan semuanya membutuhkan kimiawan.

Namun industri juga bisa mencemari sungai dan udara. Karena itu, kimiawan masa kini memegang prinsip **kimia hijau**: merancang proses yang sejak awal mencegah limbah, memakai bahan terbarukan, menghemat energi, dan menghasilkan produk yang aman. Lebih baik mencegah limbah daripada membersihkannya!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGUKUR "KEHIJAUAN" REAKSI: EKONOMI ATOM DAN FAKTOR E

Ekonomi atom membandingkan massa produk yang diinginkan dengan massa semua pereaksi:

$$\text{ekonomi atom} = \frac{M_r \text{ produk yang diinginkan}}{\sum M_r \text{ semua pereaksi}} \times 100\%$$

Untuk urea, $2\,\mathrm{NH_3} + \mathrm{CO_2} \longrightarrow \mathrm{CO(NH_2)_2} + \mathrm{H_2O}$: $\dfrac{60}{2(17)+44} \times 100\% = \dfrac{60}{78} \times 100\% = 76{,}9\%$. Sisanya menjadi air, hasil samping yang tidak berbahaya.

Faktor E (diperkenalkan Roger Sheldon) adalah massa limbah dibagi massa produk. Industri kimia curah biasanya punya faktor E di bawah 5, sedangkan industri obat bisa puluhan sampai lebih dari seratus: untuk 1 kg obat, bisa terbuang lebih dari 100 kg pelarut dan bahan lain. Di sinilah kimiawan hijau berlomba berinovasi.

Kimia di sekitarmu



Jeruk nipis dan bau amis

Bau amis ikan berasal dari senyawa amina yang mudah menguap. Asam sitrat jeruk nipis mengubahnya menjadi garam yang tidak menguap, sehingga baunya hilang.



Sabun

Molekul sabun berkepala "suka air" dan berekor "suka minyak". Ekornya menangkap minyak, kepalanya menarik minyak itu larut bersama air bilasan.



Pasta gigi berfluorida

Ion fluorida mengubah sebagian mineral email gigi menjadi fluorapatit yang lebih tahan terhadap asam dari sisa makanan.



Air PDAM

Tawas menggumpalkan lumpur halus agar mengendap, lalu klorin membunuh kuman. Itulah sebabnya air ledeng kadang berbau "kolam renang".



Baterai HP dan motor listrik

Ion litium bolak-balik di antara dua elektrode saat diisi dan dipakai. Bahan elektrodenya bisa memakai nikel dari Sulawesi.



Roti dan kue mengembang

Ragi dan soda kue menghasilkan gas karbon dioksida. Gelembung gas inilah yang membuat adonan mengembang dan berpori.

Cek Cepat

Manakah yang merupakan perubahan kimia?

- Es batu mencair
- Gula larut dalam teh
- Kayu bakar menjadi abu dan asap
- Air menguap dari jemuran

Laras menguji pengaruh pengadukan terhadap kecepatan gula larut. Apa yang harus sama di kedua gelas?

- Hanya suhu airnya
- Suhu air, volume air, jenis dan massa gula
- Tidak ada, asal pengukurannya cepat
- Cara mengaduknya

Piktogram GHS bergambar nyala api di atas lingkaran berarti ...

- mudah menyala
- eksplosif
- korosif
- oksidator yang dapat memperhebat kebakaran

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. D

Tantangan Rumah: balapan gula panas vs dingin

Bahan: dua gelas bening yang sama, gula pasir, sendok teh, gelas takar, air dingin dari kulkas, air hangat dari termos atau dispenser (bukan air mendidih), termometer dapur bila ada, dan stopwatch HP.

1. Tulis hipotesismu: gelas mana yang gulanya lebih cepat larut, dan mengapa?
2. Minta orang dewasa menuang 100 mL air dingin ke gelas A dan 100 mL air hangat ke gelas B. Ukur suhunya bila ada termometer.
3. Masukkan satu sendok teh peres gula pasir ke setiap gelas pada saat yang sama, lalu aduk keduanya dengan cara sama (1 putaran per detik).
4. Catat waktu sampai tidak ada butir gula yang terlihat. Ulangi 3 kali dengan air baru dan hitung rata-ratanya.
5. Ulangi, tetapi kali ini ubah variabel lain (misalnya diaduk vs tidak diaduk) dan jaga suhunya sama.

Keselamatan: air hangat cukup ±50 °C dan dituang oleh orang dewasa; letakkan gelas di permukaan datar yang stabil; lap tumpahan segera; jangan mencicipi selama percobaan.

Pertanyaan: Apa variabel bebas, terikat, dan kontrol di percobaanmu? Apakah hipotesismu terbukti? Jelaskan hasilnya dengan gerak partikel air.

RINGKASAN KILAT

Bab 1 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **kimia** sebagai ilmu tentang materi dan perubahannya, lalu menemukan contohnya di dapur dan tubuhmu
- membedakan **perubahan fisika** dan **perubahan kimia** pada tingkat makroskopik, partikel, dan simbol
- menyebutkan **cabang-cabang kimia** dan profesi yang memakainya di Indonesia
- merancang **percobaan yang adil** dengan metode ilmiah: hipotesis, variabel bebas, terikat, dan kontrol
- mengenal **alat laboratorium**, aturan keselamatan, dan **sembilan piktogram bahaya GHS**, serta menghitung massa jenis dan persentase massa

Istilah kunci

materi · Kimia · Materi · Perubahan fisika · Perubahan kimia · metode ilmiah · Variabel bebas · Variabel terikat · Variabel kontrol · kelarutan · meniskus · massa jenis · persentase massa · GHS · kimia hijau

Rumus penting

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Massa jenis: tenggelam atau mengapung?.
Massa jenis adalah seberapa banyak massa yang dijejalkan ke dalam setiap sentimeter kubik.

$$\%\,\text{gula} = \frac{m_{\text{gula}}}{m_{\text{gula}} + m_{\text{air}}} \times 100\%$$

Persentase massa: seberapa manis es tehmu?.
Bagian massa gula dari seluruh massa minuman, dinyatakan per seratus.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Tanda-tanda reaksi hanyalah petunjuk, bukan bukti.
- Cepat larut tidak sama dengan banyak larut.
- Keselamatan dulu, percobaan kemudian: tidak ada hasil percobaan yang lebih berharga daripada mata dan kulitmu.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=1

🧩 Teka-teki untuk Bab 2

Es batu, air, dan uap: satu zat, tiga wajah. Molekulnya sama-sama $\mathrm{H_2O}$. Tetapi mengapa uap air bersuhu 100 °C jauh lebih "galak" membakar kulit daripada air mendidih yang suhunya juga 100 °C?

▼ Intip petunjuk

Saat uap menyentuh kulit, ia mengembun menjadi air dan melepaskan kalor penguapan yang besar, sekitar 2.260 joule untuk setiap gram, baru kemudian mendingin seperti air panas biasa. Totalnya hampir sepuluh kali kalor dari air mendidih bermassa sama. Di Bab 2 kamu akan menghitungnya dengan $Q = mL$.

BAB 2 · DUNIA KIMIA

02 Materi, Wujud & Perubahannya: Pesta Dansa Partikel

Es di gelas es tehmu mencair, kapur barus di lemari menghilang tanpa jejak, dan aroma rendang Ibu sampai ke kamarmu. Semua itu ulah partikel-partikel super mungil yang tidak pernah diam. Yuk, intip pesta dansa mereka!

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan wujud **padat, cair, dan gas** dengan teori partikel: susunan, jarak, dan gerak partikelnya;
- menamai enam **perubahan wujud**, membaca **kurva pemanasan**, dan menghitung kalor dengan $Q = mc\Delta T$ dan $Q = mL$;
- menjelaskan **difusi** dan **gerak Brown** sebagai bukti bahwa partikel selalu bergerak;
- menggolongkan materi menjadi **unsur, senyawa, campuran homogen, dan campuran heterogen**;
- membedakan **perubahan fisika** dan **perubahan kimia** dari tanda-tandanya, lalu (Lanjut) membaca **diagram fasa**.

MISTERI KAPUR BARUS YANG MENYUSUT

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Saat air di panci mendidih, gelembung-gelembung besar muncul dari dasar panci. Gelembung itu berisi apa?

- Udara yang tadinya larut di dalam air.
- Gas oksigen dan hidrogen hasil penguraian air oleh panas.
- Uap air, yaitu air yang sudah berubah menjadi gas.
- Ruang hampa tanpa isi apa pun.

Jawabannya: uap air. Gelembung kecil yang muncul saat air baru hangat memang udara terlarut yang keluar. Namun gelembung besar saat mendidih berisi molekul H_2O yang sudah menjadi gas. Molekulnya tetap H_2O dan tidak terurai, sebab memecah air menjadi hidrogen dan oksigen butuh listrik (elektrolisis) atau suhu ribuan derajat. Mendidih adalah perubahan fisika!

2.1 Materi tersusun atas partikel yang tak pernah diam

Lihat sekelilingmu: sepiring nasi, segelas es teh, udara yang kamu hirup, bahkan tubuhmu sendiri. Semuanya adalah **materi**, yaitu segala sesuatu yang mempunyai massa dan menempati ruang. Udara juga materi: balon mengembang karena terisi udara, dan balon yang ditiup sedikit lebih berat daripada balon kempis.

Bagaimana dengan cahaya, bunyi, panas, dan rasa senang? Semuanya **bukan** materi karena tidak bermassa dan tidak menempati ruang. Cahaya dan kalor adalah bentuk **energi**.

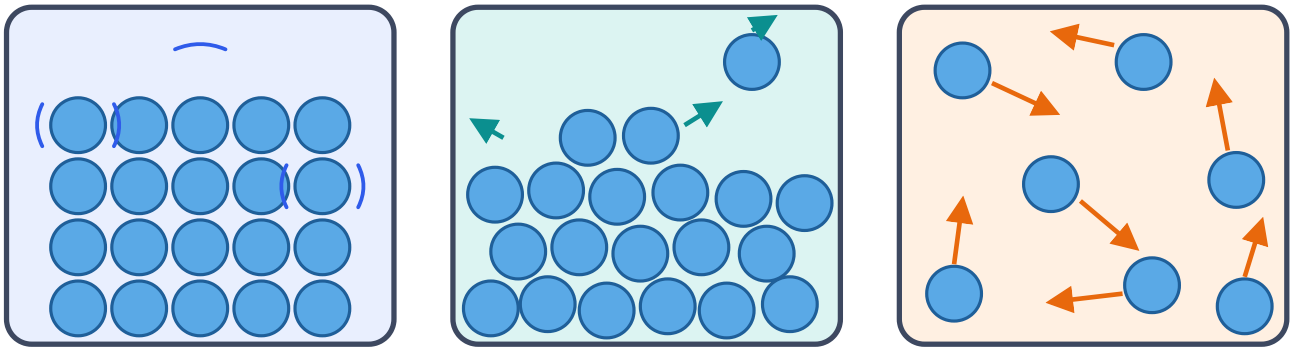
Bahasa sederhana · Bayangkan kamu bisa mengecilkan diri sampai sejuta kali lebih kecil daripada seekor semut. Kamu akan melihat bahwa air, garam, dan udara tersusun atas butiran super mungil yang terus bergoyang dan berlarian. Butiran itu disebut **partikel**. Partikel air di es batu, air minum, dan uap air sama persis. Yang berbeda hanya cara mereka berbaris dan bergerak.

DEFINISI · MATERI

Materi adalah segala sesuatu yang mempunyai massa dan menempati ruang. Materi tersusun atas partikel yang sangat kecil, yaitu atom, molekul, atau ion. Materi dapat berwujud **padat**, **cair**, atau **gas**.

TEORI PARTIKEL MATERI (TEORI KINETIK)

1. Semua materi tersusun atas partikel yang sangat kecil.
2. Partikel selalu bergerak: bergetar, meluncur, atau melesat.
3. Makin tinggi suhu, makin cepat gerak rata-rata partikel (energi kinetiknya makin besar).
4. Di antara partikel ada ruang kosong. Partikel yang berdekatan saling tarik-menarik.



PADAT
rapat · teratur · bergetar

CAIR
rapat · acak · meluncur

GAS
berjauhan · melesat bebas

Partikel yang sama dalam tiga wujud. Pada gas, partikelnya rata-rata ±10 kali lebih berjauhan daripada pada cairan, jadi kotak gas ini sebenarnya hanya memperlihatkan sebagian kecil saja.

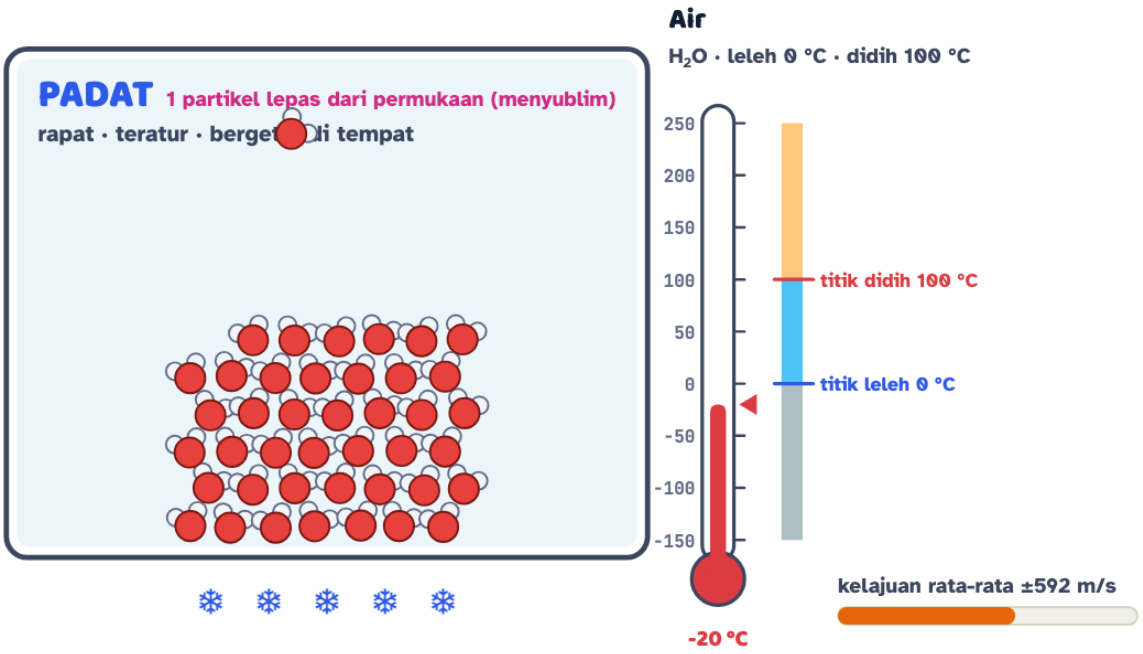
Kak Tirta suka membandingkannya dengan **upacara bendera hari Senin**. Saat upacara, siswa berbaris rapi dan hanya bergoyang di tempat: itulah **padat**. Saat bubar, siswa berjalan berdesakan menuju kelas, tetap berdekatan tetapi bisa berpindah tempat: itulah **cair**. Saat jam istirahat, siswa berlarian ke seluruh halaman: itulah **gas**.

Ciri	Padat	Cair	Gas
Susunan partikel	teratur, rapat	tidak teratur, rapat	acak, sangat berjauhan

Gerak partikel	bergetar di tempat	meluncur, berpindah tempat	melesat cepat ke segala arah
Gaya tarik antarpartikel	sangat kuat	kuat	sangat lemah
Bentuk	tetap	mengikuti wadah	memenuhi seluruh wadah
Volume	tetap	tetap	mengikuti wadah
Dapat dimampatkan?	hampir tidak	hampir tidak	mudah (gas dalam tabung LPG)
Contoh	es batu, garam, timah Bangka	air kelapa, minyak goreng, kecap	udara, uap air, isi balon

LAB MINI **Kotak Partikel: geser suhunya!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-2



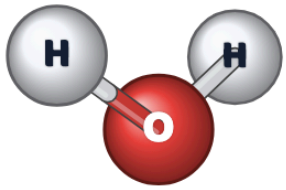
Wujud	Suhu mutlak	Kelajuan rata-rata partikel	Partikel berwujud gas
padat	253 K	592 m/s	1

Pilih zat, lalu geser suhu perlahan dari dingin ke panas. Kapan partikel mulai meluncur? Kapan mereka melesat? Nyalakan **gaya tarik** untuk melihat partikel yang saling berpegangan. Coba juga es kering: adakah wujud cairnya pada tekanan udara biasa? (Jumlah partikel uap di bawah titik didih hanyalah ilustrasi.)

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Sifat zat bukan sifat satu partikelnya. Saat rel kereta memuai karena panas, atom besinya tidak membesar; yang bertambah adalah jarak antaratom. Partikel es juga tidak "dingin" atau "keras". Partikel air yang sama hanya bergerak lebih lambat dan tersusun teratur.

MOLEKUL 3D **Kenalan dengan partikel-partikelnya**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

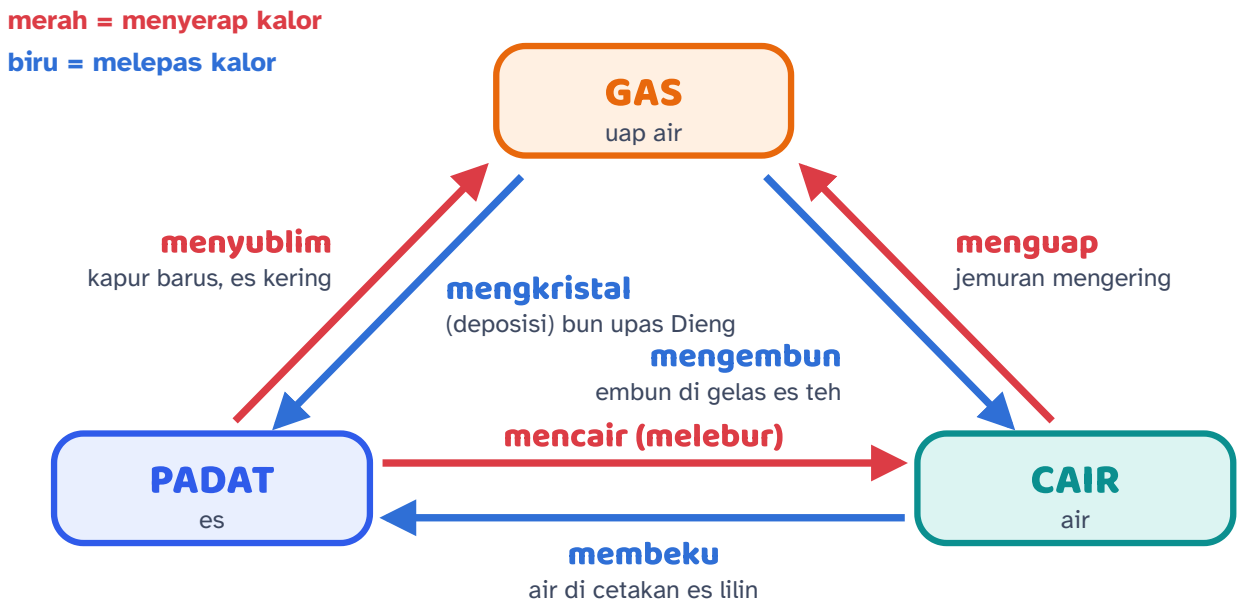
Air H_2O Mr ≈ 18,02 PubChem ↗

Molekul bengkok dengan sudut ±104,5°. Dua pasang elektron bebas pada O membuatnya polar dan mampu berikatan hidrogen.

Putar molekul air (H_2O), karbon dioksida (CO_2, es kering), naftalena ($C_{10}H_8$, kapur barus), dan etanol. Hitung atom C dan H pada naftalena. Bandingkan ukurannya: menurutmu, molekul mana yang bergerak paling lambat pada suhu yang sama?

2.2 Perubahan wujud dan kurva pemanasan

Satu zat bisa tampil dengan tiga wajah. Air muncul sebagai es (padat), air (cair), dan uap air (gas). Perubahan dari satu wujud ke wujud lain disebut **perubahan wujud**. Perubahan ini terjadi bila zat **menyerap** atau **melepas** kalor. Zatnya tetap sama: es, air, dan uap sama-sama tersusun atas molekul H_2O.



Segitiga perubahan wujud. Setiap perubahan punya pasangan kebalikannya.

TRIK KAK TIRTA

Bayangkan rumah tiga lantai: padat di lantai dasar, cair di lantai satu, gas di lantai paling atas. **Naik** tangga (mencair, menguap, menyublim) butuh tenaga, jadi zat **menyerap** kalor. **Turun** tangga (membeku, mengembun, mengkristal) melepaskan tenaga, jadi zat **melepas** kalor. Itu sebabnya keringat yang menguap membuat kulitmu sejuk: penguapannya mengambil kalor dari tubuhmu.

KIMIA NUSANTARA · KAPUR DARI BARUS

Nama **kapur barus** berasal dari Barus, kota pelabuhan kuno di pantai barat Sumatra Utara. Selama berabad-abad, pedagang dari India, Arab, dan Tiongkok datang ke sana untuk membeli kristal harum dari pohon kapur (*Dryobalanops aromatica*). Kristal alami itu juga menyublim! Kapur barus di toko sekarang umumnya buatan pabrik, misalnya **naftalena**, $C_{10}H_8$.

KESELAMATAN · KAPUR BARUS

Naftalena berbahaya bila tertelan dan uapnya tidak baik dihirup terus-menerus. Simpan kapur barus di dalam kantong berlubang, jauh dari jangkauan anak kecil, dan jangan pernah dijilat. Label kemasannya biasanya memuat piktogram berikut.



Padatan mudah menyala



Berbahaya bila tertelan



Bahaya kesehatan jangka panjang



Berbahaya bagi biota air

KIMIA NUSANTARA · BUN UPAS DI DIENG

Pada puncak kemarau (sekitar Juli–Agustus), suhu dini hari di Dataran Tinggi Dieng bisa turun di bawah 0 °C. Uap air di udara langsung berubah menjadi kristal es di daun dan rumput: **mengkristal** (deposisi). Warga menyebutnya *bun upas*, "embun racun", karena kristal es ini bisa merusak tanaman kentang. Wisatawan justru datang untuk melihat rumput yang tampak bersalju.

Suhu yang "macet" saat berubah wujud

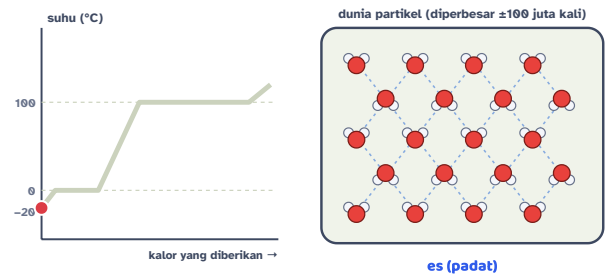
Tebak Dulu!

Semangkuk es batu bersuhu 0 °C dipanaskan di atas kompor dengan api kecil yang tetap. Selama es masih mencair (masih ada es dan air), bagaimana suhunya?

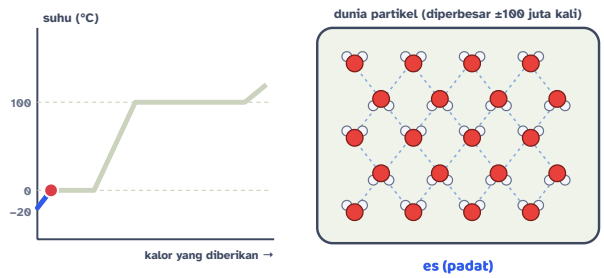
- Naik sedikit demi sedikit karena api terus memberi panas.
- Tetap 0 °C sampai semua es mencair.
- Turun, karena es menyerap panas.
- Langsung melompat ke 100 °C.

Jawabannya: tetap 0 °C. Kalor dari api tidak hilang. Kalor itu dipakai untuk memutus tarikan antarmolekul air di dalam kisi es, bukan untuk mempercepat gerak molekul. Setelah es habis, barulah suhunya naik lagi. Asal es terus diaduk supaya suhunya merata, ya!

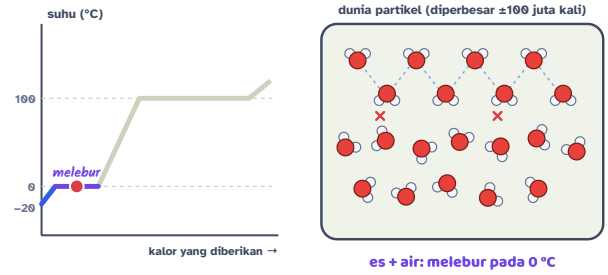
Suhu ketika padatan mencair disebut **titik leleh**; untuk zat murni nilainya sama dengan **titik beku**. Suhu ketika cairan mendidih disebut **titik didih**. Pada tekanan 1 atm, titik leleh es 0 °C dan titik didih air 100 °C. Ikuti apa yang terjadi pada partikel air ketika sebongkah es dipanaskan terus-menerus:



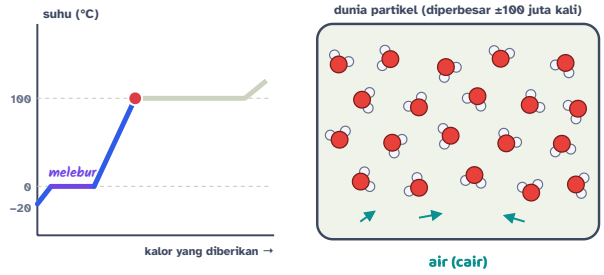
Langkah 1. Es pada −20 °C. Molekul H_2O tersusun teratur dalam kisi yang longgar (garis putus-putus = tarikan antarmolekul) dan hanya **bergetar** di tempat.



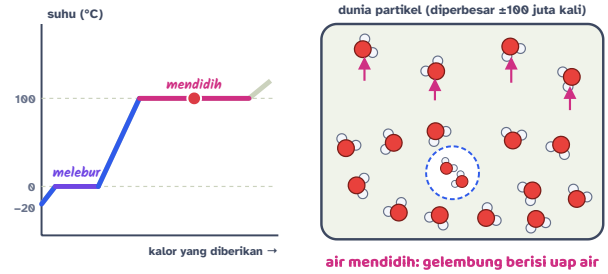
Langkah 2. Es dipanaskan. Getarannya makin kuat, energi kinetik molekul naik, dan **suhu naik** sampai 0 °C.



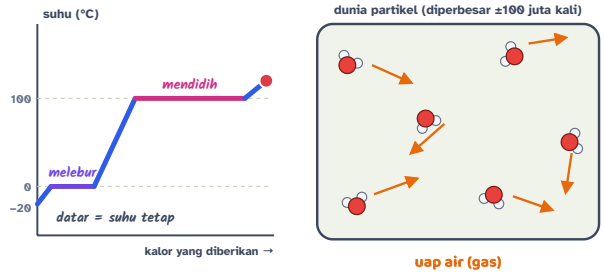
Langkah 3. Pada 0 °C es **melebur**. Kalor dipakai memutus sebagian tarikan sehingga kisi runtuh. Suhu **tetap** 0 °C sampai semua es mencair.



Langkah 4. Air dipanaskan dari 0 °C ke 100 °C. Molekul berdesakan tanpa susunan tetap, saling meluncur, dan bergerak makin cepat: suhu naik lagi.



Langkah 5. Pada 100 °C air **mendidih**. Gelembung uap terbentuk di dalam cairan dan molekul lepas sepenuhnya. Dataran ini panjang: butuh kalor ±6,8 kali kalor lebur!



Langkah 6. Uap air di atas 100 °C: molekul berjauhan dan melesat bebas. Ringkasnya, bagian **naik** mempercepat gerak partikel (suhu naik), bagian **datar** menjauhkan partikel (wujud berubah).

ATURAN · SUHU TETAP SAAT ZAT MURNI BERUBAH WUJUD

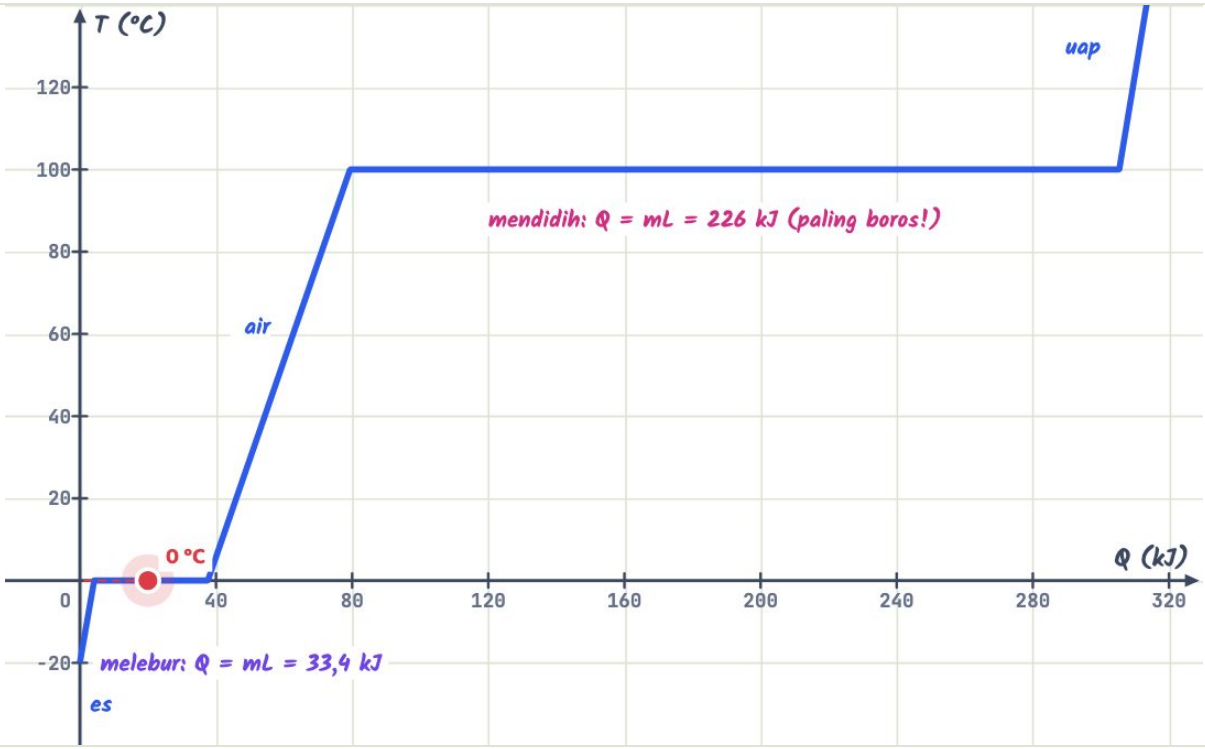
Selama zat murni berubah wujud pada tekanan tetap, suhunya **tidak berubah**. Kalor yang diserap atau dilepas pada saat itu disebut **kalor laten**: **kalor lebur** untuk mencair dan **kalor uap** untuk menguap. Kalor itu dipakai untuk mengubah jarak dan susunan partikel, bukan untuk mempercepat geraknya.

GRAFIK HIDUP **Kurva pemanasan 100 g es: dari −20 °C sampai uap 120 °C**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-2

$$100\ \text{g es}\ (-20\,^\circ\text{C}) \xrightarrow{+Q} \text{uap}\ (120\,^\circ\text{C})$$

$$Q = 20\ \text{kJ} \ \Rightarrow\ T = 0\,^\circ\text{C}$$



Suhu tetap 0 °C: kalor dipakai meruntuhkan kisi es

suhu	wujud	kalor untuk berubah wujud
0 °C	es + air: melebur	15,8 kJ

Tekan ▶ atau seret titik merah. Kurvanya punya dua dataran. Bandingkan panjang dataran mendidih dengan panjang bagian "air dipanaskan dari 0 ke 100 °C". Mana yang menelan kalor lebih banyak?

Ada dua jenis hitungan kalor. Pada bagian yang **naik**, suhu berubah dan kalornya bergantung pada **kalor jenis** (c), yaitu kalor untuk menaikkan suhu 1 g zat sebesar 1 °C. Pada bagian yang **datar**, suhu tetap dan kalornya bergantung pada kalor laten (L).

RUMUS HIDUP

Kalor untuk menaikkan suhu

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Kalor = massa × kalor jenis × kenaikan suhu. Zat dengan kalor jenis besar, seperti air, 'malas' menjadi panas.

- m Massa zat `g`
- c Kalor jenis `J/(g·°C)`
- ΔT Kenaikan suhu `°C`
- Q Kalor `J`

KALOR

78.375

J

ini air

Memanaskan **250** g zat sebanyak **75** °C butuh **78.375** J = **78,375** kJ, setara **±18,732** kkal (kalori makanan).

Satuan Nusantara: ≈ 19 × 1 kkal (kalori makanan) · ≈ 3% dari sepiring nasi goreng (±600 kkal) · ≈ 2% dari 1 kWh token listrik

Cek satuan: g × J/(g·°C) × °C = J ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KALOR-PEMANASAN-ZAT

RUMUS HIDUP

Kalor untuk berubah wujud

$$Q = m \times L$$

Saat berubah wujud suhunya tetap. Kalor yang dibutuhkan = massa × kalor laten.

m Massa zat g | L Kalor laten J/g | Q Kalor J

KALOR

33.400

J

es mencair pada 0 °C

100 g zat dengan L = **334** J/g menyerap **33.400** J = **33,4** kJ tanpa naik suhunya sedikit pun!

Satuan Nusantara: ≈ 8 × 1 kkal (kalori makanan)

Cek satuan: g × J/g = J ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KALOR-LATEN-WUJUD

Zat	Titik leleh (°C)	Titik didih (°C)	Kalor lebur (J/g)	Kalor uap (J/g)
Air, H_2O	0	100	334	2.260
Etanol (alkohol)	−114	78	±107	±840
Naftalena (kapur barus)	80	218	±148	±337
Raksa, Hg	−39	357	±11	±295
Besi, Fe	1.538	2.862	±247	±6.090
Karbon dioksida (es kering)	menyublim pada −78,5		kalor sublimasi ±570	

Semua data di atas diukur pada tekanan 1 atm. Untuk setiap zat, kalor uap jauh lebih besar daripada kalor lebur: saat mencair partikel masih berdekatan, tetapi saat menguap partikel harus dipisahkan sepenuhnya.

TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1761, **Joseph Black**, kimiawan Skotlandia, heran: mengapa salju di musim semi tidak langsung mencair semuanya begitu udara menghangat? Ia mengukur dengan cermat dan menemukan bahwa es menyerap banyak kalor tanpa naik suhunya. Ia menamai kalor itu **kalor laten** (bahasa Latin *latens* = tersembunyi). Prinsip pertukaran kalor saat zat panas dan dingin dicampur dikenal di buku sekolah kita sebagai **Asas Black**.

CONTOH

Melebur es batu

Berapa kalor yang dibutuhkan untuk meleburkan 50 g es bersuhu 0 °C menjadi air 0 °C? (Kalor lebur es = 334 J/g)

1. Suhu tidak berubah (0 °C → 0 °C), jadi yang dipakai adalah rumus kalor laten $Q = mL$.
2. $Q = 50\ \text{g} \times 334\ \text{J/g} = 16.700\ \text{J}$.

$Q = 16.700$ J = 16,7 kJ. Kalor sebanyak itu cukup untuk memanaskan 50 g air dari 0 °C sampai ±80 °C!

KERJAKAN BERSAMA

Mengapa uap lebih galak?

Teka-teki Bab 1: mengapa uap air 100 °C lebih parah melukai kulit daripada air mendidih 100 °C? Bandingkan kalor yang diberikan ke kulit oleh 10 g air 100 °C dan oleh 10 g uap 100 °C, bila keduanya akhirnya menjadi air 37 °C. (c air = 4,18 J/(g·°C); kalor uap = 2.260 J/g)

1. Air 100 °C → 37 °C: $Q = mc\Delta T = 10 \times 4{,}18 \times 63 = 2.633$ J.
2. Uap mula-mula **mengembun** di kulit dan melepas kalor uap: $Q = mL = 10 \times 2.260 = 22.600$ J.
3. Air hasil pengembunan lalu turun dari 100 °C ke 37 °C: 2.633 J lagi. Total $22.600 + 2.633 = 25.233$ J.

Uap melepaskan ±25,2 kJ, hampir 10 kali lebih banyak daripada air mendidih (2,6 kJ). Karena itu, jauhkan wajah dan tangan dari uap panci dan ketel!

COBA SENDIRI

Berapa es untuk segelas es teh?

Kamu menyeduh 200 g teh bersuhu 80 °C dan ingin mendinginkannya menjadi 10 °C hanya dengan es batu bersuhu 0 °C. Berapa gram es yang dibutuhkan? Anggap teh = air (c = 4,18 J/(g·°C)), kalor lebur es 334 J/g, dan tidak ada kalor yang hilang ke gelas atau udara.

1. Kalor yang dilepas teh (80 → 10 °C): $Q = 200 \times 4{,}18 \times 70 = 58.520$ J.
2. Setiap gram es menyerap kalor dua kali: melebur (334 J) lalu air esnya naik dari 0 ke 10 °C ($4{,}18 \times 10 = 41{,}8$ J). Totalnya 375,8 J per gram.
3. Asas Black: kalor dilepas = kalor diserap, jadi $m \times 375{,}8 = 58.520$.
4. $m = 58.520 / 375{,}8 = 155{,}7$ g.

Dibutuhkan ±156 g es, kira-kira 11 es batu kecil. Hasil akhirnya ±356 g es teh 10 °C. Perhatikan: 89% kerja pendinginan dilakukan oleh peleburan es!

ADU CEPAT

Kalor berubah wujud (Q = mL)

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-2

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Q = m × L, lalu bagi 1.000 supaya menjadi kJ. L = 334 J/g untuk melebur, 2.260 J/g untuk menguap.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Menguap tidak sama dengan mendidih. Menguap terjadi di **permukaan** cairan pada suhu berapa pun, misalnya jemuran yang kering pada 30 °C. Mendidih terjadi di **seluruh bagian** cairan, hanya pada titik didih, dengan gelembung uap yang terbentuk dari dalam.

INFO · TITIK DIDIH BERGANTUNG PADA TEKANAN

Air mendidih ketika tekanan uapnya menyamai tekanan udara di atasnya. Di Dieng (±2.000 m) tekanan udara lebih rendah sehingga air mendidih pada ±93 °C, dan di puncak Semeru (3.676 m) sekitar 88 °C. Sebaliknya, di dalam panci presto tekanannya tinggi sehingga air baru mendidih pada ±120 °C.

MITOS

"Awan putih yang keluar dari mulut ketel adalah uap air."

FAKTA

Uap air tidak berwarna dan tidak terlihat. Awan putih itu titik-titik air hasil **pengembunan** uap yang mendingin. Perhatikan celah bening tepat di mulut ketel: di situlah uap air yang sebenarnya.

MITOS

"Air yang menguap lenyap, jadi massanya hilang."

FAKTA

Partikel air hanya pindah ke udara sebagai uap. Di dalam wadah tertutup, massanya tetap. Uap itu kelak mengembun menjadi awan dan turun lagi sebagai hujan.

MITOS

"Gula yang larut dalam teh berarti gula itu mencair."

FAKTA

Melarut berbeda dengan mencair. Gula baru meleleh pada ±186 °C (lalu menjadi karamel). Saat melarut, partikel gula menyebar di antara partikel air pada suhu biasa.

2.3 Difusi dan gerak Brown: bukti partikel tak pernah diam

Ibu memasak rendang di dapur. Beberapa menit kemudian aromanya tercium sampai ruang tamu, padahal tidak ada yang mengipasinya. Partikel aroma dari wajan menyebar dengan sendirinya karena partikel gas selalu bergerak acak dan saling bertumbukan dengan partikel udara.

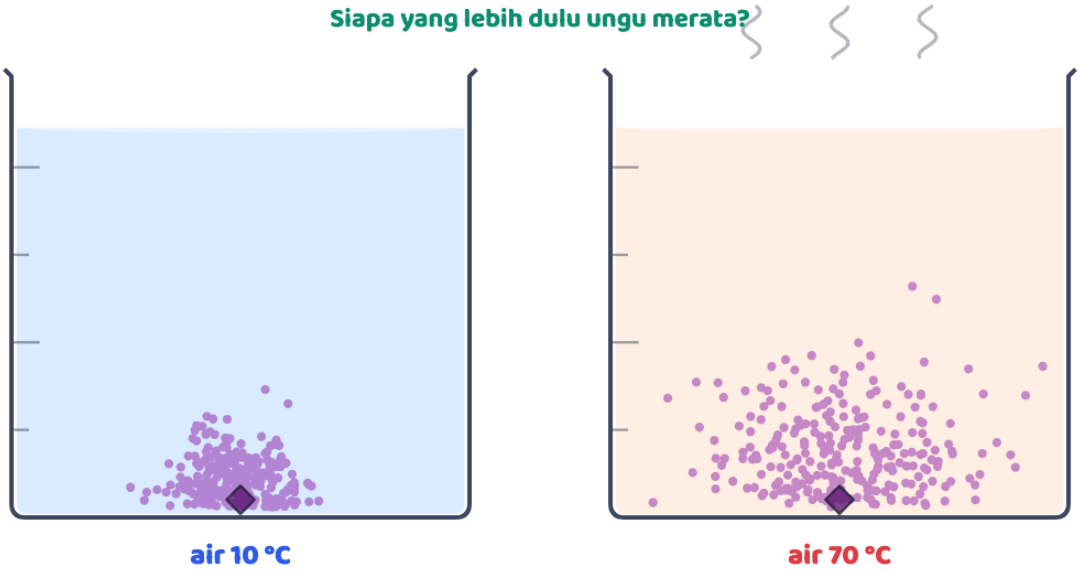
DEFINISI · DIFUSI

Difusi adalah penyebaran partikel suatu zat dari daerah yang **konsentrasinya tinggi** ke daerah yang **konsentrasinya rendah** akibat gerak acak partikel itu sendiri, tanpa diaduk atau ditiup. Difusi berlangsung terus sampai zat tersebar merata.

Di dalam air, difusi lebih lambat karena partikelnya berdesakan. Di laboratorium, guru sering menjatuhkan sebutir kristal ungu **kalium permanganat**, $\mathrm{KMnO_4}$, ke dasar segelas air. Tanpa diaduk, warna ungunya perlahan menjalar ke seluruh gelas. Di dalam padatan, difusi sangat lambat sehingga hampir tidak teramati.

LAB MINI **Lomba Difusi: air dingin vs air panas**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-2



Kiri	Kanan	Laju kanan ÷ laju kiri
10 °C · sebaran 0,8 cm	70 °C · sebaran 1,7 cm	3,9 ×

Waktu
1,2 s

Mode pertama: sebutir kristal pewarna di dasar dua gelas air bersuhu berbeda. Gelas mana yang lebih dulu ungu merata? Atur suhunya sama: apakah hasilnya seri? Mode kedua: intip butir serbuk sari di bawah mikroskop dan perhatikan jejak zig-zagnya. Hitungan laju memakai kekentalan air sungguhan.

Laju difusi dipengaruhi oleh:

- **Suhu**: makin panas, partikel makin cepat sehingga difusi makin cepat. Air panas juga lebih encer.
- **Massa partikel**: pada suhu yang sama, partikel yang lebih ringan bergerak lebih cepat.
- **Wujud mediumnya**: difusi di gas paling cepat, di cairan lebih lambat, di padatan sangat lambat.
- **Selisih konsentrasi**: makin besar selisihnya, makin cepat penyebaran awalnya.

Bagaimana kita tahu bahwa partikel air bergerak, padahal molekulnya terlalu kecil untuk dilihat? Amati butir serbuk sari atau partikel debu yang melayang di air dengan mikroskop: butir itu bergoyang zig-zag tanpa henti. Itulah **gerak Brown**. Butir itu ditabrak molekul air dari segala arah, dan tabrakannya tidak pernah seimbang sempurna.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1827, ahli botani Skotlandia **Robert Brown** mengamati partikel-partikel kecil dari serbuk sari yang terus bergoyang di dalam air. Mula-mula ia mengira gerak itu tanda kehidupan, tetapi butir debu mati pun bergoyang dengan cara yang sama! Pada 1905, **Albert Einstein** menjelaskan gerak itu sebagai akibat tabrakan molekul air, dan **Jean Perrin** membuktikannya dengan percobaan teliti. Banyak ilmuwan baru benar-benar yakin bahwa atom dan molekul itu nyata setelah percobaan Perrin.

LANJUT · IGCSE, IB & OLIMPIADE

HUKUM GRAHAM DAN KELAJUAN MOLEKUL

Pada suhu yang sama, energi kinetik rata-rata semua partikel gas sama besar: $\bar{E}_k = \frac{3}{2}k_B T$. Karena $\frac{1}{2}mv^2$ sama, partikel yang lebih ringan pasti lebih cepat. Dari sini lahir **hukum Graham**:

$$\frac{\text{laju difusi A}}{\text{laju difusi B}} = \sqrt{\frac{M_{r,\mathrm{B}}}{M_{r,\mathrm{A}}}}$$

Percobaan klasik: kapas berisi amonia pekat dan kapas berisi asam klorida pekat dipasang di dua ujung tabung kaca panjang. Kedua gas berdifusi, lalu bertemu dan membentuk cincin putih amonium klorida: $\mathrm{NH_3\,(g) + HCl\,(g) \longrightarrow NH_4Cl\,(s)}$. Cincin itu muncul **lebih dekat ke ujung HCl**, karena $\mathrm{NH_3}$ (Mr 17) lebih ringan dan lebih cepat daripada HCl (Mr 36,5). Percobaan ini hanya dilakukan guru di lemari asam karena kedua larutannya korosif dan uapnya menyesakkan.

RUMUS HIDUP **Kelajuan rata-rata partikel gas**

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3\,R\,T}{M}}$$

Makin panas, makin cepat; makin berat partikelnya, makin lambat.

T Suhu mutlak K

M Massa molar g/mol

v_{rms} Kelajuan rata-rata m/s

KELAJUAN RATA-RATA

515

m/s

molekul N_2 di kamarmu: ±515 m/s

lebih cepat daripada bunyi

Pada **298** K, partikel bermassa molar **28** g/mol melaju **±515** m/s ≈ **1.854,801** km/jam, yaitu **1,502** kali kecepatan bunyi!

Satuan Nusantara: ≈ 1,5 × bunyi di udara · ≈ 5,3 × kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 7% dari satelit orbit rendah

Cek satuan: $\sqrt{(\text{J/(mol·K)} \times \text{K} \div \text{kg/mol})} = \sqrt{(\text{m}^2/\text{s}^2)} = \text{m/s}$ ✔ (M diubah ke kg/mol)

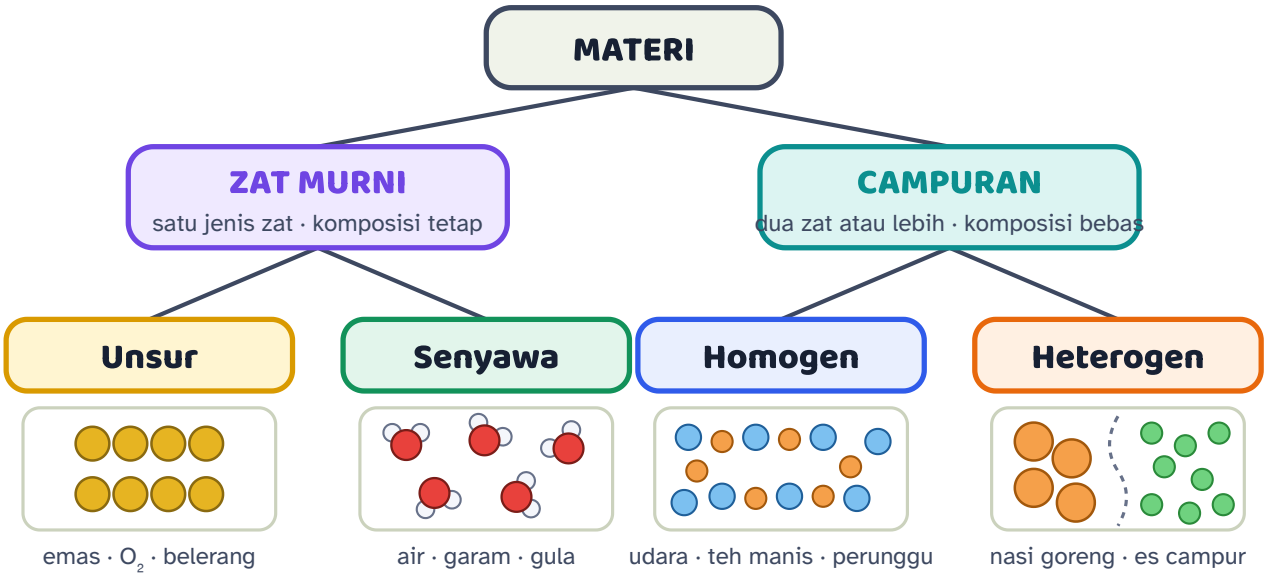
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KELAJUAN-PARTIKEL-GAS

Kalau molekul udara melaju lebih cepat daripada bunyi, mengapa bau rendang butuh beberapa menit untuk sampai ke ruang tamu? Karena setiap molekul aroma bertumbukan miliaran kali per detik dengan molekul udara, sehingga jalurnya zig-zag seperti orang yang berjalan di pasar yang sangat ramai.

2.4 Unsur, senyawa, dan campuran

Kalau semua materi tersusun atas partikel, apakah partikelnya selalu sama? Tentu tidak. Berdasarkan jenis partikelnya, materi dibagi menjadi **zat murni** (unsur dan senyawa) dan **campuran**.

Bahasa sederhana · Bayangkan tiga kotak manik-manik. Kotak pertama berisi manik merah saja: seperti **unsur**. Kotak kedua berisi gantungan kunci yang semuanya dirangkai dari dua manik merah dan satu manik biru: seperti **senyawa**. Kotak ketiga berisi manik merah, manik biru, dan gantungan kunci yang campur aduk: seperti **campuran**.



Pohon materi. Kotak kecil menunjukkan tampilan tingkat partikelnya: atom sejenis (unsur), molekul sejenis yang tersusun atas beberapa jenis atom (senyawa), partikel berbeda yang tercampur merata (homogen) atau berkelompok (heterogen).

DEFINISI · UNSUR, SENYAWA, CAMPURAN

Unsur adalah zat tunggal yang tidak dapat diuraikan lagi menjadi zat lain yang lebih sederhana dengan reaksi kimia biasa. Unsur tersusun atas satu jenis atom saja, misalnya emas (Au), besi (Fe), oksigen (O_2), dan belerang (S). Sampai sekarang dikenal 118 unsur.

Senyawa adalah zat tunggal yang tersusun atas dua jenis atom atau lebih yang **terikat secara kimia** dengan perbandingan tetap, misalnya air (H_2O), garam dapur ($NaCl$), dan gula pasir ($C_{12}H_{22}O_{11}$).

Campuran adalah gabungan dua zat atau lebih yang **tidak terikat secara kimia**, sehingga perbandingannya bebas dan setiap komponen masih membawa sifatnya sendiri. Campuran **homogen** (larutan) tampak seragam di setiap bagian; campuran **heterogen** bagian-bagiannya masih bisa dibedakan.

Ciri	Unsur	Senyawa	Campuran
Tersusun atas	satu jenis atom	dua jenis atom atau lebih yang terikat	dua zat atau lebih yang tidak terikat
Komposisi	tetap	tetap (perbandingan massanya tetap)	bebas
Sifat	sifat unsur itu sendiri	berbeda total dari unsur-unsur penyusunnya	masih menunjukkan sifat komponennya

Cara memisahkan	tidak dapat diuraikan lagi	hanya dengan reaksi kimia	cara fisika: menyaring, menguapkan, menyuling, memakai magnet
Ditulis dengan	lambang: Fe, Au, O_2, S_8	rumus kimia: H_2O, $NaCl$, CO_2	tidak punya satu rumus

Contoh paling dramatis perbedaan sifat senyawa dan unsurnya: natrium (**Na**) adalah logam lunak yang bereaksi hebat bila terkena air, dan klorin (**Cl**) adalah gas kuning kehijauan yang beracun. Namun keduanya bergabung membentuk garam dapur, $2\,Na + Cl_2 \longrightarrow 2\,NaCl$, yang kita taburkan di atas nasi setiap hari.

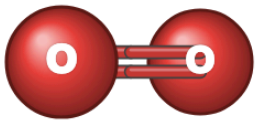
CONTOH **Detektif materi di dapur**

Golongkan zat-zat berikut: (a) kawat tembaga, (b) gula pasir, (c) kopi tubruk, (d) cuka dapur.

1. Kawat tembaga hanya berisi atom **Cu**: **unsur**.
2. Gula pasir berisi satu jenis molekul, $C_{12}H_{22}O_{11}$, dari tiga unsur: **senyawa**.
3. Kopi tubruk: ampas kopi tampak melayang lalu mengendap, tidak merata: **campuran heterogen**.
4. Cuka dapur: asam asetat larut merata di dalam air dan tampak seragam: **campuran homogen** (larutan).

Unsur, senyawa, campuran heterogen, campuran homogen. Kuncinya: tanyakan jenis partikelnya, bukan hanya penampilannya.

MOLEKUL 3D **Unsur atau senyawa? Intip partikelnya**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Oksigen O_2

Mr ≈ 32 PubChem ↗

Molekul diatomik dengan ikatan rangkap dua. Uniknya, O_2 bersifat paramagnetik (tertarik magnet).

Oksigen (O_2) dan ozon (O_3) sama-sama unsur oksigen. Intan dan grafit sama-sama karbon murni, hanya susunannya berbeda. Bandingkan dengan air, garam dapur, dan gula: berapa jenis atom yang kamu temukan di masing-masing?

LAB MINI **Pemilah Materi: ke kotak mana aku?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-2



Seret kartu ke kotak yang tepat, atau ketuk kotaknya. Nyalakan Intip partikel bila butuh bantuan.

Benar pada percobaan pertama	Kartu tersisa
0	16

Seret setiap kartu ke kotak yang tepat, atau ketuk kotaknya. Bingung? Nyalakan **Intip partikel** untuk melihat isi kartu di tingkat partikel. Skor dihitung dari jawaban yang benar pada percobaan pertama.

TRIK KAK TIRTA

Hitung huruf kapital yang **berbeda** dalam rumusnya. Satu jenis huruf kapital (Fe, O_2, S_8) berarti **unsur**. Dua jenis atau lebih (H_2O, $NaCl$, $C_{12}H_{22}O_{11}$) berarti **senyawa**. Kalau zat itu tidak bisa ditulis dengan satu rumus saja (udara, sambal, bensin), itu **campuran**.

AWAS JEBAKAN

Molekul tidak selalu senyawa. O_2, N_2, dan S_8 adalah molekul, tetapi tetap unsur karena atomnya sejenis. Sebaliknya, "air mineral" bukan zat murni: ia campuran homogen air dengan sedikit mineral terlarut. Yang termasuk senyawa murni adalah air suling (akuades).

Unsur mana yang berwujud cair pada suhu kamar? Hanya dua: raksa (**Hg**) dan bromin (**Br**). Namun pada hari yang panas di Jakarta, galium (**Ga**, titik leleh 29,8 °C) dan sesium (**Cs**, 28,5 °C) pun ikut mencair. Galium bahkan bisa meleleh di genggaman tangan!

TABEL PERIODIK HIDUP **Unsur pada suhu tertentu: padat, cair, atau gas?**

Warnai menurut Wujud pada suhu tertentu

Suhu: 300 K (27 °C)



padat cair gas data tidak ada

Geser suhu ke 310 K (37 °C, suhu tubuhmu): unsur mana yang berubah menjadi cair? Turunkan ke 200 K: gas apa saja yang masih bertahan? Naikkan sampai 6.000 K (setara permukaan Matahari): adakah unsur yang masih padat?

KIMIA NUSANTARA · UNSUR BEBAS DAN BIJIH

Indonesia kaya bahan tambang, tetapi unsur jarang ditemukan dalam keadaan bebas. Belerang di Kawah Ijen dan butiran emas termasuk sedikit unsur yang dapat ditemukan murni di alam. Timah Bangka ditambang sebagai senyawa kasiterit, SnO_2; aluminium berasal dari bauksit Kalimantan Barat yang berisi Al_2O_3; nikel Sulawesi berasal dari bijih laterit. Pabrik pengolahan (smelter) bertugas mengubah senyawa-senyawa itu menjadi logam murni, Sn, Al, dan Ni.

2.5 Perubahan fisika dan perubahan kimia

Setiap zat punya **sifat fisika**, yaitu sifat yang bisa diamati tanpa mengubah zatnya: warna, bau, wujud, titik leleh, titik didih, massa jenis, kelarutan, dan daya hantar listrik. Zat juga punya **sifat kimia**, yaitu kemampuannya berubah menjadi zat lain: mudah terbakar, mudah berkarat, bereaksi dengan asam, atau mudah membusuk.

DEFINISI · PERUBAHAN FISIKA DAN PERUBAHAN KIMIA

Perubahan fisika adalah perubahan yang **tidak menghasilkan zat baru**: hanya wujud, bentuk, ukuran, atau sebaran partikelnya yang berubah. Contohnya es mencair, gula larut, dan kayu dipotong. **Perubahan kimia** (reaksi kimia) adalah perubahan yang **menghasilkan zat baru** dengan sifat berbeda, karena atom-atom berganti pasangan. Contohnya kayu terbakar, besi berkarat, dan singkong menjadi tapai.

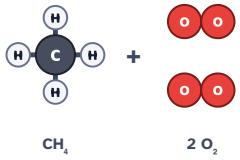
Tebak Dulu!

Sebatang lilin menyala di atas meja. Perubahan apa yang sedang terjadi?

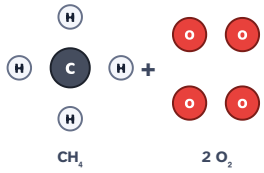
- Hanya perubahan fisika, karena lilinnya cuma meleleh.
- Hanya perubahan kimia, karena lilinnya terbakar.
- Keduanya: lilin meleleh (fisika) dan uap lilin terbakar (kimia).
- Tidak ada perubahan, karena lilin tetaplah lilin.

Jawabannya: keduanya. Panas nyala melelehkan lilin (fisika). Cairan lilin naik melalui sumbu dan menguap (fisika), lalu uapnya bereaksi dengan oksigen menghasilkan karbon dioksida, uap air, kalor, dan cahaya (kimia). Itulah sebabnya lilin makin pendek: sebagian besar lilin "pindah" ke udara sebagai gas.

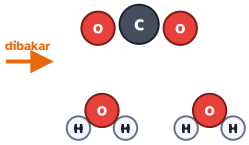
Apa bedanya di tingkat partikel? Saat air mendidih, molekul $\mathrm{H_2O}$ tetap utuh; hanya jaraknya yang berubah. Saat gas metana terbakar di kompor biogas, molekul-molekulnya dibongkar lalu dirakit menjadi molekul baru:



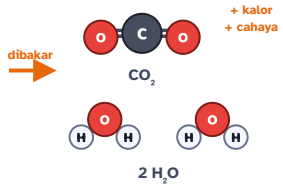
Langkah 1. Sebelum: satu molekul metana, CH_4 (isi gas biogas dan gas alam), dan dua molekul oksigen, O_2.



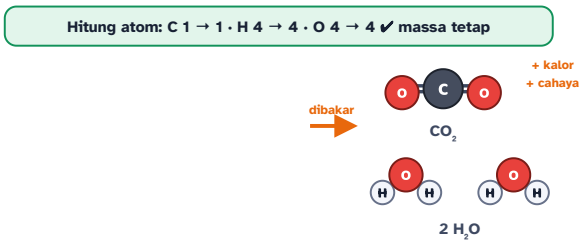
Langkah 2. Saat dinyalakan, ikatan-ikatan lama **putus**. Atom-atomnya sendiri tidak rusak dan tidak hilang.



Langkah 3. Atom-atom **berganti pasangan**: atom C bergandengan dengan dua atom O, sedangkan setiap atom O lainnya menggandeng dua atom H.



Langkah 4. Ikatan baru terbentuk. Lahirlah zat baru, CO_2 dan H_2O, sambil melepaskan kalor dan cahaya. Inilah **perubahan kimia**: $CH_4 + 2\,O_2 \qquad CO_2 + 2\,H_2O$.



Langkah 5. Hitung atomnya: C 1 = 1, H 4 = 4, O 4 = 4. Jenis dan jumlah atom tetap, jadi massa total tetap. Inilah **hukum kekekalan massa**.

Kita tidak bisa melihat atom berganti pasangan. Untungnya, perubahan kimia biasanya meninggalkan **tanda-tanda** yang bisa diamati:

Tanda	Contoh di sekitarmu	Yang terjadi
Terbentuk gas	cuka dicampur soda kue berbuih	$NaHCO_3 + CH_3COOH \longrightarrow CH_3COONa + H_2O + CO_2\uparrow$
Terbentuk endapan	napas ditiupkan ke air kapur menjadi keruh	$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O$
Perubahan warna	irisan apel atau terung menjadi cokelat; paku berkarat	zat dalam buah bereaksi dengan oksigen udara; besi menjadi karat

🌡️ Perubahan suhu	kapur tohor (gamping) disiram air menjadi panas	$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$ melepas kalor
🔥 Cahaya dan nyala	gas LPG terbakar di kompor	$C_3H_8 + 5\,O_2 \longrightarrow 3\,CO_2 + 4\,H_2O$
👃 Bau baru	singkong menjadi tapai; nasi menjadi basi	ragi mengubah gula: $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\,C_2H_5OH + 2\,CO_2$

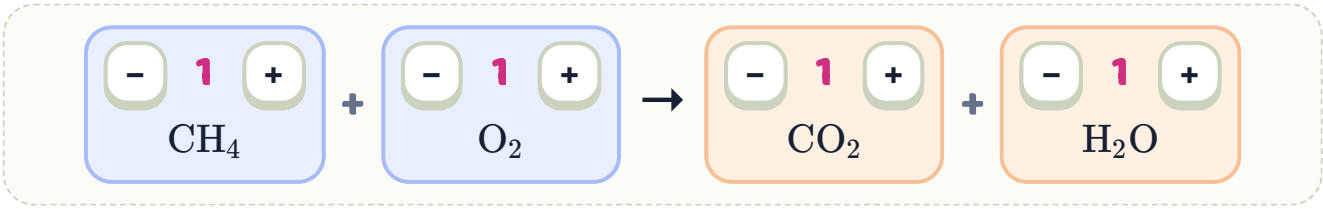
⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Tanda-tanda itu petunjuk, bukan bukti mutlak. Air mendidih juga bergelembung, dan sirup yang diencerkan juga berubah warna, padahal keduanya perubahan fisika. Bukti yang pasti hanya satu: **terbentuk zat baru** dengan sifat yang berbeda.

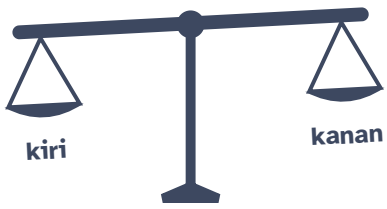
🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada abad ke-18, kimiawan Prancis **Antoine Lavoisier** menimbang zat sebelum dan sesudah bereaksi di dalam wadah tertutup. Hasilnya selalu sama: massa total tidak berubah. Ia merumuskan **hukum kekekalan massa** dan pada 1789 menyusun salah satu daftar unsur modern pertama. Uniknya, daftar itu masih memasukkan cahaya dan "kalorik" (zat panas) sebagai unsur. Kini kita tahu keduanya energi, bukan materi.

⚖️ PENYETARA REAKSI **Atom tidak hilang, hanya berganti pasangan**



Unsur	Kiri	Kanan	
C	1 ●	1 ●	✓
H	4 ○○○○	2 ○○	✗
O	2 ●●	3 ●●●	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya

koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ | Persamaan 1 dari 4 | null

Tekan – dan + untuk mengubah jumlah setiap molekul sampai jumlah atom di kiri dan kanan sama (timbangan seimbang). Reaksinya: biogas terbakar, LPG terbakar, fermentasi tapai, dan besi berkarat. Cara resmi menyetarakan reaksi akan kamu pelajari di Bab 16; sekarang cukup bermain-main dulu!

2.6 Lanjut: diagram fasa, titik tripel, dan fluida superkritis

Bahasa sederhana · Bagian ini untuk penjelajah yang berani. Intinya sederhana: wujud air tidak hanya bergantung pada suhu, tetapi juga pada tekanan. Di puncak gunung, air sudah mendidih sebelum 100 °C!

Wujud zat ditentukan oleh **suhu dan tekanan** sekaligus. Peta yang menunjukkan wujud yang stabil pada setiap pasangan suhu–tekanan disebut **diagram fasa**. Di setiap titik pada garis batas, dua wujud dapat hidup berdampingan.

DEFINISI · TITIK TRIPEL DAN TITIK KRITIS

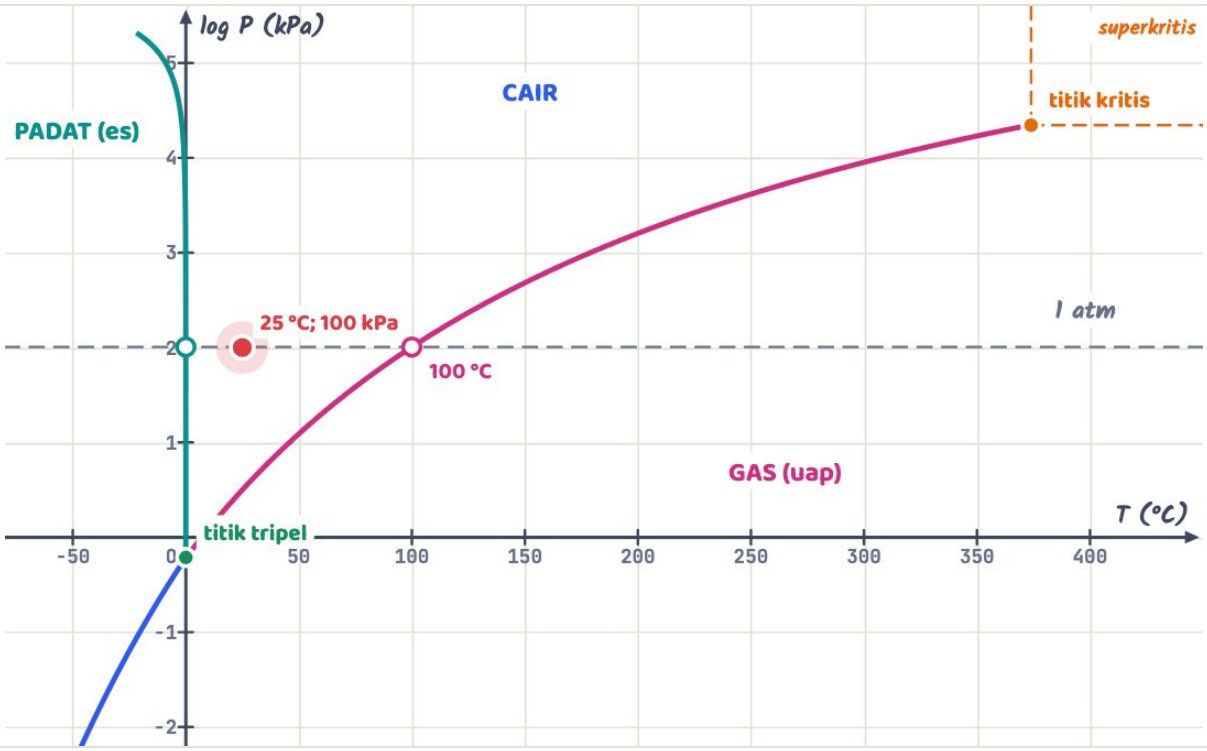
Titik tripel adalah satu-satunya pasangan suhu dan tekanan ketika wujud padat, cair, dan gas suatu zat berada dalam kesetimbangan. Untuk air: 0,01 °C dan 0,611 kPa. **Titik kritis** adalah ujung garis cair–gas. Di atasnya, cairan dan gas tidak dapat dibedakan lagi dan zat menjadi **fluida superkritis**. Untuk air: 374 °C dan 22,1 MPa (±218 atm).

GRAFIK HIDUP **Diagram fasa air: seret titik merah ke mana saja**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-2

$$\text{wujud} = f(T,\ P)$$

$$T = 25\,^{\circ}\text{C}, \quad P = 100\ \text{kPa}$$



±1 atm: tekanan udara di tepi pantai

suhu	tekanan	setara	wujud air
25 °C	100 kPa	0,987 atm	cair

Sumbu tegak memakai skala logaritma: naik 1 berarti tekanan ×10. Seret titik merah menyusuri garis 1 atm dari kiri ke kanan: es → air → uap. Lalu turunkan tekanan ke ±0,5 kPa dan geser suhunya: adakah wujud cair? Garis hijau toska (leleh) sedikit condong ke kiri. Mengapa?

Data	Air, H_2O	Karbon dioksida, CO_2
Titik tripel	0,01 °C; 0,611 kPa (0,006 atm)	–56,6 °C; 518 kPa (5,1 atm)
Titik kritis	374 °C; 22,1 MPa	31,0 °C; 7,38 MPa
Bila padatannya dipanaskan pada 1 atm	mencair pada 0 °C, mendidih pada 100 °C	langsung menyublim pada –78,5 °C

Kemiringan garis leleh	condong ke kiri (es kurang rapat daripada air)	condong ke kanan (seperti kebanyakan zat)

Tabel itu menjawab misteri es kering. Tekanan titik tripel CO_2 adalah 5,1 atm. Pada tekanan udara biasa (1 atm), wujud cair CO_2 tidak pernah stabil, sehingga padatannya langsung menyublim. CO_2 cair baru bisa ada di dalam tabung bertekanan tinggi, misalnya tabung pemadam api jenis CO_2.

Fluida superkritis bersifat unik: dapat menembus pori seperti gas, tetapi melarutkan zat seperti cairan. Sejak tahun 1970-an, CO_2 superkritis (di atas 31 °C dan 73,8 bar) dipakai untuk melarutkan kafein dari biji kopi mentah. Hasilnya kopi **dekafeinasi** tanpa sisa pelarut berbahaya: begitu tekanan diturunkan, CO_2 kembali menjadi gas dan lepas sendiri. Cara serupa dipakai untuk mengekstrak minyak atsiri dan zat aktif dari rempah.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERSAMAAN CLAPEYRON: MEMBACA KEMIRINGAN GARIS

Kemiringan setiap garis batas pada diagram fasa mengikuti **persamaan Clapeyron**:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_m}{T\,\Delta V_m}$$

Saat es melebur, $\Delta H_m = +6{,}01$ kJ/mol tetapi volumenya **berkurang**: $\Delta V_m = \frac{18{,}0}{1{,}000} - \frac{18{,}0}{0{,}917} = -1{,}63\ \mathrm{cm^3/mol}$. Akibatnya $dP/dT \approx -1{,}35 \times 10^7$ Pa/K (±−133 atm/K). Garis lelehnya condong ke kiri, tetapi sangat curam: tekanan 100 atm hanya menurunkan titik leleh es sekitar 0,7 °C. Licinnya es di gelanggang seluncur ternyata lebih banyak disebabkan lapisan air tipis di permukaan es dan panas gesekan daripada tekanan sepatu.

Untuk garis cair–gas, volume gas jauh lebih besar dan gas dianggap ideal, sehingga persamaan Clapeyron menjadi **persamaan Clausius–Clapeyron**:

$$\ln\frac{P_2}{P_1} = -\frac{\Delta H_{\mathrm{uap}}}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Dengan $\Delta H_{\mathrm{uap}} = 40{,}7$ kJ/mol, air yang mendidih pada 100 °C di bawah tekanan 101,3 kPa akan mendidih pada ±88 °C bila tekanannya ±65 kPa, seperti di puncak Semeru.

⚠️ **KESELAMATAN · ES KERING**

Es kering bersuhu −78,5 °C dan dapat melukai kulit seperti luka bakar. Pegang hanya dengan sarung tangan tebal atau penjepit, jangan pernah dimasukkan ke mulut, dan jangan disimpan dalam botol atau wadah yang tertutup rapat: gas CO_2 yang menyublim dapat membuat wadah itu meledak. Gunakan di ruangan yang berventilasi baik.

Kimia di sekitarmu



Garam Madura

Petambak di Madura mengalirkan air laut ke petak-petak tambak. Panas matahari dan angin menguapkan airnya, lalu garam tertinggal sebagai kristal.



Kendi tanah liat

Air merembes ke pori kendi lalu menguap di permukaannya. Penguapan menyerap kalor, sehingga air di dalam kendi tetap sejuk tanpa lemari es.



Bandeng presto

Di dalam panci presto, air baru mendidih pada ±120 °C karena tekanannya tinggi. Duri bandeng khas Semarang pun menjadi lunak.



Es puter

Pedagang es puter menaburkan garam ke es di sekeliling tabung adonan. Campuran es dan garam jauh lebih dingin daripada 0 °C, cukup untuk membekukan adonan santan.



Kaca angkot berembun

Saat hujan, kaca bagian dalam angkot berkabut. Uap air dari napas penumpang mengembun di permukaan kaca yang dingin.



Tapai singkong

Ragi mengubah gula dalam singkong menjadi alkohol dan karbon dioksida. Rasa, aroma, dan teksturnya berubah: tanda perubahan kimia.

Cek Cepat

Perubahan wujud manakah yang melepas kalor?

- Mencair
- Menguap
- Mengembun
- Menyublim

Manakah yang termasuk senyawa?

- Air suling
- Udara bersih
- Emas 24 karat
- Air laut

Selama es mencair pada 0 °C, kalor yang diserap dipakai untuk ...

- menaikkan suhu es
- membuat partikel air membesar
- mempercepat gerak partikel sehingga suhu naik
- mengatasi gaya tarik antarpartikel sehingga kisinya runtuh

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: lacak suhu es batu yang dipanaskan

Bahan: ±200 g es batu yang dihancurkan, panci kecil, kompor, termometer dapur digital berujung tusuk, sendok kayu, stopwatch HP, kertas berpetak.

1. Bersama orang dewasa, masukkan es hancur ke dalam panci. Tusukkan ujung termometer ke tengah es, jangan sampai menyentuh dasar panci.
2. Catat suhu awal, lalu nyalakan kompor dengan api kecil. Jangan ubah besar apinya sampai selesai.
3. Aduk pelan dan catat suhu setiap 30 detik sampai air mendidih selama ±3 menit. Tulis juga kapan es terakhir mencair dan kapan gelembung besar mulai muncul.
4. Matikan kompor. Buat grafik suhu terhadap waktu, lalu bandingkan dengan Grafik Hidup di subbab 2.2.

Keselamatan: kompor dan air mendidih hanya dipakai bersama orang dewasa. Pegang panci dengan lap atau pegangannya, dan jauhkan wajah serta tangan dari uap (ingat contoh "uap lebih galak"!). Jangan memakai termometer kaca berisi raksa. Pastikan kompor sudah mati setelah selesai. **Alternatif tanpa kompor:** teteskan pewarna makanan ke segelas air es dan segelas air hangat dari termos (bukan air mendidih), tanpa diaduk, lalu bandingkan kecepatan menyebarnya.

Pertanyaan: Pada suhu berapa grafikmu mendatar? Mengapa dataran kedua bisa sedikit di bawah 100 °C? (Petunjuk: ketelitian termometer dan ketinggian tempat tinggalmu.)

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 2 dalam 3 menit

☑ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan wujud **padat, cair, dan gas** dengan teori partikel: susunan, jarak, dan gerak partikelnya
- menamai enam **perubahan wujud**, membaca **kurva pemanasan**, dan menghitung kalor dengan $Q = mc\Delta T$ dan $Q = mL$
- menjelaskan **difusi** dan **gerak Brown** sebagai bukti bahwa partikel selalu bergerak
- menggolongkan materi menjadi **unsur, senyawa, campuran homogen, dan campuran heterogen**
- membedakan **perubahan fisika** dan **perubahan kimia** dari tanda-tandanya, lalu (Lanjut) membaca **diagram fasa**

🔑 Istilah kunci

materi · Materi · padat · cair · gas · perubahan wujud · naftalena · titik leleh · titik beku · titik didih · kalor laten · kalor lebur · kalor uap · kalor jenis · Difusi · gerak Brown

🧮 Rumus penting

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Kalor untuk menaikkan suhu. Kalor = massa × kalor jenis × kenaikan suhu. Zat dengan kalor jenis besar, seperti air, 'malas' menjadi panas.

$$Q = m \times L$$

Kalor untuk berubah wujud. Saat berubah wujud suhunya tetap. Kalor yang dibutuhkan = massa × kalor laten.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3\,R\,T}{M}}$$

Kelajuan rata-rata partikel gas. Makin panas, makin cepat; makin berat partikelnya, makin lambat.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Sifat zat bukan sifat satu partikelnya.
- Naftalena berbahaya bila tertelan dan uapnya tidak baik dihirup terus-menerus.
- Menguap tidak sama dengan mendidih.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=2

🧩 Teka-teki untuk Bab 3

Air laut adalah campuran. Bagaimana caranya petambak Madura "mengambil" garamnya, dan bisakah kita juga mengambil air tawarnya? Pikirkan perubahan wujud yang sudah kamu pelajari di bab ini.

▼ **Intip petunjuk**

Garam diambil dengan **menguapkan** airnya: garam tidak ikut menguap, jadi tertinggal sebagai kristal. Untuk mendapatkan air tawarnya, uap air harus ditangkap lalu **diembunkan** kembali: itulah **distilasi** (penyulingan). Di Bab 3 kamu akan belajar memisahkan campuran dengan memanfaatkan perbedaan sifat fisika komponennya.

BAB 3 · DUNIA KIMIA

03 Campuran & Teknik Pemisahan: Seni Memilah Materi

Garam di dapurmu dulu bersembunyi di air laut, dan bensin di tangki motor dulu bercampur dengan aspal di perut bumi. Bab ini membongkar trik para kimiawan memisahkan zat yang sudah bercampur: cari perbedaan sifatnya, lalu manfaatkan!

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan bahwa setiap teknik pemisahan memanfaatkan **perbedaan sifat fisika** komponen campuran (ukuran partikel, kelarutan, titik didih, sifat magnet, massa jenis);
- memilih dan menyusun urutan teknik pemisahan (**penyaringan, dekantasi, sentrifugasi, magnet, penguapan, kristalisasi**) untuk campuran sehari-hari;
- menjelaskan **distilasi sederhana, bertingkat, dan distilasi uap**, serta membaca dataran suhu pada kurva distilasi;
- melakukan **kromatografi kertas** dan menghitung nilai R_f untuk mengenali zat warna, termasuk pewarna terlarang;
- memakai **corong pisah, ekstraksi, dan sublimasi**, serta menguji kemurnian zat dari titik leleh dan titik didihnya.

TRAGEDI TIGA SERBUK

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Segelas air garam disaring dengan kertas saring paling halus di laboratorium. Apa yang keluar dari bawah corong?

- Air tawar, karena garamnya tertahan di kertas saring.
- Air yang sedikit kurang asin, karena sebagian garam tertahan.
- Air garam yang sama asinnya seperti sebelum disaring.
- Tidak ada yang keluar, karena kertas saring tersumbat garam.

Jawabannya: air garam yang sama asinnya. Garam yang larut sudah terurai menjadi ion Na^{+} dan Cl^{-} yang ukurannya hanya sekitar 0,2 nm. Pori kertas saring berukuran sekitar 10 mikrometer, kira-kira 50.000 kali lebih besar. Ion-ion itu lolos semudah kelereng melewati gawang sepak bola. Penyaringan hanya bisa menahan zat padat yang *tidak larut*.

3.1 Prinsip pemisahan: cari perbedaannya!

Coba lihat sekelilingmu. Udara, air laut, tanah, santan, kopi, darah, minyak bumi, bahkan es teh manis: semuanya **campuran**. Zat yang benar-benar murni justru jarang kita temui. Itulah sebabnya teknik pemisahan menjadi

keterampilan pertama seorang kimiawan, sebelum ia bisa meneliti apa pun.

DEFINISI · CAMPURAN

Campuran adalah gabungan dua zat atau lebih yang tidak bereaksi satu sama lain. Setiap komponen tetap memiliki sifatnya sendiri, dan perbandingan komponennya boleh berubah-ubah. **Campuran homogen** (larutan) tampak serba sama di setiap bagian, misalnya air garam dan udara. **Campuran heterogen** memperlihatkan bagian-bagian yang berbeda, misalnya pasir dalam air, santan, dan nasi goreng.

Bahasa sederhana · Pernahkah kamu melihat nenek menampi beras di atas tampah? Beras dilempar-lempar ke udara. Sekam yang ringan terbang terbawa angin, sedangkan butir beras yang berat jatuh kembali ke tampah. Nenek sedang memisahkan campuran! Ia tidak memakai zat kimia apa pun. Ia hanya memanfaatkan satu perbedaan: sekam lebih ringan daripada beras. Semua teknik pemisahan di bab ini bekerja dengan cara yang sama.

Karena komponen campuran tidak terikat secara kimia, kita dapat memisahkannya dengan **cara fisika**: tanpa reaksi, hanya dengan memanfaatkan perbedaan sifat. Butir pasir lebih besar daripada molekul air. Air mendidih pada 100 °C, sedangkan garam baru mendidih pada 1.465 °C. Besi ditarik magnet, pasir tidak. Setiap perbedaan adalah "pintu keluar" bagi satu komponen.

PRINSIP EMAS PEMISAHAN

Setiap teknik pemisahan memanfaatkan **perbedaan satu sifat fisika** antarkomponen campuran. Untuk memilih teknik, tanyakan: *sifat apa yang membuat komponen A berbeda dari komponen B?* Jawabannya langsung menunjuk ke tekniknya.

Perbedaan sifat	Teknik pemisahan	Contoh di Indonesia
Ukuran partikel (padatan tak larut vs cairan)	penyaringan (filtrasi), pengayakan	memeras santan dengan saringan, mengayak pasir bangunan
Massa jenis	dekantasi, sentrifugasi, corong pisah, menampi	kopi tubruk, menampi beras, memisahkan plasma darah
Sifat magnet	pemisahan dengan magnet	pasir besi pantai selatan Jawa, daur ulang kaleng
Kelarutan dalam pelarut tertentu	pelarutan + penyaringan, ekstraksi	menyeduh teh, membuat jamu kunyit, dekafeinasi kopi
Titik didih (kemudahan menguap)	penguapan, distilasi sederhana & bertingkat	garam tambak, minyak nilam, kilang minyak
Kemampuan menyublim	sublimasi	kapur barus, iodin

Tarikan ke fase diam vs kelarutan dalam fase gerak	kromatografi	uji pewarna jajanan oleh BPOM

AWAS JEBAKAN

Senyawa tidak dapat dipisahkan dengan cara fisika. Campuran serbuk **besi** dan belerang (**S**) masih bisa dipisahkan dengan magnet. Namun, setelah dipanaskan, keduanya bereaksi menjadi senyawa besi(II) sulfida, $\mathrm{Fe} + \mathrm{S} \longrightarrow \mathrm{FeS}$, serbuk hitam yang tidak lagi tertarik magnet seperti serbuk besi. Untuk mengambil kembali besinya diperlukan *reaksi kimia*, bukan magnet.

CONTOH **Pilih tekniknya!**

Teknik apa yang paling tepat untuk memisahkan: (a) ampas dari kopi tubruk, (b) garam dari air laut, (c) minyak goreng bekas dari air cucian, (d) serbuk besi yang tercampur tepung?

1. (a) Ampas kopi tidak larut dan lebih berat daripada air, jadi mengendap. Tuang airnya pelan-pelan: **dekantasi** (atau saring).
2. (b) Garam larut sempurna dan titik didihnya jauh lebih tinggi daripada air: **penguapan**.
3. (c) Minyak dan air tidak bercampur dan massa jenisnya berbeda: **corong pisah**.
4. (d) Hanya besi yang ditarik magnet: **magnet**.

Dekantasi, penguapan, corong pisah, dan magnet. Perhatikan: setiap jawaban berawal dari satu perbedaan sifat.

3.2 Menyaring, menuang, memutar, dan menarik

Penyaringan (filtrasi) memisahkan zat padat yang *tidak larut* dari cairan. Campuran dituang ke kertas saring di dalam corong. Cairan dan semua yang terlarut di dalamnya lolos lewat pori kertas, sedangkan butir padat yang lebih besar dari pori tertahan.

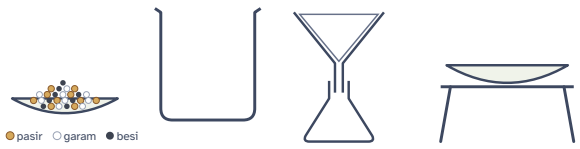
DEFINISI · RESIDU DAN FILTRAT

Residu adalah zat padat yang tertinggal di kertas saring. **Filtrat** adalah cairan jernih yang lolos melewati kertas saring. Pada penyaringan air kopi, ampasnya residu dan air kopinya filtrat.

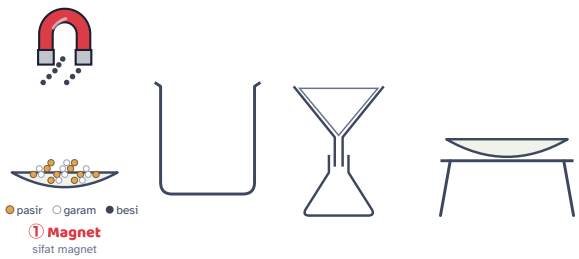
Dekantasi adalah cara yang lebih sederhana: campuran didiamkan sampai padatannya mengendap, lalu cairan di atasnya dituang perlahan. Orang tua kita dulu mengendapkan air sungai yang keruh di gentong semalaman, lalu menciduk bagian atasnya. Unit pengolahan air minum (PDAM) melakukan hal yang sama dalam bak pengendap raksasa.

Kalau partikelnya terlalu halus atau terlalu lama mengendap, campuran diputar sangat cepat dalam alat **sentrifugasi** (sentrifus). Putaran ribuan kali per menit membuat partikel yang lebih rapat terlempar ke dasar tabung dalam hitungan menit. Laboratorium klinik memisahkan darah menjadi plasma (kekuningan, di atas) dan sel darah (merah, di bawah) dengan cara ini.

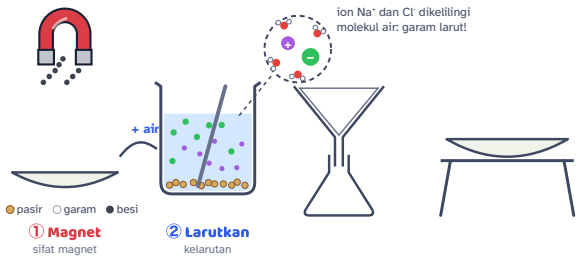
Pemisahan dengan magnet hanya bekerja bila salah satu komponen bersifat magnetis, misalnya **besi**, nikel, kobalt, dan beberapa oksida besi. Pasir hitam di pantai selatan Jawa kaya akan magnetit, $\mathrm{Fe_3O_4}$, yang dipisahkan dari pasir biasa dengan magnet besar sebelum diolah menjadi bijih besi.



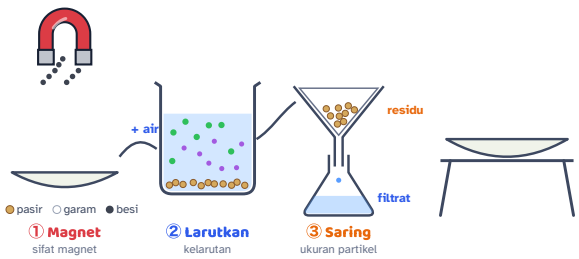
Langkah 1. Campuran 30,0 g berisi 5,0 g serbuk besi, 15,0 g pasir, dan 10,0 g garam. Ketiganya hanya bercampur, tidak bereaksi, jadi sifat masing-masing masih utuh.



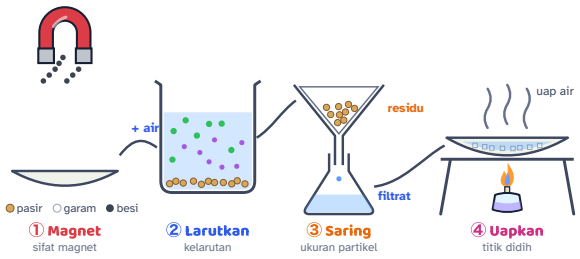
Langkah 2. Magnet didekatkan. Hanya serbuk besi yang tertarik. Tip: bungkus magnet dengan plastik supaya serbuk besi mudah dilepas.



Langkah 3. Pasir dan garam dimasukkan ke air lalu diaduk. Garam **larut**: kisinya terurai menjadi ion $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$ yang dikelilingi molekul air. Pasir tidak larut.



Langkah 4. Campuran **disaring**. Butir pasir terlalu besar untuk melewati pori kertas saring sehingga tertinggal sebagai **residu**. Ion-ion garam yang sangat kecil lolos bersama air sebagai **filtrat**.



Langkah 5. Filtrat **diuapkan** di cawan porselen. Air (titik didih 100 °C) menguap, sedangkan garam (titik didih 1.465 °C) tertinggal sebagai kristal. Pasir di kertas saring dibilas sedikit air lalu dikeringkan.



Langkah 6. Hasil akhirnya: besi 4,9 g, pasir 14,8 g, dan garam 9,6 g. Totalnya 29,3 g dari 30,0 g. Sebagian kecil butir selalu tertinggal di kertas saring, cawan, dan sendok. Karena itu kimiawan menghitung **persen perolehan**.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Urutan langkah pemisahan menentukan hasil. Kalau campuran pasir–garam–besi langsung dicampur air, serbuk besi menjadi basah, mudah berkarat, dan lengket dengan pasir. Kalau filtrat diuapkan sebelum disaring, pasir ikut tercampur dengan garam lagi. Ambil komponen yang paling mudah dan paling khas dulu (besi dengan magnet, selagi kering).

✏️ **TRIK KAK TIRTA · TIGA PERTANYAAN SAKTI**

Sebelum memilih alat, tanyakan tiga hal secara berurutan. **(1)** Adakah yang ditarik magnet? Tarik dulu. **(2)** Adakah yang larut dalam air (atau pelarut lain) dan adakah yang tidak? Larutkan, lalu saring. **(3)** Bagaimana memisahkan cairan dari zat yang larut di dalamnya? Kalau hanya butuh padatannya, uapkan. Kalau butuh cairannya juga, distilasi. Kalau cairannya tidak bercampur, pakai corong pisah.

Seberapa cermat pemisahanmu? Bandingkan massa yang berhasil diperoleh dengan massa komponen itu di campuran awal.

RUMUS HIDUP **Persen perolehan (rendemen)**

$$\%\,\text{perolehan} = \frac{m_{\text{diperoleh}}}{m_{\text{awal}}} \times 100\%$$

Berapa bagian zat yang berhasil kita selamatkan dari campuran, dinyatakan dalam persen.

$m_{\text{diperoleh}}$ Massa yang diperoleh (kering) g

m_{awal} Massa zat itu dalam campuran awal g

% Persen perolehan %

PERSEN PEROLEHAN

96

%

🏆 **pemisahan sangat cermat**

Dari **10** g zat di campuran, kamu menyelamatkan **9,6** g, yaitu **96** %. Yang hilang: **0,4** g.

Cek satuan: g ÷ g × 100% = %

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PERSEN-PEROLEHAN

CONTOH **Garam Bima yang selamat**

Bima memisahkan 30,0 g campuran yang mengandung 10,0 g garam. Setelah penguapan dan pengeringan, ia memperoleh 9,6 g garam. Berapa persen perolehan garamnya?

1. Massa garam yang diperoleh: $m_{\text{diperoleh}} = 9{,}6$ g. Massa garam di campuran awal: $m_{\text{awal}} = 10{,}0$ g.
2. $\%\,\text{perolehan} = \dfrac{9{,}6}{10{,}0} \times 100\% = 96\%.$

Perolehan garam 96%. Sebanyak 0,4 g garam hilang, mungkin menempel di kertas saring atau memercik saat penguapan.

LAB MINI **Teka-teki Alur Pemisahan: susun langkahnya!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-3

Campuran: Pasir + garam + serbuk besi

Tujuan: dapatkan kembali besi, pasir, dan garam

Langkah 1 → Langkah 2 → Langkah 3 → Langkah 4

Seret kartu ke kotak langkah, atau ketuk kartu untuk mengisi kotak kosong berikutnya.

- Tarik dengan magnet
- Larutkan dalam air
- Saring
- Uapkan filtrat
- Sublimasi
- Corong pisah
- Distilasi
- Kromatografi

Status

`0/4 kotak terisi`

Pilih campuran, lalu seret kartu teknik ke kotak langkah 1, 2, 3, … (atau ketuk kartu untuk mengisi kotak kosong berikutnya; ketuk kotak untuk mengosongkannya). Tekan ✔ **Periksa**. Adakah urutan lain yang juga masuk akal?

MITOS

"Air yang sudah disaring dengan kain atau pasir pasti aman diminum."

FAKTA

Penyaringan hanya menahan partikel yang lebih besar dari pori. Kuman yang berukuran beberapa mikrometer dan zat terlarut (garam, pestisida) bisa lolos. Air hasil saringan tetap harus direbus sampai mendidih.

MITOS

"Makin halus kertas saringnya, makin banyak garam yang tertahan."

FAKTA

Garam yang larut terurai menjadi ion selebar ±0,2 nm, puluhan ribu kali lebih kecil daripada pori kertas saring. Garam dipisahkan dari air dengan penguapan, distilasi, atau membran khusus (osmosis balik, Bab 24).

3.3 Penguapan dan kristalisasi: dari tambak garam sampai pabrik gula

Penguapan (evaporasi) memisahkan zat padat yang terlarut dari pelarutnya. Larutan dipanaskan atau dijemur sampai pelarutnya menguap, dan zat terlarut tertinggal. Cara ini bekerja karena titik didih pelarut (air, 100 °C) jauh lebih rendah daripada titik didih zat terlarut (garam, 1.465 °C). Kekurangannya, pelarutnya hilang ke udara.

KIMIA NUSANTARA · GARAM RAKYAT DARI TAMBAK

Sepanjang musim kemarau, petambak di Madura (Sumenep, Pamekasan, Sampang), Pati dan Rembang, Jeneponto, hingga Bima di Nusa Tenggara Barat mengalirkan air laut ke petak-petak tambak. Matahari dan angin menguapkan airnya sedikit demi sedikit. Air yang makin pekat, yang disebut *air tua*, dipindahkan ke petak kristalisasi (meja garam) sampai kristal garam muncul. Air laut hanya mengandung ±3,5% garam terlarut, dan sekitar tiga perempatnya adalah NaCl. Petambak berpengalaman memanen kristal sebelum air tua terlalu pekat, karena pada tahap akhir garam magnesium yang pahit ikut mengkristal. Kini banyak petambak melapisi meja garam dengan plastik geomembran agar garamnya lebih putih dan bersih.

RUMUS HIDUP

Garam dari air laut

$$m_{\mathrm{NaCl}} = V \times \rho \times \frac{w}{100}$$

Massa garam = volume air laut × massa jenisnya × kadar NaCl-nya.

- V Volume air laut L
- ρ Massa jenis air laut kg/L
- w Kadar NaCl (persen massa) %
- m_{NaCl} Massa NaCl maksimum kg

MASSA NACL MAKSIMUM

27,68

kg

1.000 L air laut menyimpan paling banyak **27,68** kg NaCl, setara **0,554** karung garam 50 kg.

Satuan Nusantara: ≈ 1,1 × karung beras · ≈ 28% dari motor bebek · ≈ 185 × satu apel

Cek satuan: L × kg/L × (%/100) = kg

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-GARAM-TAMBAK

Kalau yang kita inginkan adalah **kristal yang murni dan rapi**, ada cara yang lebih cerdik: **kristalisasi**. Zat dilarutkan dalam pelarut panas sampai jenuh, lalu larutan didinginkan perlahan. Karena kelarutannya turun saat dingin, kelebihan zat keluar dari larutan sebagai kristal. Pengotor yang jumlahnya sedikit tetap tinggal di larutan (larutan induk), sehingga kristalnya lebih murni.

DEFINISI · LARUTAN JENUH DAN KRISTALISASI

Larutan jenuh adalah larutan yang sudah tidak dapat melarutkan zat terlarut lagi pada suhu tertentu. **Kristalisasi** adalah pembentukan kristal padat dari larutan jenuh, baik dengan mendinginkan larutan maupun dengan menguapkan sebagian pelarutnya.

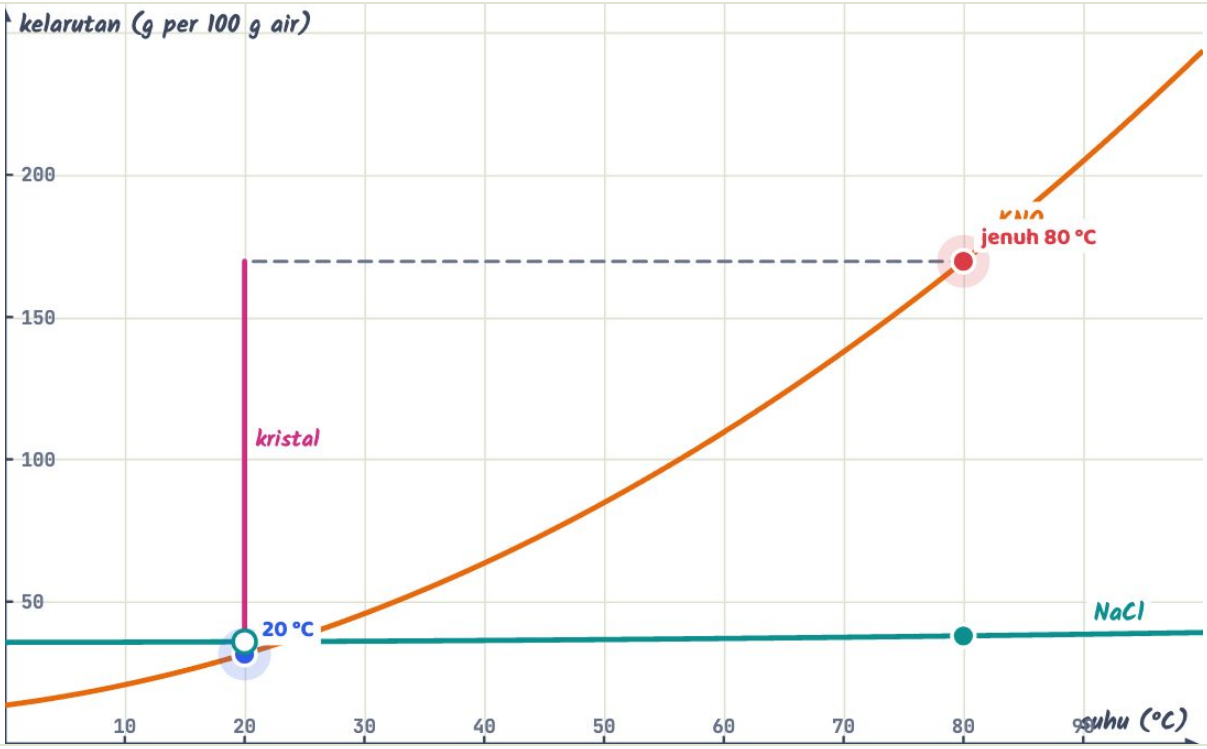
GRAFIK HIDUP

Kurva kelarutan: berapa kristal yang muncul saat didinginkan?

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-3

$$m_{\text{kristal}} = S(T_1) - S(T_2) \quad \text{(per 100 g air)}$$

$$T_1 = 80\,^{\circ}\text{C} \rightarrow T_2 = 20\,^{\circ}\text{C}: \quad \text{KNO}_3\ 138\ \text{g}, \quad \text{NaCl}\ 2{,}08\ \text{g}$$



NaCl hampir tidak mengkristal saat didinginkan: garam dapur diperoleh dengan penguapan, bukan pendinginan

kristal KNO_3 (per 100 g air)	kristal NaCl (per 100 g air)	KNO_3 yang mengkristal
138 g	2,08 g	81 %

Seret titik merah (larutan jenuh panas) dan titik biru (suhu akhir). Larutan didinginkan menyusuri garis putus-putus; begitu menyentuh kurva, kristal mulai muncul (panah magenta). Bandingkan kurva KNO_3 yang curam dengan kurva NaCl yang hampir datar.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Menguapkan sampai kering bukan selalu cara terbaik. Semua pengotor ikut tertinggal bersama kristal, gula bisa gosong menjadi karamel, dan kristal hidrat kehilangan air kristalnya (terusi biru, $CuSO_4 \cdot 5\,H_2O$, berubah menjadi serbuk putih, Bab 17). Untuk kristal murni, uapkan sebagian saja sampai larutan jenuh, lalu biarkan dingin.

Pabrik gula tebu di Jawa Timur memakai keduanya. Nira tebu dijernihkan dengan kapur, lalu diuapkan dalam evaporator sampai kental. Nira kental "dimasak" dalam panci vakum: tekanan rendah membuat air mendidih jauh

di bawah 100 °C, sehingga gula tidak gosong. Kristal gula yang tumbuh kemudian dipisahkan dari cairan cokelat kental (tetes tebu atau molase) dengan **sentrifugasi**. Satu pabrik, empat teknik pemisahan!

COBA SENDIRI **Kristal kalium nitrat**

Sebanyak 100 g air pada 80 °C dijenuhkan dengan kalium nitrat, $\mathrm{KNO_3}$, lalu didinginkan sampai 20 °C. Kelarutan $\mathrm{KNO_3}$ adalah 169 g per 100 g air pada 80 °C dan 31,6 g per 100 g air pada 20 °C. (a) Berapa gram kristal yang terbentuk? (b) Berapa persen $\mathrm{KNO_3}$ yang berhasil dikristalkan? (c) Mengapa cara ini tidak cocok untuk memperoleh garam dapur? (Kelarutan NaCl 38,0 g pada 80 °C dan 35,9 g pada 20 °C, per 100 g air.)

1. (a) Pada 80 °C larut 169 g. Pada 20 °C hanya 31,6 g yang dapat tetap larut. Kelebihannya mengkristal: $169 - 31{,}6 = 137{,}4$ g.
2. (b) $\frac{137{,}4}{169} \times 100\% = 81{,}3\%$ dari $\mathrm{KNO_3}$ yang dilarutkan.
3. (c) Untuk NaCl: $38{,}0 - 35{,}9 = 2{,}1$ g saja per 100 g air. Hampir semuanya tetap larut, sehingga pendinginan tidak efektif.

(a) 137,4 g kristal, (b) 81,3%. (c) Kelarutan NaCl hampir tidak bergantung pada suhu, jadi garam dapur diperoleh dengan penguapan, persis seperti di tambak. Cek di Grafik Hidup di atas!

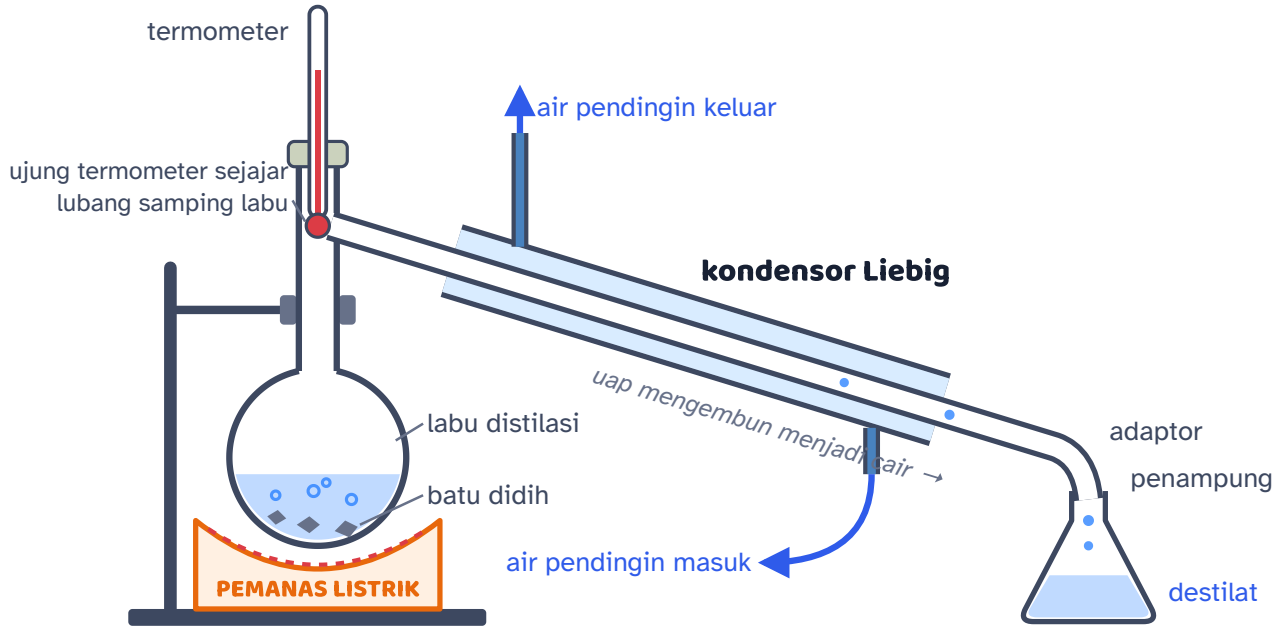
3.4 Distilasi: menguap, lalu mengembun lagi

Teka-teki dari Bab 2 bertanya: bisakah kita mengambil *air tawarnya* dari air laut, bukan hanya garamnya? Bisa, asalkan uap air tidak dibiarkan kabur ke udara. Uap itu ditangkap, didinginkan, dan diembunkan kembali menjadi air cair. Itulah **distilasi** atau penyulingan.

Bahasa sederhana · Pernahkah kamu membuka tutup panci yang sedang merebus air? Di bagian dalam tutup ada tetesan air bening. Air itu tadinya uap yang naik dari panci, lalu mengembun karena tutupnya lebih dingin. Kalau kamu merebus air garam, tetesan di tutup panci itu tidak asin! Alat distilasi adalah "tutup panci" yang dibuat sangat cermat.

DEFINISI · DISTILASI

Distilasi (penyulingan) adalah pemisahan campuran cair berdasarkan perbedaan titik didih: campuran dipanaskan, komponen yang lebih mudah menguap berubah menjadi uap, lalu uapnya diembunkan dalam **kondensor**. Cairan hasil pengembunan disebut **destilat**.



Rangkaian distilasi sederhana. Air pendingin masuk dari bawah dan keluar dari atas supaya selubung kondensor selalu penuh air dingin. Ujung termometer berada tepat di depan lubang samping karena yang diukur adalah suhu *uap* yang menuju kondensor.

⚠ **KESELAMATAN**

Distilasi cairan mudah terbakar (alkohol, aseton, bensin) wajib memakai pemanas listrik atau penangas air, bukan api terbuka. Masukkan dua atau tiga batu didih sebelum memanaskan supaya cairan tidak meletup. Jangan pernah memanaskan sistem yang tertutup rapat: ujung penampung harus terbuka ke udara. Jangan menyuling sampai labu kering. Pakai kacamata pelindung, dan lakukan di bawah pengawasan guru.



Mudah menyala



Iritan

Tebak Dulu!

Kak Tirta mendistilasi air sumur yang sedikit berbau minyak tanah karena ada tangki bocor di dekat sumur. Bagaimana destilatnya?

Pasti murni dan tidak berbau, karena distilasi menyingkirkan semua pengotor.

Masih bisa berbau, karena sebagian zat yang mudah menguap ikut menguap dan mengembun bersama air.

Berwarna kekuningan seperti minyak tanah, tetapi tidak berbau.

Tidak ada destilat, karena minyak tanah menyumbat kondensor.

Jawabannya: masih bisa berbau. Distilasi hanya menyingkirkan zat yang *sukar menguap*, seperti garam dan kotoran padat. Zat yang ikut menguap pada suhu didih air, misalnya sebagian komponen minyak tanah, amonia, atau gas terlarut, dapat terbawa bersama uap air ke dalam destilat.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Distilasi tidak selalu menghasilkan zat murni. Gas terlarut (seperti CO_2 dan amonia) dan cairan yang mudah menguap ikut tersuling bersama air. Itulah sebabnya air suling untuk laboratorium yang sangat teliti disuling dua kali atau dimurnikan lagi dengan resin penukar ion.

Distilasi sederhana cukup untuk memisahkan pelarut dari zat padat terlarut, atau dua cairan yang titik didihnya berjauhan, misalnya aseton (56 °C) dan air (100 °C). Bagaimana kalau titik didihnya berdekatan, seperti etanol (78 °C) dan air (100 °C)? Uap yang keluar dari labu tetap mengandung kedua zat, hanya lebih kaya komponen yang lebih mudah menguap. Solusinya adalah **distilasi bertingkat**: di atas labu dipasang **kolom fraksionasi** berisi manik-manik kaca. Di permukaan manik, uap berkali-kali mengembun dan menguap lagi. Setiap "naik kelas" membuat uap makin kaya komponen yang lebih mudah menguap, sehingga yang sampai di puncak kolom hampir murni.

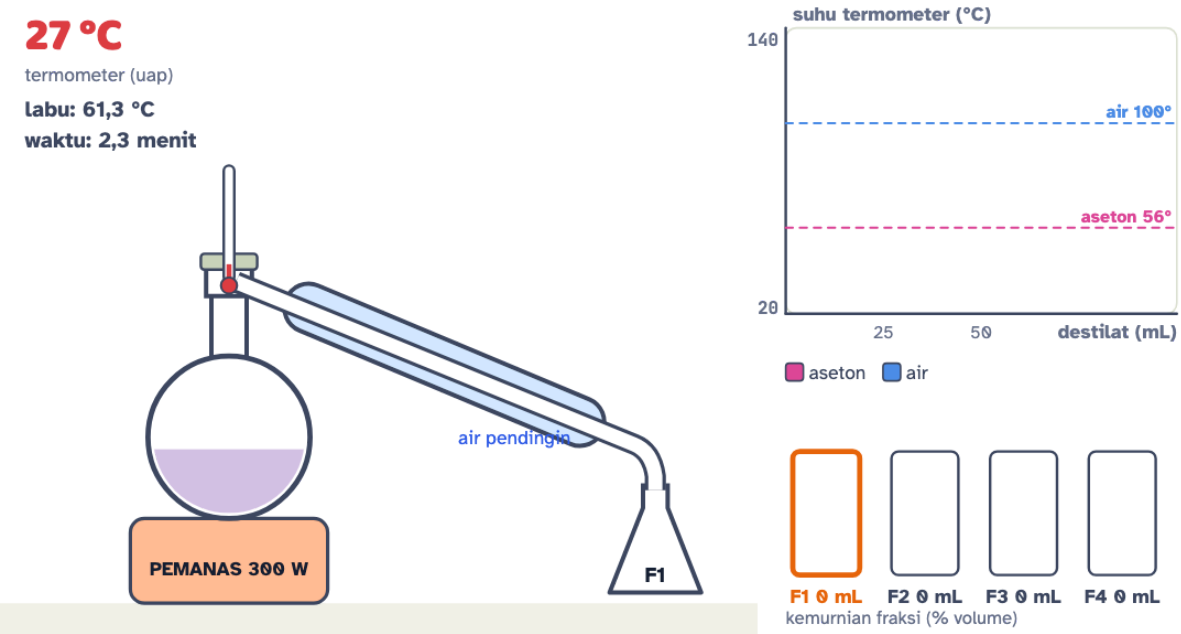
☆ **ATURAN · MEMILIH JENIS DISTILASI**

Selisih titik didih lebih dari ±25 °C: distilasi sederhana biasanya cukup. Selisih kurang dari ±25 °C: pakai distilasi bertingkat. Selama satu komponen tersuling, suhu termometer bertahan pada titik didih komponen itu (terjadi **dataran suhu**). Suhu baru naik lagi setelah komponen itu hampir habis.

LAB MINI

Labu Distilasi: kejar dataran suhunya!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-3



Termometer (uap)	Suhu cairan di labu	Destilat total	Penampung aktif
27 °C	61,3 °C	0 mL	F1

Keadaan
Memanaskan… belum mendidih

Pilih campuran lalu tekan ▶. Amati termometer dan grafiknya. Setiap kali suhu mulai naik ke dataran baru, tekan 🔄 **Ganti penampung** supaya setiap fraksi tertampung terpisah. Bandingkan kemurnian fraksi dengan dan tanpa **kolom fraksionasi**. Pada air laut, mengapa termometer menunjukkan 100 °C padahal labunya lebih panas? (Warna cairan hanya penanda; aslinya semua bening.)

Di kilang minyak seperti di Cilacap, Balikpapan, dan Dumai, prinsip yang sama bekerja dalam skala raksasa. Minyak mentah dipanaskan sampai ±350–400 °C lalu dialirkan ke menara fraksionasi setinggi puluhan meter. Menara itu panas di bawah dan makin dingin ke atas. Setiap fraksi mengembun pada ketinggian yang suhunya sesuai dengan titik didihnya, lalu dialirkan keluar.

Fraksi minyak bumi	Titik didih (±)	Jumlah atom C	Kegunaan
Gas kilang	di bawah 30 °C	C1–C4	LPG, bahan baku petrokimia
Bensin (nafta)	30–180 °C	C5–C10	bahan bakar kendaraan, bahan baku plastik
Kerosin dan avtur	160–250 °C	C10–C16	minyak tanah, bahan bakar pesawat

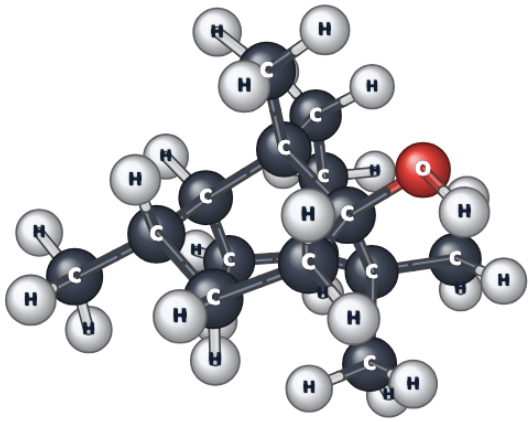
Solar (diesel)	250–350 °C	C14–C20	truk, bus, kapal, genset
Pelumas dan parafin	350–450 °C	C20–C40	oli, lilin, campuran malam batik
Residu	di atas 450 °C	lebih dari C40	aspal jalan, bahan bakar kapal

KIMIA NUSANTARA · HARUMNYA HASIL PENYULINGAN

Sebagian besar minyak nilam dunia berasal dari Indonesia, terutama dari Aceh, Sumatra Barat, dan Sulawesi. Daun nilam kering dimasukkan ke ketel, lalu dialiri **uap air** selama berjam-jam. Uap membawa molekul wangi keluar dari daun, keduanya mengembun di kondensor, dan minyak yang tidak larut dalam air mengapung di atas destilat. Cara yang sama dipakai untuk minyak kayu putih dari Pulau Buru (Maluku), minyak serai wangi, dan minyak daun cengkeh. Rendemennya kecil: ±2–3% untuk nilam dan kurang dari 1% untuk kayu putih. Itulah sebabnya sebotol kecil minyak atsiri bernilai tinggi. Komponen utama minyak nilam, **patchoulol**, menentukan mutu dan harganya.

MOLEKUL 3D

Wangi Nusantara hasil penyulingan



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Patchoulol $C_{15}H_{26}O$ Mr ≈ 222,37 PubChem ↗

Aroma khas minyak nilam; Aceh terkenal sebagai penghasil minyak nilam berkualitas tinggi.

Patchoulol (minyak nilam) mendidih jauh di atas 200 °C, tetapi tetap bisa disuling bersama uap air di bawah 100 °C. Putar molekul-molekul ini. Gugus –OH mana yang membuat geraniol, mentol, dan patchoulol sedikit "suka air"? Bandingkan dengan limonena (minyak kulit jeruk) yang hanya berisi C dan H.

MITOS

"Minyak atsiri diperoleh dengan memeras daun nilam atau daun kayu putih."

FAKTA

Hampir semua minyak atsiri Nusantara (nilam, kayu putih, serai wangi, daun cengkeh) diperoleh dengan distilasi uap. Uap air membawa molekul wangi keluar dari daun. Hanya minyak kulit jeruk yang lazim diperas.

MITOS

"Selama distilasi, suhu termometer terus naik."

FAKTA

Selama satu komponen murni tersuling, suhunya bertahan di titik didih komponen itu (dataran suhu). Suhu baru naik setelah komponen itu habis. Dataran suhu adalah "sidik jari" zat yang sedang tersuling.

TAMU DARI MASA LALU · ALEMBIK

Alkimiawan di Aleksandria, Mesir, sudah memakai alat penyuling sekitar 2.000 tahun lalu. Para ilmuwan dunia Islam, antara lain Jabir ibn Hayyan (abad ke-8) dan Ar-Razi (abad ke-9–10), menyempurnakannya untuk menyuling air mawar dan minyak wangi. Nama alat itu, *alembik*, berasal dari bahasa Arab *al-anbiq*. Kata "alkohol" pun berasal dari bahasa Arab, *al-kuhl*. Di Pulau Buru, ketel penyulingan kayu putih tradisional dari drum dan pipa sederhana masih bekerja dengan prinsip yang sama hingga kini.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM RAOULT: MENGAPA UAP LEBIH KAYA KOMPONEN MUDAH MENGUAP?

Untuk larutan ideal dua cairan A dan B, tekanan uap parsial setiap komponen sebanding dengan fraksi molnya di cairan (hukum Raoult):

$$p_A = x_A\,p_A^\circ, \qquad p_B = x_B\,p_B^\circ, \qquad y_A = \frac{p_A}{p_A + p}$$

Contoh: pada 70 °C, p° heksana = 1,04 atm dan p° heptana = 0,40 atm. Cairan dengan $x_{\text{heksana}} = 0{,}40$ memberi $p_{\text{heksana}} = 0{,}416$ atm dan $p_{\text{heptana}} = 0{,}60 \times 0{,}40 = 0{,}24$ atm, sehingga $y_{\text{heksana}} = 0{,}416/0{,}656 = 0{,}63$. Uapnya jauh lebih kaya heksana (63%) daripada cairannya (40%). Setiap pengembunan-penguapan ulang di kolom (satu **lempeng teoretis**) mengulang pengayaan ini. Pada refluks total, banyaknya lempeng minimum diperkirakan dengan persamaan Fenske: $N_{\min} = \ln\left[\frac{y/(1-y)}{x/(1-x)}\right] / \ln\alpha$, dengan $\alpha = p_A^\circ/p_B^\circ$ (volatilitas relatif).

Campuran nyata bisa menyimpang dari hukum Raoult. Etanol dan air membentuk **azeotrop** pada 95,6% etanol (massa) yang mendidih pada 78,2 °C. Uap azeotrop sama komposisinya dengan cairannya, sehingga distilasi bertingkat sebaik apa pun tidak dapat memberikan etanol lebih pekat dari 95,6%. Lab Mini di atas memakai model van Laar untuk meniru penyimpangan ini.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DISTILASI UAP: MENDIDIH DI BAWAH 100 °C

Minyak atsiri dan air **tidak saling melarutkan**. Masing-masing menguap seolah-olah sendirian, sehingga tekanan uap total adalah jumlah tekanan uap keduanya (hukum Dalton): $P = p^\circ_{\text{air}} + p^\circ_{\text{minyak}}$. Campuran mendidih ketika jumlah itu mencapai tekanan udara luar, yaitu pada suhu *di bawah* titik didih air. Molekul wangi yang titik didihnya 250 °C pun ikut tersuling di bawah 100 °C tanpa terurai.

$$\frac{m_{\text{minyak}}}{m_{\text{air}}} = \frac{p^\circ_{\text{minyak}}\, M_{\text{minyak}}}{p^\circ_{\text{air}}\, M_{\text{air}}}$$

Karena tekanan uap patchoulol sangat kecil pada suhu itu, setiap kilogram uap air hanya membawa sedikit minyak. Itulah sebabnya penyulingan nilam berlangsung berjam-jam dan menghabiskan banyak kayu bakar.

3.5 Kromatografi kertas: lomba lari para pewarna

Tebak Dulu!

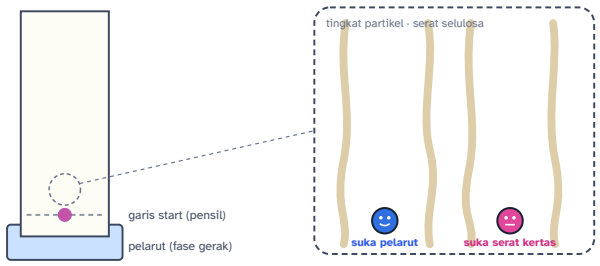
Setitik tinta spidol hitam (yang larut air) ditotolkan di tisu, lalu ujung tisu dicelupkan ke air. Apa yang terlihat setelah air merambat naik?

- Titik hitam melebar menjadi lingkaran hitam yang lebih besar.
- Titik hitam luntur dan hilang tanpa bekas.
- Titik hitam tetap diam karena tinta tidak larut.
- Muncul pita-pita warna lain, misalnya biru, ungu, dan kuning, pada ketinggian berbeda.

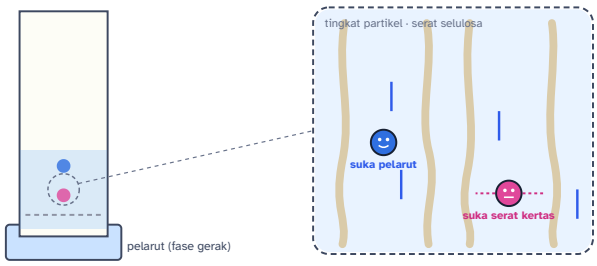
Jawabannya: muncul pita-pita warna. Tinta hitam biasanya campuran beberapa pewarna. Air membawa setiap pewarna dengan kecepatan berbeda, sehingga warna-warna itu memisah seperti pelangi kecil. Itulah kromatografi!

Kromatografi memisahkan komponen campuran berdasarkan perbedaan "kesetiaan" mereka pada dua fase. **Fase diam** adalah bahan yang tidak bergerak (pada kromatografi kertas: serat selulosa kertas beserta air yang terikat padanya). **Fase gerak** (eluen) adalah pelarut yang merambat naik melewati fase diam. Komponen yang lebih mudah larut dalam fase gerak dan kurang tertarik pada fase diam berlari lebih jauh.

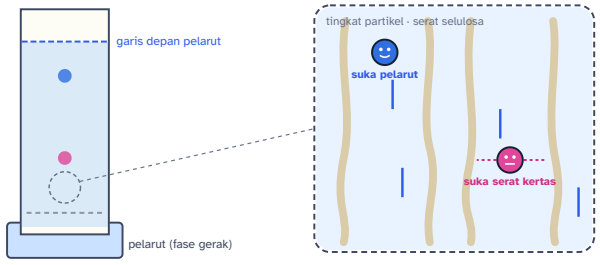
Bahasa sederhana · Bayangkan lomba lari di jalan yang ramai pedagang jajanan. Pelari A tidak tertarik jajan, jadi ia terus berlari bersama rombongan. Pelari B sering berhenti di setiap gerobak bakso. Setelah lima menit, A sudah jauh di depan dan B tertinggal. Pewarna yang "suka berhenti" di serat kertas tertinggal di bawah, sedangkan pewarna yang "suka ikut arus" pelarut melaju ke atas.



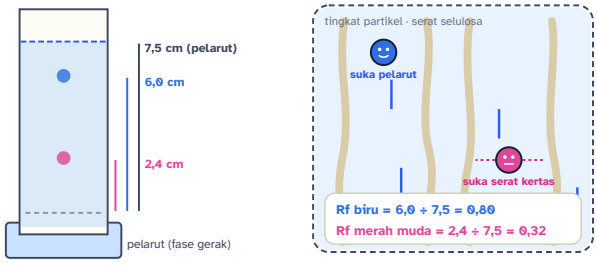
Langkah 1. Setetes campuran dua pewarna (tampak ungu) ditotolkan di atas garis start pensil. Di tingkat partikel, molekul biru dan molekul merah muda masih bercampur di antara serat selulosa kertas.



Langkah 2. Pelarut (fase gerak) merambat naik lewat celah-celah serat. Setiap molekul pewarna terus "bimbang": larut dan terbawa arus, atau menempel pada serat (fase diam)?



Langkah 3. Molekul biru lebih suka larut, jadi lebih sering ikut arus dan melaju jauh. Molekul merah muda lebih sering menempel, jadi tertinggal. Campuran pun terpisah menjadi dua noda.



Langkah 4. Ukur semuanya dari garis start: pelarut 7,5 cm, noda biru 6,0 cm, noda merah muda 2,4 cm. R_f biru $= 6{,}0/7{,}5 = 0{,}80$ dan R_f merah muda $= 2{,}4/7{,}5 = 0{,}32$.

DEFINISI · NILAI R_F

Nilai R_f (*retardation factor*, faktor retardasi) adalah perbandingan jarak tempuh noda dengan jarak tempuh pelarut, keduanya diukur dari garis start:

$$R_f = \frac{\text{jarak noda dari garis start}}{\text{jarak garis depan pelarut dari garis start}}$$

R_f tidak bersatuan dan selalu bernilai antara 0 dan 1. Pada kertas, pelarut, dan suhu yang sama, suatu zat selalu memberi R_f yang sama. Karena itu R_f dipakai untuk mengenali zat dengan membandingkannya dengan zat standar.

RUMUS HIDUP **Nilai Rf**

$$R_f = \frac{d_{\text{noda}}}{d_{\text{pelarut}}}$$

Seberapa jauh noda ikut berlari, dibandingkan dengan jarak yang ditempuh pelarut.

d_{noda} Jarak noda dari garis start cm

d_{pelarut} Jarak garis depan pelarut cm

R_f Nilai Rf

NILAI RF

0,64

cocok dengan Ponceau 4R, pewarna merah yang diizinkan

Noda menempuh **64** % dari jarak tempuh pelarut.

Cek satuan: cm ÷ cm = tanpa satuan

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-RF-KROMATOGRAFI

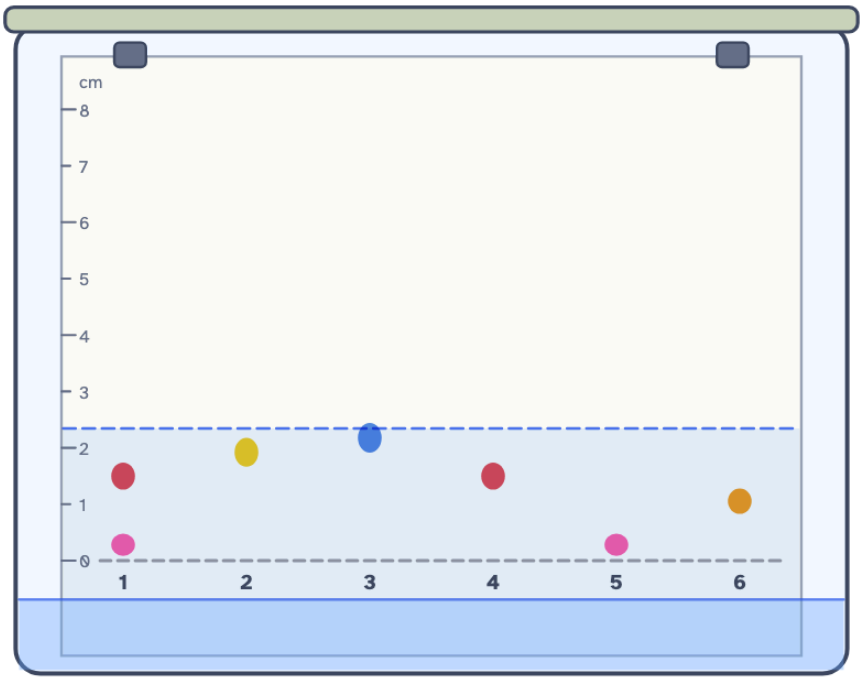
TRIK KAK TIRTA

Pelarut adalah "bus" yang membawa semua penumpang naik. Tak ada penumpang yang bisa turun lebih jauh dari tempat bus berhenti, jadi R_f tidak mungkin lebih dari 1. Kalau hitunganmu memberi R_f 1,3, kamu pasti terbalik membagi! Ingat urutannya: **noda di atas, pelarut di bawah**.

LAB MINI

Detektif Pewarna: Kromatografi Kertas

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-3



Lajur

- **1 · Sampel**
  Sirup stroberi C
- **2 · T · Tartrazin**
  ✓ diizinkan untuk pangan
- **3 · B · Biru berlian**
  ✓ diizinkan untuk pangan
- **4 · P · Ponceau 4R**
  ✓ diizinkan untuk pangan
- **5 · RhB · Rhodamin B**
  ✗ dilarang untuk pangan
- **6 · KM · Kuning metanil**
  ✗ dilarang untuk pangan

Tekan ▶, lalu tunggu pelarut naik.

Jarak pelarut	Jarak noda terpilih	Rf noda terpilih	Noda terpilih
2,3 cm	–	–	ketuk sebuah noda

Keadaan
Pelarut merambat naik…

Pilih sampel jajanan dan pelarut, lalu tekan ▶. Lajur 1 berisi sampel; lajur 2–6 berisi pewarna standar. Setelah pelarut berhenti, **ketuk sebuah noda** untuk mengukur jarak dan R_f-nya. Sampel mana yang mengandung pewarna terlarang? Lalu nyalakan kesalahan "pulpen" atau "pelarut terlalu tinggi" dan lihat akibatnya. (Nilai R_f di sini adalah ilustrasi; nilai nyata bergantung pada kertas, pelarut, dan suhu.)

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Garis start kromatografi selalu digambar dengan pensil, dan permukaan pelarut harus berada di bawahnya. Grafit pensil tidak larut, sedangkan tinta pulpen akan ikut berlari dan mengacaukan hasil. Kalau pelarut menyentuh noda, pewarnanya larut ke dalam wadah dan tidak naik ke kertas. Tutup wadah agar udara di dalamnya jenuh uap pelarut, dan angkat kertas sebelum pelarut mencapai ujung atas.

TAMU DARI MASA LALU · "MENULIS DENGAN WARNA"

Pada 1906, ahli botani Rusia **Mikhail Tsvet** menuangkan ekstrak daun ke dalam tabung kaca berisi serbuk kapur (kalsium karbonat). Saat pelarut dialirkan, pigmen daun terpisah menjadi pita-pita hijau dan kuning. Ia menamai teknik itu *kromatografi*, dari bahasa Yunani *chroma* (warna) dan *graphein* (menulis). Kebetulan yang lucu: dalam bahasa Rusia, *tsvet* berarti "warna"! Pada 1952, Archer Martin dan Richard Synge meraih Nobel Kimia karena mengembangkan kromatografi partisi, nenek moyang kromatografi kertas dan kromatografi gas.

KIMIA NUSANTARA · BPOM MEMBURU RHODAMIN B

Rhodamin B adalah pewarna tekstil dan kertas berwarna merah muda menyala yang **dilarang** untuk pangan, demikian pula kuning metanil. Namun, keduanya kadang masih ditemukan pada kerupuk, terasi, saus, dan jajanan pasar karena murah dan warnanya mencolok. Bila sering tertelan, zat ini dapat mengganggu fungsi hati. Petugas BPOM dan dinas kesehatan menguji sampel jajanan dengan kit uji cepat dan kromatografi lapis tipis (KLT), saudara dekat kromatografi kertas: bila noda sampel memiliki warna dan R_f yang sama dengan standar Rhodamin B, sampel itu patut dicurigai dan diuji lebih lanjut. Waspadai makanan yang warnanya merah muda terlalu mencolok, berpendar, dan tidak merata.

KERJAKAN BERSAMA

Saus yang mencurigakan

Laras menguji saus jajanan dengan kromatografi kertas (pelarut: air garam 1%). Garis depan pelarut 7,5 cm dari garis start. Sampel memberi dua noda: noda merah muda pada 0,9 cm dan noda merah pada 4,8 cm. Pada kertas dan pelarut yang sama, standar memberi R_f: Rhodamin B 0,12; kuning metanil 0,45; Ponceau 4R 0,64; tartrazin 0,82. Apa kesimpulannya?

1. Hitung R_f noda merah muda: $0{,}9/7{,}5 = 0{,}12$.
2. Hitung R_f noda merah: $4{,}8/7{,}5 = 0{,}64$.
3. Cocokkan dengan standar (warna dan R_f harus sama): 0,12 cocok dengan Rhodamin B; 0,64 cocok dengan Ponceau 4R.
4. Supaya lebih yakin, ulangi dengan pelarut lain. Dua zat berbeda jarang sekali memiliki R_f yang sama di dua pelarut berbeda.

Saus mengandung Ponceau 4R (diizinkan) dan diduga kuat mengandung Rhodamin B (terlarang). Sampel perlu dilaporkan dan dikonfirmasi di laboratorium.

ADU CEPAT **Hitung Rf secepat kilat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-3

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Rf = jarak noda ÷ jarak pelarut. Contoh: 3 cm ÷ 6 cm = 0,5.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

R_F, KOEFISIEN PARTISI, DAN SAUDARA-SAUDARA KROMATOGRAFI

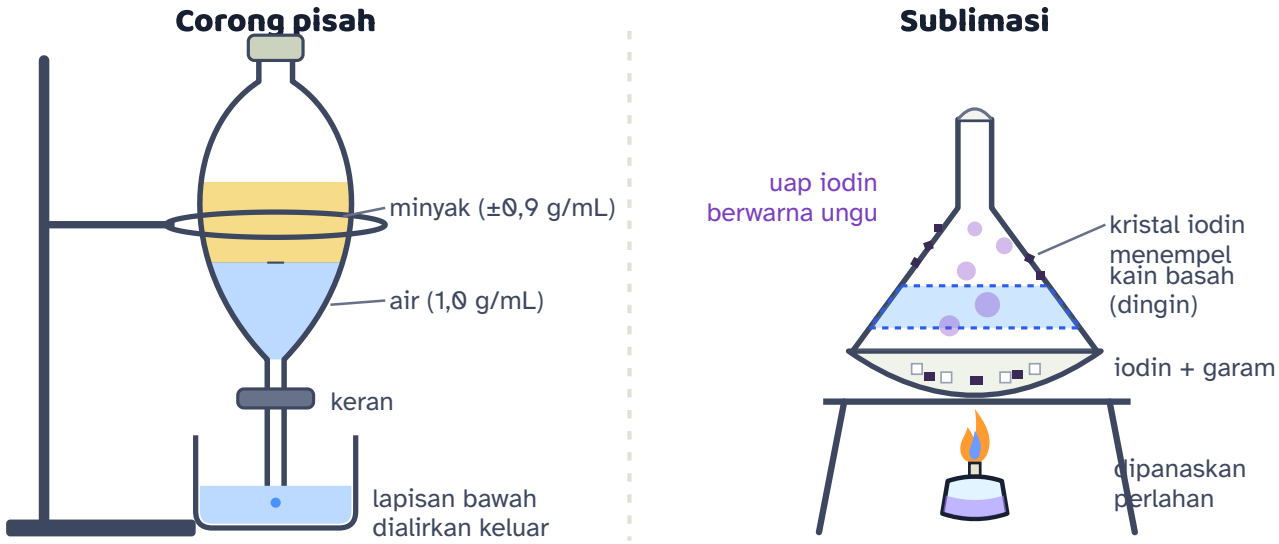
Dalam kromatografi partisi, setiap molekul zat terus berpindah antara fase gerak (m) dan fase diam (s). Perbandingan konsentrasinya saat setimbang adalah koefisien partisi $K = c_s/c_m$. Bagian waktu yang dihabiskan molekul di fase gerak menentukan kecepatannya relatif terhadap pelarut:

$$R_f = \frac{A_m}{A_m + K A_s} = \frac{1}{1 + K\,(A_s/A_m)}$$

dengan A_m dan A_s luas penampang fase gerak dan fase diam. Zat yang sangat terikat pada fase diam (K besar) memiliki R_f kecil. Prinsip yang sama dipakai di **KLT** (lapisan silika di atas kaca atau aluminium), **HPLC** (kolom bertekanan tinggi, untuk menguji kadar obat dan vitamin), dan **kromatografi gas** (untuk analisis minyak atsiri dan uji doping). Zat tak berwarna, misalnya asam amino, dilihat dengan *pereaksi penampak noda* seperti ninhidrin (memberi noda ungu) atau dengan sinar ultraviolet.

3.6 Corong pisah, ekstraksi, sublimasi, dan uji kemurnian

Minyak goreng dan air tidak bercampur. Keduanya membentuk dua lapisan karena massa jenisnya berbeda: minyak (±0,9 g/mL) mengapung di atas air (1,0 g/mL). Alat untuk memisahkan dua cairan seperti ini adalah **corong pisah**: keran di bagian bawah dibuka perlahan sampai seluruh lapisan bawah mengalir keluar, lalu keran ditutup tepat ketika batas lapisan mencapainya.



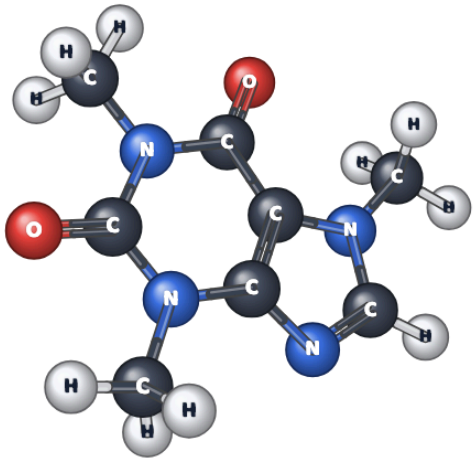
Kiri: corong pisah memisahkan dua cairan yang tidak bercampur berdasarkan massa jenisnya. Kanan: iodin menyublim saat dipanaskan perlahan, lalu uapnya mengkristal kembali di dinding corong yang dingin, sedangkan garam tertinggal di cawan (dilakukan guru di lemari asam).

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Lapisan minyak atau pelarut organik tidak selalu berada di atas. Diklorometana (massa jenis 1,33 g/mL) justru tenggelam di bawah air! Untuk memastikan, teteskan sedikit air ke corong dan lihat lapisan mana yang bertambah. Saat mengocok pelarut yang mudah menguap di corong pisah, balikkan corong dan buka kerannya sesekali (mengarah menjauhi wajah) untuk membuang tekanan uap.

Ekstraksi adalah pemindahan suatu zat dari satu fase ke pelarut lain yang lebih "disukainya". Kamu melakukannya setiap pagi! Menyeduh teh atau kopi adalah ekstraksi padat–cair: air panas melarutkan kafein, zat warna, dan zat aroma dari daun teh atau bubuk kopi, sedangkan ampasnya tertinggal. Membuat jamu kunyit juga ekstraksi: kurkumin yang kuning lebih mudah larut dalam etanol atau minyak daripada dalam air. Pabrik kopi tanpa kafein memakai CO_2 superkritis (Bab 2) untuk mengekstraksi kafein tanpa meninggalkan sisa pelarut.

MOLEKUL 3D **Siapa yang diekstraksi, siapa yang menyublim?**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Kafein $C_8H_{10}N_4O_2$ Mr ≈ 194,19 PubChem ↗

Stimulan pada kopi Gayo, Toraja, dan Kintamani, juga pada teh. Membuat mata melek dengan menghalangi adenosin.

Kafein (kopi, teh) cukup larut dalam air panas. Kurkumin (kunyit) lebih suka etanol daripada air. Betakaroten (wortel, minyak sawit merah) hanya larut dalam minyak, karena molekulnya hampir seluruhnya C dan H. Naftalena (kapur barus) menyublim pada suhu kamar. Putar dan bandingkan gugus-gugusnya: mana yang punya banyak atom O atau N?

Sublimasi memisahkan zat yang dapat berubah langsung dari padat menjadi gas (dan sebaliknya) dari zat yang tidak menyublim. Campuran dipanaskan perlahan, uap zat yang menyublim naik lalu mengkristal kembali (deposisi) di permukaan yang dingin. Iodin (I, uapnya ungu) dan naftalena dapat dipisahkan dari garam atau pasir dengan cara ini. Kamu juga sudah bertemu sublimasi di Bab 2: kapur barus di lemari yang makin mengecil tanpa meninggalkan genangan.

ID

KIMIA NUSANTARA · ASAL NAMA "KAPUR BARUS"

Berabad-abad lalu, kristal kamper alami dari pohon kapur (*Dryobalanops aromatica*) di Sumatra menjadi barang dagangan yang sangat mahal. Para pedagang dari Arab, India, dan Tiongkok membelinya di pelabuhan Barus, di pesisir barat Sumatra Utara. Dari sinilah nama **kapur barus** berasal. Kapur barus pengusir ngengat yang dijual sekarang umumnya naftalena buatan pabrik, tetapi namanya tetap mengenang kejayaan Barus.

Setelah dipisahkan, bagaimana kita tahu zatnya sudah murni? Zat murni memiliki **titik leleh dan titik didih yang tajam dan tertentu**. Pengotor menurunkan titik leleh dan membuatnya meleleh dalam rentang suhu yang lebar. Pengotor yang tidak menguap menaikkan titik didih. Kromatografi juga dapat dipakai: zat murni memberi satu noda saja, bahkan bila diuji dengan beberapa pelarut berbeda.

DEFINISI · ZAT MURNI

Zat murni hanya tersusun atas satu jenis zat (unsur atau senyawa). Zat murni meleleh dan mendidih pada suhu yang tetap dan tajam (rentang ≤ ±1 °C), sedangkan campuran meleleh dan mendidih dalam rentang suhu.

Zat	Titik leleh zat murni	Contoh bila tidak murni
Es (air)	0 °C, tajam	es air laut mulai mencair pada ±−2 °C
Aspirin	±135 °C	sampel kurang murni: 128–133 °C (rentang lebar)
Naftalena	80 °C	bercampur pengotor: 75–79 °C
Lilin parafin	tidak tajam	±46–68 °C, karena parafin adalah campuran banyak alkana

KERJAKAN BERSAMA **Merancang pemisahan kapur barus, garam, dan pasir**

Adik Laras tidak sengaja mencampur serbuk kapur barus (naftalena), garam dapur, dan pasir. Rancang langkah untuk memperoleh ketiganya kembali. Petunjuk: naftalena tidak larut dalam air dan mudah menyublim.

1. Cari sifat yang paling khas: hanya naftalena yang menyublim. Panaskan campuran perlahan di cawan yang ditutup corong terbalik berkain basah (oleh guru, di lemari asam). Naftalena mengkristal di dinding corong.
2. Sisa (garam + pasir) dilarutkan dalam air dan diaduk: garam larut, pasir tidak.
3. Saring: pasir tertinggal sebagai residu; bilas dan keringkan.
4. Uapkan filtrat sampai kristal garam muncul.

Urutannya: sublimasi → pelarutan → penyaringan → penguapan. Urutan lain (larutkan dan saring dulu, lalu sublimasikan naftalena dari residu yang sudah dikeringkan) juga bisa. Coba keduanya di Lab Mini "Teka-teki Alur Pemisahan" di subbab 3.2.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

EKSTRAKSI BERTAHAP: SEDIKIT-SEDIKIT, LAMA-LAMA BERSIH

Bila suatu zat terbagi di antara pelarut organik dan air dengan koefisien partisi $K = c_{\text{organik}}/c_{\text{air}}$, bagian yang tersisa di air setelah satu kali ekstraksi dengan volume V_o adalah $\dfrac{V_a}{V_a + KV_o}$. Bila pelarut yang sama dibagi menjadi n bagian dan dipakai n kali, sisanya menjadi

$$\frac{m_{\text{sisa}}}{m_0} = \left(\frac{V_a}{V_a + K\,V_o/n}\right)^{n}$$

Contoh: $K = 4$, $V_a = 100$ mL, total $V_o = 60$ mL. Sekali ekstraksi: sisa $100/(100+240) = 29\%$. Tiga kali 20 mL: sisa $(100/180)^3 = 17\%$. Pelarut sama banyak, hasil jauh lebih baik!

RUMUS HIDUP

Sisa zat setelah ekstraksi bertahap

$$\%\,\text{sisa} = \left(\frac{V_a}{V_a + K\,V_o/n} \right)^n \times 100\%$$

Pelarut yang sama, dibagi menjadi beberapa kali ekstraksi kecil, menarik lebih banyak zat daripada sekali ekstraksi besar.

- K Koefisien partisi (organik : air)
- V_a Volume lapisan air mL
- V_o Total pelarut organik mL
- n Banyaknya ekstraksi kali
- $\%\,\text{sisa}$ Zat yang tertinggal di air %

ZAT YANG TERTINGGAL DI AIR

29,4

%

sekali ekstraksi: coba bagi pelarutnya menjadi tiga bagian!

Setelah **1** kali ekstraksi, **70,588** % zat sudah pindah ke pelarut organik.

Cek satuan: mL ÷ mL: tanpa satuan, lalu × 100%

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-EKSTRAKSI-BERTAHAP

Kimia di sekitarmu

Pengolahan air PDAM

Air sungai diberi tawas agar kotoran menggumpal, diendapkan di bak besar, disaring melalui lapisan pasir, lalu diberi klorin untuk membunuh kuman. Empat langkah, empat sifat!

Laboratorium klinik

Darah diputar dalam sentrifus sampai terpisah menjadi plasma kekuningan di atas dan sel darah merah di bawah, lalu masing-masing diperiksa.

Pabrik gula tebu

Penguapan, kristalisasi dalam panci vakum, lalu sentrifugasi untuk memisahkan kristal gula dari tetes tebu (molase).

Penyulingan minyak atsiri

Nilam di Aceh, kayu putih di Buru, serai wangi, dan daun cengkeh disuling dengan uap air untuk parfum, obat gosok, dan pengusir nyamuk alami.

Kilang minyak

Menara fraksionasi memisahkan minyak mentah menjadi LPG, bensin, avtur, solar, oli, dan aspal berdasarkan titik didihnya.

Forensik dan BPOM

Kromatografi mengungkap tinta yang dipakai memalsukan dokumen, pewarna terlarang di jajanan, dan kadar obat dalam jamu yang dicampur bahan kimia obat.

Cek Cepat

Campuran minyak goreng dan air paling tepat dipisahkan dengan ...

- penyaringan
- corong pisah
- magnet
- kromatografi

Pada kromatografi kertas, noda bergerak 4,5 cm dan garis depan pelarut 9,0 cm dari garis start. Nilai R_f noda itu adalah ...

- 2,0
- 0,45
- 4,5
- 0,50

Pada distilasi, di manakah ujung termometer diletakkan?

- Sejajar lubang samping labu, tempat uap menuju kondensor
- Tercelup di dalam cairan yang mendidih
- Di ujung kondensor
- Di dalam labu penampung

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: pelangi dari spidol hitam

Bahan: kertas saring kopi atau tisu tebal, spidol hitam berbasis air (bukan spidol permanen), beberapa spidol warna lain, gelas bening, air, pensil, penggaris, penjepit jemuran atau sedotan, gunting. Opsional: alkohol 70% (antiseptik) sebagai pelarut kedua.

1. Potong kertas menjadi pita selebar ±3 cm dan sepanjang ±12 cm. Tarik garis start dengan **pensil** 2 cm dari ujung bawah.
2. Buat titik kecil tetapi pekat dengan spidol hitam di garis start. Ulangi untuk spidol lain di pita lain.
3. Isi gelas dengan air setinggi ±1 cm (harus di bawah garis start). Gantungkan pita dengan penjepit di bibir gelas sehingga ujung bawahnya tercelup.
4. Tunggu 10–15 menit tanpa digoyang. Angkat sebelum air mencapai ujung atas, lalu tandai garis depan air dengan pensil.
5. Keringkan, ukur jaraknya, dan hitung R_f setiap warna.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Alkohol 70% mudah terbakar: jauhkan dari kompor, lilin, dan korek api, pakai di ruangan berventilasi, dan jangan diminum. Hati-hati memakai gunting. Cuci tangan setelah selesai, dan buang sisa cairan ke wastafel dengan banyak air.

Pertanyaan: Pewarna apa saja yang tersembunyi di spidol hitam? Apakah urutan warnanya berubah bila air diganti alkohol 70%? Mengapa?

Tantangan Rumah: penjernih air dari botol bekas

Bahan: botol plastik bekas 1,5 L, kapas, arang kayu yang ditumbuk kasar (atau arang aktif akuarium), pasir halus, kerikil kecil, segelas air keruh (air dicampur sedikit tanah), gelas bening.

1. Minta orang dewasa memotong dasar botol. Balikkan botol (tutup di bawah) dan lubangi tutupnya beberapa kali dengan paku panas atau minta bantuan orang dewasa.
2. Susun dari bawah ke atas: kapas, arang, pasir halus, kerikil. Bilas susunannya dengan air bersih dulu sampai air yang keluar tidak hitam.
3. Tuang air keruh perlahan dan tampung air yang menetes. Bandingkan kejernihannya dengan air awal.

Keselamatan: pemotongan botol dan pelubangan tutup dilakukan orang dewasa. Air hasil saringan ini **bukan air minum** (kuman dan zat terlarut bisa lolos); gunakan untuk menyiram tanaman. Cuci tangan setelah memegang tanah dan arang.

Pertanyaan: Lapisan mana yang menahan butir besar, dan lapisan mana yang menahan butir halus? Mengapa arang bisa membuat air lebih jernih dan kurang berbau (petunjuk: arang punya banyak pori yang menyerap zat)?

RINGKASAN KILAT

Bab 3 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan bahwa setiap teknik pemisahan memanfaatkan **perbedaan sifat fisika** komponen campuran (ukuran partikel, kelarutan, titik didih, sifat magnet, massa jenis)
- memilih dan menyusun urutan teknik pemisahan (**penyaringan, dekantasi, sentrifugasi, magnet, penguapan, kristalisasi**) untuk campuran sehari-hari
- menjelaskan **distilasi sederhana, bertingkat, dan distilasi uap**, serta membaca dataran suhu pada kurva distilasi
- melakukan **kromatografi kertas** dan menghitung nilai R_f untuk mengenali zat warna, termasuk pewarna terlarang
- memakai **corong pisah, ekstraksi, dan sublimasi**, serta menguji kemurnian zat dari titik leleh dan titik didihnya

Istilah kunci

Campuran · Campuran homogen · Campuran heterogen · Residu · Filtrat · sentrifugasi · kristalisasi · Larutan jenuh · Kristalisasi · Distilasi · kondensor · destilat · distilasi bertingkat · kolom fraksionasi · Kromatografi · Fase diam

Rumus penting

$$\%\,\text{perolehan} = \frac{m_{\text{diperoleh}}}{m_{\text{awal}}} \times 100\%$$

Persen perolehan (rendemen). Berapa bagian zat yang berhasil kita selamatkan dari campuran, dinyatakan dalam persen.

$$m_{\text{NaCl}} = V \times \rho \times \frac{w}{100}$$

Garam dari air laut. Massa garam = volume air laut × massa jenisnya × kadar NaCl-nya.

$$R_f = \frac{d_{\text{noda}}}{d_{\text{pelarut}}}$$

Nilai Rf. Seberapa jauh noda ikut berlari, dibandingkan dengan jarak yang ditempuh pelarut.

$$\%\,\text{sisa} = \left(\frac{V_a}{V_a + K\,V_o/n}\right)^n \times 100\%$$

Sisa zat setelah ekstraksi bertahap. Pelarut yang sama, dibagi menjadi beberapa kali ekstraksi kecil, menarik lebih banyak zat daripada sekali ekstraksi besar.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Senyawa tidak dapat dipisahkan dengan cara fisika.
- Urutan langkah pemisahan menentukan hasil.
- Menguapkan sampai kering bukan selalu cara terbaik.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=3

🧩 Teka-teki untuk Bab 4

Laras mengukur noda pewarna pada kertas kromatografi: noda 4,65 cm, pelarut 7,50 cm, sehingga $R_f = 0{,}62$. Bima mengukur kertas yang sama dengan penggarisnya dan mendapat 4,6 cm dan 7,5 cm, sehingga $R_f = 0{,}613\ldots$. Siapa yang lebih benar? Seberapa yakin kita pada angka 0,62 itu, dan bagaimana ilmuwan menulis "kira-kira" dengan jujur?

▼ Intip petunjuk

Setiap pengukuran punya **ketidakpastian**. Penggaris berskala milimeter hanya bisa dibaca sampai ±0,05 cm. Akibatnya R_f Laras sebaiknya ditulis $0{,}62 \pm 0{,}01$, dan hasil Bima pun masih "sama" dalam batas ketidakpastian itu. Di Bab 4 kamu akan belajar angka penting, ketelitian, ketepatan, dan cara menuliskan ketidakpastian.

BAB 4 · DUNIA KIMIA

04 Pengukuran dalam Kimia: Angka yang Jujur

Timbangan dapur berkata 5 gram, neraca sekolah berkata 5,07 gram, dan keduanya tidak berbohong. Di bab ini kamu belajar membaca alat ukur seperti analis laboratorium dan menulis angka yang jujur tentang seberapa yakin kamu.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menyebutkan **besaran pokok SI** yang dipakai kimia dan mengubah suhu Celsius ke **kelvin**;
- mengonversi satuan berawalan (mg, µL, dm^3, nm, ppm) dan menulis bilangan dalam **notasi ilmiah**;
- menentukan jumlah **angka penting** dan membulatkan hasil perhitungan dengan benar;
- membedakan **ketepatan** dan **ketelitian**, membaca meniskus dan buret, serta menghitung ketidakpastian dan galat;
- menghitung **massa jenis** dan memakainya untuk meramal benda mengapung atau tenggelam, bahkan menguji keaslian emas.

LIMA GRAM ATAU 5,07 GRAM?

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Laras menulis massa garamnya 5,07 g. Berapa sebenarnya massa garam itu?

- Tepat 5,07 g, tidak lebih dan tidak kurang sedikit pun.
- Sekitar 5,06 g sampai 5,08 g; angka 7 di ujung adalah taksiran terbaik neraca.
- Antara 5 g dan 6 g, sama saja dengan hasil timbangan dapur.
- Tidak bisa diketahui, karena timbangan digital sering salah.

Jawabannya: sekitar 5,06–5,08 g. Tidak ada pengukuran yang sempurna. Neraca yang menampilkan dua desimal hanya yakin sampai ±0,01 g, jadi hasilnya ditulis 5,07 ± 0,01 g. Timbangan dapur yang berkata "5 g" berarti kira-kira 4 g sampai 6 g. Keduanya benar, tetapi neraca sekolah ±100 kali lebih teliti. Bab ini mengajarkan cara menulis "seberapa yakin" itu dengan angka.

4.1 Mengukur: angka, satuan, dan Sistem Internasional

Kimia adalah ilmu yang suka menimbang, menakar, dan mencatat. Resep obat, kadar gula darah, kandungan yodium dalam garam, dan mutu bensin semuanya bergantung pada pengukuran yang baik. Mengukur berarti **membandingkan** sesuatu dengan satuan yang sudah disepakati.

Bahasa sederhana · Bayangkan kamu mengukur panjang meja dengan jengkal: hasilnya 5 jengkal. Temanmu yang tangannya lebih besar mendapat 4 jengkal. Siapa yang benar? Supaya semua orang di dunia mendapat angka yang sama, ilmuwan sepakat memakai "jengkal" yang sama untuk semua orang, yaitu meter, kilogram, dan detik. Kesepakatan itu disebut satuan SI.

Hasil pengukuran selalu terdiri atas **angka dan satuan**. "Tambahkan garam 2" tidak bermakna: 2 gram? 2 sendok? 2 kilogram? Angka tanpa satuan bisa membuat masakan keasinan, atau lebih buruk lagi, obat yang salah dosis.

DEFINISI · BESARAN POKOK DAN SATUAN SI

Besaran pokok adalah besaran yang satuannya ditetapkan lebih dulu dan tidak diturunkan dari besaran lain. **Satuan SI** (Système International d'Unités) adalah sistem satuan yang disepakati seluruh dunia, dengan tujuh besaran pokok. Besaran lain, seperti volume dan massa jenis, disebut **besaran turunan** karena satuannya disusun dari satuan pokok.

Besaran pokok	Lambang	Satuan SI	Lambang satuan	Contoh di kimia
Panjang	l	meter	m	panjang ikatan, ukuran partikel (nm)
Massa	m	kilogram	kg	menimbang pereaksi (sering dalam gram)
Waktu	t	sekon	s	laju reaksi
Suhu termodinamika	T	kelvin	K	hukum gas, termokimia
Jumlah zat	n	mol	mol	menghitung partikel (Bab 17)
Kuat arus listrik	I	ampere	A	elektrolisis dan penyepuhan
Intensitas cahaya	I_v	kandela	cd	jarang dipakai di kimia

Kimiawan juga memakai beberapa satuan yang bukan SI tetapi diterima luas: **liter** (L) untuk volume, **gram** untuk massa kecil, dan **derajat Celsius** (°C) untuk suhu sehari-hari. Besaran **jumlah zat** diukur dalam **mol**: satu mol berisi $6{,}022 \times 10^{23}$ partikel. Kita akan berkenalan akrab dengan mol di Bab 17.

Suhu: Celsius dan kelvin

Apa yang sebenarnya diukur termometer? Partikel zat selalu bergerak: bergetar, berputar, dan berpindah tempat. **Suhu** menunjukkan rata-rata energi gerak partikel itu. Makin panas, makin "gelisah" partikelnya. Pada suhu terendah yang mungkin, **nol mutlak**, gerak partikel paling kecil dan energinya tidak bisa diturunkan lagi. Skala **kelvin** dimulai dari titik itu.

$$T\,(\mathrm{K}) = t\,(^\circ\mathrm{C}) + 273{,}15$$

RUMUS HIDUP

Celsius ke kelvin

$$T = t + 273{,}15$$

Suhu kelvin sama dengan suhu Celsius ditambah 273,15. Skala kelvin dimulai dari nol mutlak, sehingga tidak pernah negatif.

t Suhu Celsius °C

T Suhu mutlak K

SUHU MUTLAK

298,15

K

suhu kamar

25 °C = **298,15** K. Naik 1 °C sama dengan naik 1 K, karena besar "anak tangganya" sama.

Satuan Nusantara: ≈ 96% dari suhu tubuh · ≈ 1,1 × es mencair · ≈ 80% dari air mendidih

Cek satuan: °C + 273,15 → K (tanpa tanda derajat) ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-UKUR-KELVIN

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Kelvin ditulis tanpa tanda derajat: 298 K, bukan 298 °K. Ukuran satu "anak tangga" kelvin sama dengan satu derajat Celsius, jadi **kenaikan** 10 °C sama dengan kenaikan 10 K. Namun **suhu** 10 °C jelas tidak sama dengan 10 K (10 K itu −263 °C, jauh lebih dingin daripada kutub mana pun di Bumi).

TAMU DARI MASA LALU

Selama 130 tahun (1889–2019), massa satu kilogram ditentukan oleh sebuah silinder logam platina-iridium seukuran bola pingpong yang disimpan di bawah tiga sungkup kaca di Sèvres, dekat Paris. Masalahnya, setiap kali ditimbang dan dibandingkan dengan salinannya, ada selisih puluhan mikrogram: entah silinder itu berkurang, entah salinannya bertambah! Sejak **20 Mei 2019**, kilogram didefinisikan dari sebuah tetapan alam, yaitu tetapan Planck, sehingga tidak bergantung lagi pada benda apa pun. Pada hari yang sama, definisi kelvin, mol, dan ampere juga diperbarui dengan cara serupa.

KIMIA NUSANTARA · ONS, KATI, DAN PETUGAS TERA

Di pasar Indonesia, "satu ons" berarti 100 gram, padahal ons dalam sistem Inggris hanya ±28,35 gram. Pedagang rempah zaman dulu juga memakai **kati** (±0,6 kg) dan **pikul** (100 kati, ±60 kg) saat menimbang cengkih dan pala. Supaya pembeli tidak dirugikan, timbangan di pasar wajib **ditera ulang** secara berkala oleh petugas metrologi legal; timbangan yang lulus diberi tanda tera. Standar nasional satuan ukuran Indonesia dijaga oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN), agar 1 kilogram di Medan sama dengan 1 kilogram di Merauke.

4.2 Awalan dan konversi satuan

Kimiawan bekerja dari dunia yang sangat kecil (molekul berukuran nanometer) sampai yang sangat besar (pabrik pupuk berkapasitas jutaan ton). Supaya angkanya tidak kepanjangan, satuan diberi **awalan**, yaitu "kata pengali". Kilo berarti seribu, mili berarti seperseribu.

Awalan	Lambang	Pengali	Contoh di kimia dan sekitarmu
giga	G	10^{9}	daya pembangkit listrik besar (GW)
mega	M	10^{6}	energi pembakaran batu bara (MJ)
kilo	k	10^{3}	kg, km, kJ/mol
desi	d	10^{-1}	dm^3 (= 1 L)
senti	c	10^{-2}	cm^3 (= 1 mL)
mili	m	10^{-3}	mL, mg, mmol (cairan infus, dosis obat)
mikro	µ	10^{-6}	µL (pipet mikro), $\mu g/m^3$ (debu PM2,5)
nano	n	10^{-9}	nm (ukuran molekul, panjang gelombang cahaya)
piko	p	10^{-12}	pm (panjang ikatan dan jari-jari atom)

ATURAN · KESETARAAN VOLUME YANG WAJIB HAFAL

$$1\ \text{L} = 1\ \text{dm}^3 = 1.000\ \text{mL} = 1.000\ \text{cm}^3 \qquad 1\ \text{mL} = 1\ \text{cm}^3\ (= 1\ \text{cc}) \qquad 1\ \text{m}^3 = 1.000\ \text{L}$$

Gelas ukur di laboratorium memakai mL, buku IGCSE sering memakai cm^3 dan dm^3. Isinya sama, hanya namanya berbeda.

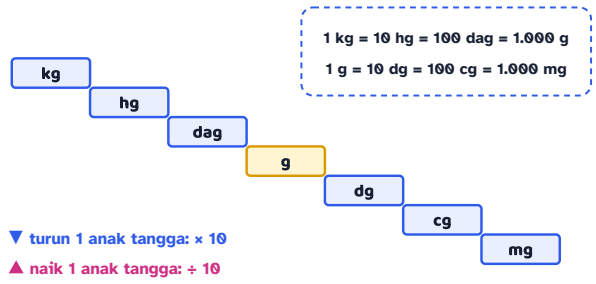
Tebak Dulu!

Sebuah bak kubus berukuran 1 m × 1 m × 1 m diisi penuh air. Berapa liter isinya?

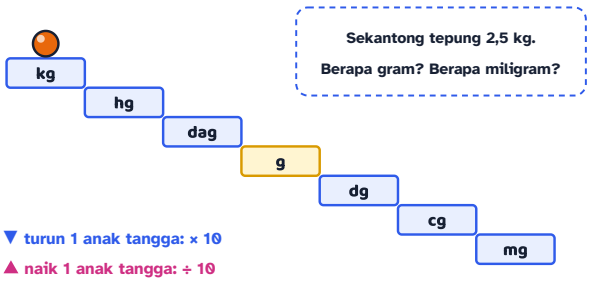
- 1 liter
- 100 liter
- 1.000 liter
- 1.000.000 liter

Jawabannya: 1.000 liter. Satu liter adalah kubus bersisi 1 dm (10 cm). Bak bersisi 1 m = 10 dm, jadi muat $10 \times 10 \times 10 = 1.000$ kubus satu liter, kira-kira 52 galon air isi ulang. Banyak orang menebak 100 karena lupa bahwa volume punya *tiga* arah.

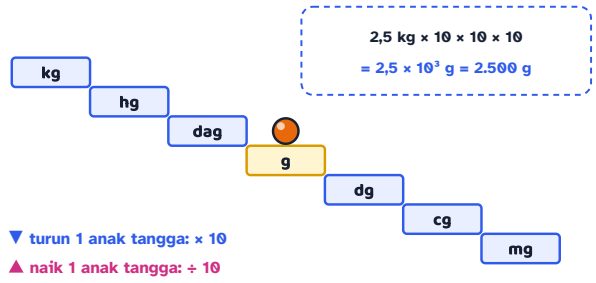
Anak SD di Indonesia sudah mengenal **tangga satuan**. Ternyata tangga itu adalah awalan SI yang disusun rapi. Ikuti kelereng jingga turun dan naik tangga:



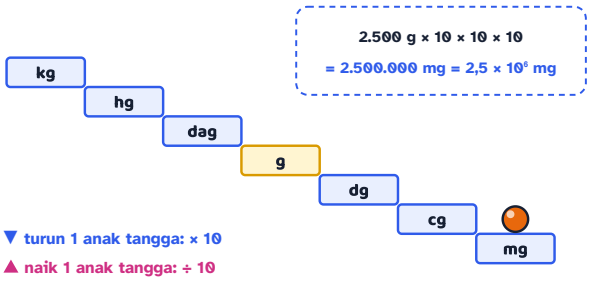
Langkah 1. Tangga satuan massa: kg, hg, dag, **g** (satuan dasar), dg, cg, mg. Setiap anak tangga berbeda 10 kali.



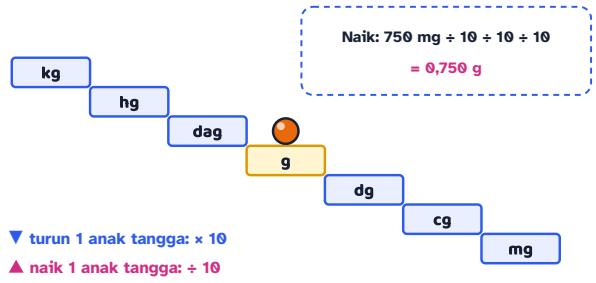
Langkah 2. Kelereng mulai dari 2,5 kg di puncak tangga. Kita ingin turun ke gram, lalu ke miligram.



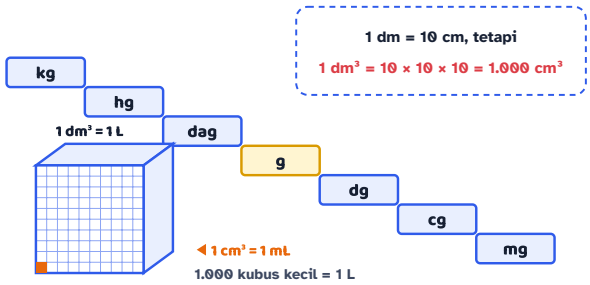
Langkah 3. Turun tiga anak tangga ke gram: kalikan $10 \times 10 \times 10 = 10^3$. Jadi 2,5 kg = 2.500 g. Inilah arti awalan *kilo* (10^3).



Langkah 4. Turun tiga anak tangga lagi ke miligram: 2.500 g × 1.000 = 2.500.000 mg = $2{,}5 \times 10^6$ mg. Angka yang panjang ini lebih rapi dalam notasi ilmiah (subbab 4.3).



Langkah 5. Naik tangga berarti membagi. Tablet obat 750 mg naik tiga anak tangga: 750 ÷ 1.000 = 0,750 g.



Langkah 6. Hati-hati dengan satuan kubik! Panjang 1 dm = 10 cm, tetapi volume 1 dm^3 berisi $10 \times 10 \times 10 = 1.000$ kubus 1 cm^3. Untuk satuan volume, setiap anak tangga panjang bernilai 1.000 kali.

Cara yang paling aman untuk mengonversi adalah **faktor konversi**: pecahan yang pembilang dan penyebutnya sama besar, sehingga nilainya 1. Mengalikan dengan 1 tidak mengubah besaran, hanya mengganti satuannya.

$$250\ \text{mL} \times \frac{1\ \text{L}}{1.000\ \text{mL}} = 0{,}250\ \text{L} \qquad 0{,}75\ \text{kg} \times \frac{1.000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}$$

TRIK KAK TIRTA

"Satuan mengecil, angka membesar." Mengubah kg ke g (satuan lebih kecil), angkanya pasti jadi lebih besar. Lalu tulis satuan di setiap langkah dan coret yang sama di atas dan di bawah garis pecahan. Kalau yang tersisa bukan satuan yang diminta, berarti faktornya terbalik.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Awalan ikut dipangkatkan bersama satuannya. Karena 1 cm = 10^{-2} m, maka 1 cm³ = $(10^{-2}\ \text{m})^3 = 10^{-6}$ m³, bukan 10^{-2} m³. Begitu pula 1 m² = 10.000 cm², bukan 100 cm².

CONTOH **Sirup obat batuk**

Dokter meresepkan sirup 7,5 mL tiga kali sehari selama 5 hari. Berapa liter sirup yang dibutuhkan? Cukupkah sebotol sirup 100 mL?

1. Total volume: $7{,}5\ \text{mL} \times 3 \times 5 = 112{,}5$ mL. (Angka 3 kali dan 5 hari adalah bilangan eksak hasil membilang.)
2. Ubah ke liter: $112{,}5\ \text{mL} \times \dfrac{1\ \text{L}}{1.000\ \text{mL}} = 0{,}1125$ L.
3. Bandingkan: 112,5 mL lebih besar daripada 100 mL.

Dibutuhkan 0,1125 L (112,5 mL), jadi satu botol 100 mL tidak cukup. Pakailah sendok takar 5 mL atau gelas takar bawaan obat, bukan sendok makan yang isinya ±15 mL.

ppm: untuk zat yang sangat sedikit

Kadar zat yang sangat kecil, misalnya fluorida dalam air minum atau yodium dalam garam dapur, dinyatakan dalam **ppm** (*parts per million*, bagian per sejuta). 1 ppm berarti 1 gram zat dalam 1.000.000 gram campuran, atau 1 mg zat dalam 1 kg campuran. Untuk larutan encer dalam air, 1 ppm ≈ 1 mg per liter, karena 1 L air bermassa ±1 kg.

RUMUS HIDUP **Kadar dalam ppm (bagian per sejuta)**

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}}\ (\text{mg})}{m_{\text{campuran}}\ (\text{kg})}$$

Berapa miligram zat terdapat di setiap kilogram campuran. Untuk air encer, 1 kg ≈ 1 L, jadi 1 ppm ≈ 1 mg/L.

m_{zat} Massa zat mg | m_{campuran} Massa campuran kg | ppm Kadar ppm

KADAR
1,5
ppm

🦷 **batas pedoman WHO untuk fluorida dalam air minum (1,5 mg/L)**

1,5 mg zat dalam **1** kg campuran = **1,5** ppm, yaitu **1,5 × 10⁻⁴** % massa.

Cek satuan: mg ÷ kg = mg/kg = ppm ✔ (sebab 1 kg = 10^6 mg)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-UKUR-PPM

⏱ ADU CEPAT **Konversi kilat: semuanya ke mL**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-4

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

1 L = 1.000 mL dan 1 cm^3 = 1 mL. Contoh: 0,25 L + 30 cm^3 = 250 + 30 = 280 mL.

4.3 Notasi ilmiah: menjinakkan angka raksasa dan angka mungil

Satu atom hidrogen bermassa 0,000000000000000000000000167 gram. Satu sendok teh air berisi sekitar 170.000.000.000.000.000.000.000 molekul. Menulis nol sebanyak itu melelahkan dan mudah salah hitung. Ilmuwan meringkasnya dengan **notasi ilmiah**.

DEFINISI · NOTASI ILMIAH (BENTUK BAKU)

Bilangan ditulis sebagai

$$a \times 10^{n} \qquad \text{dengan } 1 \leq a < 10 \text{ dan } n \text{ bilangan bulat}$$

Contoh: $0{,}000000000000000000000000167\ \text{g} = 1{,}67 \times 10^{-24}\ \text{g}$ dan $170.000.000.000.000.000.000.000 = 1{,}7 \times 10^{23}$.

Caranya: geser koma sampai tersisa satu angka bukan nol di depannya. Banyaknya lompatan menjadi pangkat n. Geser ke kiri (bilangan besar) membuat n positif; geser ke kanan (bilangan kurang dari 1) membuat n negatif.

Benda atau besaran	Angka biasa	Notasi ilmiah
Bilangan Avogadro (partikel per mol)	602.214.076.000.000.000.000.000	$6{,}022 \times 10^{23}$
Molekul air dalam satu sendok teh (±5 mL)	±170.000.000.000.000.000.000.000	$1{,}7 \times 10^{23}$
Massa Bumi (kg)	5.970.000.000.000.000.000.000.000	$5{,}97 \times 10^{24}$
Diameter atom hidrogen (m)	±0,0000000001	1×10^{-10}
Massa satu atom hidrogen (g)	0,000000000000000000000000167	$1{,}67 \times 10^{-24}$
Muatan satu elektron (C)	0,00000000000000000160	$1{,}60 \times 10^{-19}$

ATURAN · BERHITUNG DENGAN PANGKAT SEPULUH

$$(a \times 10^{m})(b \times 10^{n}) = (a \cdot b) \times 10^{m+n} \qquad \frac{a \times 10^{m}}{b \times 10^{n}} = \frac{a}{b} \times 10^{m-n}$$

Contoh: $(3{,}0 \times 10^{4})(2{,}0 \times 10^{-7}) = 6{,}0 \times 10^{-3}$. Bila hasil a keluar dari rentang 1–10, rapikan lagi: $16{,}7 \times 10^{20} = 1{,}67 \times 10^{21}$.

TRIK KAK TIRTA · TOMBOL EXP DI KALKULATOR

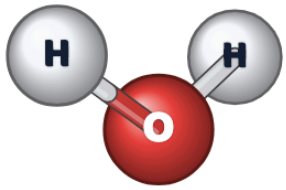
Untuk memasukkan $6{,}02 \times 10^{23}$, tekan **6.02 EXP 23** (tombolnya bisa bernama EXP, EE, atau ×10ˣ). Jangan menekan "× 10 EXP 23", karena kalkulator akan membacanya sebagai $6{,}02 \times 10 \times 10^{23}$, sepuluh kali terlalu besar! Kesalahan ini sangat sering terjadi saat ujian.

KIMO BERTANYA: SEKECIL APA ATOM ITU?

Diameter atom sekitar 10^{-10} m (0,1 nm). Bila sebuah atom diperbesar menjadi sebesar kelereng (1 cm), pembesarannya 10^{8} kali. Dengan pembesaran yang sama, kelereng itu akan selebar 10^{6} m = 1.000 km, kira-kira sejauh Jakarta ke Denpasar!

MOLEKUL 3D

Penggaris pikometer: ukur molekul sungguhan



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Air H_2O Mr ≈ 18,02 PubChem ↗

Molekul bengkok dengan sudut ±104,5°. Dua pasang elektron bebas pada O membuatnya polar dan mampu berikatan hidrogen.

Ketuk dua atom yang berikatan untuk mengukur panjang ikatannya (ditampilkan dalam pm dan Å; 1 Å = 100 pm = 10^{-10} m). Panjang ikatan O–H pada air sekitar 97 pm. Tantangan: tulis panjang ikatan C=O pada CO_2 dalam **meter** dengan notasi ilmiah. Berapa kali lebih kecil dari tebal rambut (±7×10^{-5} m)?

KERJAKAN BERSAMA

Berapa molekul dalam setetes air?

Setetes air bervolume 0,050 mL dan bermassa 0,050 g. Massa satu mol air 18,0 g, dan satu mol berisi $6{,}02 \times 10^{23}$ molekul. Berapa molekul air dalam setetes?

1. Jumlah mol: $n = \dfrac{0{,}050\ \text{g}}{18{,}0\ \text{g/mol}} = 0{,}00278 = 2{,}78 \times 10^{-3}$ mol.
2. Kalikan dengan bilangan Avogadro: $(2{,}78 \times 10^{-3})(6{,}02 \times 10^{23}) = 16{,}7 \times 10^{-3+23} = 16{,}7 \times 10^{20}$.
3. Rapikan bentuk baku: $16{,}7 \times 10^{20} = 1{,}67 \times 10^{21}$.
4. Data 0,050 hanya punya 2 angka penting (subbab 4.4), jadi hasil akhir dibulatkan: $1{,}7 \times 10^{21}$.

Setetes air berisi ±$1{,}7 \times 10^{21}$ molekul, cukup untuk dibagikan ±6 triliun molekul kepada setiap penduduk Indonesia!

4.4 Angka penting: angka yang boleh dipercaya

Coba ukur panjang pensil dengan penggaris berskala milimeter. Ujung pensil jatuh di antara 12,3 cm dan 12,4 cm, kira-kira di tengahnya. Kamu **yakin** pada angka 1, 2, dan 3, lalu **menaksir** angka terakhir: 12,35 cm. Semua angka yang pasti ditambah satu angka taksiran disebut **angka penting** (AP). Angka terakhir itu disebut **angka taksiran**.

Bahasa sederhana · Angka penting adalah angka yang benar-benar kita ukur. Kalau timbanganmu hanya bisa menunjukkan gram bulat, menulis "5,2836 gram" sama saja dengan mengarang. Tulislah hanya angka yang memang ditunjukkan alatmu.

Tebak Dulu!

Laras menimbang 0,0050 g serbuk vitamin dengan neraca analitik. Berapa angka penting pada 0,0050?

1, karena hanya angka 5 yang bukan nol.

2, yaitu angka 5 dan nol di belakangnya.

4, karena nol-nol di depan juga ditulis.

5, semua angka yang tertulis dihitung.

Jawabannya: 2. Nol di depan (0,00…) hanya penunjuk letak koma, bukan hasil ukur, jadi tidak penting. Lihat dalam notasi ilmiah: $5{,}0 \times 10^{-3}$ g, nol-nol depan lenyap. Namun nol di *belakang* angka 5 sengaja ditulis Laras untuk menyatakan bahwa neracanya yakin sampai digit itu: $5{,}0 \times 10^{-3}$ punya 2 AP. Menulis 0,005 (1 AP) berarti membuang informasi!

ATURAN · MENGHITUNG ANGKA PENTING

1. **Semua angka bukan nol penting.** 2,74 → 3 AP.
2. **Nol di antara angka bukan nol penting.** 1,005 → 4 AP; 20,3 → 3 AP.
3. **Nol di depan tidak penting** (hanya penunjuk koma). 0,0052 → 2 AP.
4. **Nol di belakang pada bilangan desimal penting.** 5,070 → 4 AP; 0,0050 → 2 AP.
5. **Nol di belakang pada bilangan bulat tanpa koma meragukan.** 1500 bisa 2, 3, atau 4 AP. Tulislah $1{,}5 \times 10^{3}$ (2 AP) atau $1{,}50 \times 10^{3}$ (3 AP) supaya jelas.
6. **Bilangan eksak punya AP tak terhingga**: hasil membilang (12 telur, 3 kali ulangan) dan definisi (1 L = 1.000 mL; 273,15 dalam konversi kelvin).

TRIK KAK TIRTA · ATURAN SABANG–MERAUKE

Tulis bilangannya seperti peta Indonesia. **Ada koma?** Berangkatlah dari **Sabang** (kiri). **Tidak ada koma?** Berangkatlah dari **Merauke** (kanan). Lewati semua nol sampai bertemu angka bukan nol pertama; dari situ, semua angka sampai ujung seberang adalah angka penting. Contoh: 0,00340 (ada koma, dari kiri) → 3, 4, 0 = 3 AP. 25.000 (tanpa koma, dari kanan) → 2, 5 = 2 AP.

Angka penting dalam perhitungan

Kalkulator tidak tahu dari alat apa angkamu berasal. Ia dengan senang hati memberi sepuluh digit, padahal sebagian besar hanyalah "sampah digit". Dua aturan berikut menjaga hasil perhitungan tetap jujur:

ATURAN · PEMBULATAN HASIL PERHITUNGAN

- **Perkalian dan pembagian:** hasil memiliki jumlah **angka penting** sebanyak data yang AP-nya paling sedikit. $2{,}5 \times 3{,}42 = 8{,}55 \rightarrow 8{,}6$ (2 AP).
- **Penjumlahan dan pengurangan:** hasil memiliki jumlah **angka di belakang koma** sebanyak data yang desimalnya paling sedikit. $12{,}52 + 3{,}7 = 16{,}22 \rightarrow 16{,}2$ (1 desimal).
- **Cara membulatkan:** bila angka pertama yang dibuang kurang dari 5, angka terakhir tetap; bila 5 atau lebih, angka terakhir naik satu. Bulatkan **di akhir** saja; simpan satu-dua angka tambahan pada langkah antara.

Mengapa begitu? Rantai hanya sekuat mata rantai terlemahnya

Misalkan luas sebuah ubin dihitung dari panjang 2,5 cm (penggaris kasar, ±0,1 cm) dan lebar 3,42 cm (jangka sorong, ±0,01 cm). Panjang sebenarnya bisa 2,4 sampai 2,6 cm. Maka luas sebenarnya bisa $2{,}4 \times 3{,}42 = 8{,}2$ cm² sampai $2{,}6 \times 3{,}42 = 8{,}9$ cm². Angka kedua (yang di belakang koma) saja sudah goyah! Menulis 8,55 cm² berarti mengaku tahu sampai perseratus, padahal persepuluhnya pun belum pasti. Hasil yang jujur: 8,6 cm².

Pada penjumlahan, yang penting adalah *letak* ketidakpastian. Bila 3,7 g hanya pasti sampai persepuluh gram, menambahkan 12,52 g (pasti sampai perseratus) tidak bisa membuat jumlahnya pasti sampai perseratus.

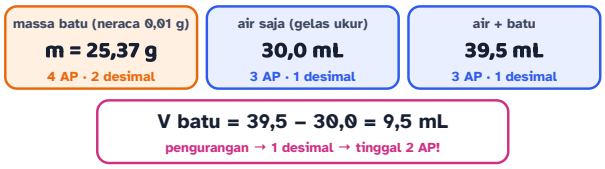
Catatan: sebagian buku memakai aturan "genap terdekat" untuk angka yang dibuang tepat 5 (2,25 → 2,2; 2,35 → 2,4). Ikutilah aturan yang dipakai gurumu atau soal.



Langkah 1. Bima mengukur massa jenis sebutir batu. Massa ditimbang dengan neraca 0,01 g; volume diukur dengan menaikkan air di gelas ukur.



Langkah 2. Hitung angka penting setiap data: 25,37 g punya 4 AP; 30,0 mL dan 39,5 mL masing-masing 3 AP dengan 1 desimal.



Langkah 3. Volume batu = 39,5 − 30,0 = 9,5 mL. Pengurangan mengikuti desimal paling sedikit (1 desimal), sehingga hasilnya hanya punya **2 AP**. Pengurangan dua angka yang berdekatan "memakan" angka penting!



Langkah 4. Kalkulator menghitung $\rho = 25{,}37/9{,}5$ dan menampilkan 2,670526316. Sepuluh digit, tetapi apakah semuanya bermakna?



Langkah 5. Pembagian mengikuti AP paling sedikit, yaitu 2 AP (dari 9,5). Angka pertama yang dibuang adalah 7 (≥ 5), jadi 2,6 dibulatkan ke atas: $\rho = 2{,}7$ g/mL.



Langkah 6. Hasil 2,7 g/mL cocok dengan batuan granit (±2,6–2,7 g/mL). Ketidakpastian terbesar datang dari volume yang kecil. Mau lebih teliti? Pakai gelas ukur yang lebih kecil atau ukur beberapa batu sekaligus.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Kalkulator tidak mengenal angka penting. Hasil 2,670526316 bukan berarti hasilmu teliti sampai sepersemiliar; tulis hanya sebanyak yang dibenarkan data. Sebaliknya, jangan pula membuang nol yang bermakna: bila neraca menampilkan 5,00 g, tulis 5,00 g, bukan 5 g.

CONTOH

Hitung angka pentingnya

Tentukan jumlah angka penting: (a) 0,00340 g (b) 205,0 mL (c) $6{,}02 \times 10^{23}$ (d) 36 siswa di kelas.

1. (a) Nol depan tidak penting; 3, 4, dan nol belakang (ada koma) penting → **3 AP**.
2. (b) Nol di antara 2 dan 5 penting, nol belakang setelah koma juga penting → **4 AP**.
3. (c) Dalam notasi ilmiah, hitung angka di depan saja: 6, 0, 2 → **3 AP**. Pangkat sepuluh tidak dihitung.
4. (d) Hasil membilang adalah bilangan eksak → AP **tak terhingga**; tidak membatasi perhitungan.

3 AP, 4 AP, 3 AP, dan tak terhingga.

KERJAKAN BERSAMA

Bulatkan hasil hitunganmu

Tulis hasil berikut dengan angka penting yang benar: (a) 12,52 g gula + 3,7 g garam; (b) 0,0250 mol × 58,44 g/mol; (c) volume balok 3,0 cm × 2,15 cm × 1,05 cm.

1. (a) Penjumlahan: 12,52 + 3,7 = 16,22. Desimal paling sedikit = 1 (dari 3,7) → **16,2 g**.
2. (b) Perkalian: 0,0250 (3 AP) × 58,44 (4 AP) = 1,461. AP paling sedikit = 3 → **1,46 g**.
3. (c) Perkalian: 3,0 (2 AP) × 2,15 × 1,05 = 6,7725. AP paling sedikit = 2 → **6,8 cm³**.

16,2 g; 1,46 g; 6,8 cm³. Perhatikan: penjumlahan melihat desimal, perkalian melihat jumlah AP.

ADU CEPAT

Berburu angka penting

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-4

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Nol di depan tidak penting, nol di antara angka penting. Dalam notasi ilmiah, hitung angka di depan × 10 saja.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ANGKA PENTING PADA LOGARITMA (PH)

Untuk logaritma berlaku aturan khusus: **jumlah angka di belakang koma pada hasil logaritma sama dengan jumlah AP pada bilangan aslinya**. Angka di depan koma hanya menyatakan pangkat sepuluh, mirip nol-nol di depan yang tidak penting.

Contoh: $[\mathrm{H}^+] = 2{,}5 \times 10^{-3}$ mol/L (2 AP). $\mathrm{pH} = -\log(2{,}5 \times 10^{-3}) = 2{,}60206\ldots$ → ditulis **2,60** (2 desimal). Sebaliknya, pH 7,4 darah (1 desimal) berarti $[\mathrm{H}^+]$ hanya diketahui sampai 1 AP: 4×10^{-8} mol/L.

4.5 Ketepatan, ketelitian, galat, dan ketidakpastian

Bayangkan empat pemain melempar panah ke papan sasaran. Ada yang panahnya rapat bergerombol di tengah, ada yang rapat tetapi semuanya di pojok, ada yang berserakan di sekitar tengah, dan ada yang berserakan di mana-mana. Pengukuran di laboratorium persis seperti itu: setiap hasil ukur adalah satu panah, dan pusat sasaran adalah **nilai sebenarnya**.

DEFINISI · KETEPATAN DAN KETELITIAN

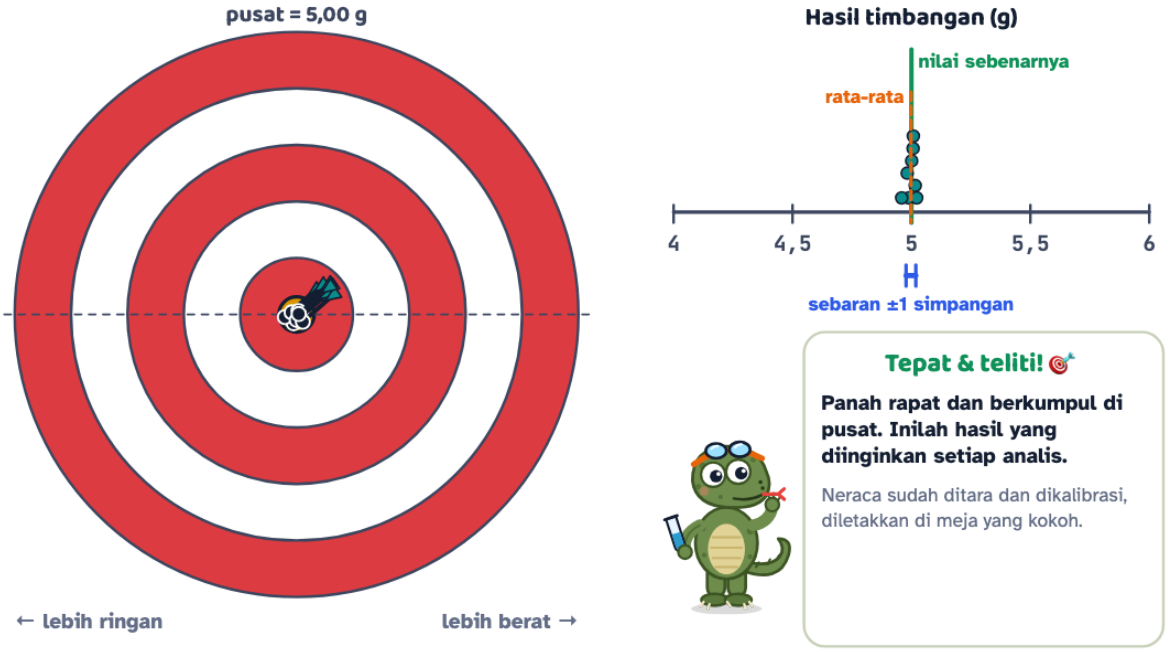
- **Ketepatan** (akurasi, *accuracy*): seberapa dekat hasil pengukuran dengan **nilai sebenarnya**. Panah dekat pusat sasaran.
- **Ketelitian** (presisi, *precision*): seberapa dekat hasil pengukuran **berulang satu sama lain**. Panah bergerombol rapat, di mana pun letaknya. Skala terkecil alat (mis. "neraca dengan ketelitian 0,01 g") menentukan seberapa teliti hasil yang mungkin dicapai.

AWAS JEBAKAN

Di beberapa buku, kata "ketelitian" dan "ketepatan" dipakai dengan arti yang tertukar. Supaya tidak bingung, pegang istilah internasionalnya: **akurasi** (*accuracy*) = dekat nilai sebenarnya, **presisi** (*precision*) = hasil berulang saling berdekatan. Hasil bisa presisi tetapi tidak akurat!

LAB MINI **Papan Panah: tepat, teliti, atau keduanya?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-4



Panah	Rata-rata	Sebaran (simpangan baku)	Galat rata-rata	Kesimpulan
8	4,998 g	0,021 g	-0,002 g	tepat & teliti

Setiap panah adalah satu kali menimbang garam yang massa sebenarnya 5,00 g. Pilih skenario, lalu tekan **Lempar 10**. Coba buat empat pola: tepat dan teliti, teliti tetapi tidak tepat, tepat tetapi tidak teliti, serta tidak keduanya. Galat mana yang hilang bila kamu melempar lebih banyak dan merata-ratakan?

Penyimpangan hasil ukur dari nilai sebenarnya disebut **galat** (*error*). Ada dua jenis yang wataknya sangat berbeda:

- **Galat sistematik** menggeser semua hasil **ke arah yang sama**. Contoh: neraca belum ditara (massa kertas ikut tertimbang), termometer yang angkanya selalu 1 °C terlalu tinggi, atau selalu membaca meniskus dari atas. Galat ini merusak **ketepatan** dan **tidak hilang** walau pengukuran diulang seribu kali. Obatnya: kalibrasi alat dan perbaiki cara kerja.
- **Galat acak** membuat hasil **berserakan ke dua arah** secara tidak terduga. Contoh: getaran meja, angin dari kipas, taksiran digit terakhir. Galat ini merusak **ketelitian** dan bisa **dikurangi** dengan mengulang pengukuran lalu merata-ratakan.

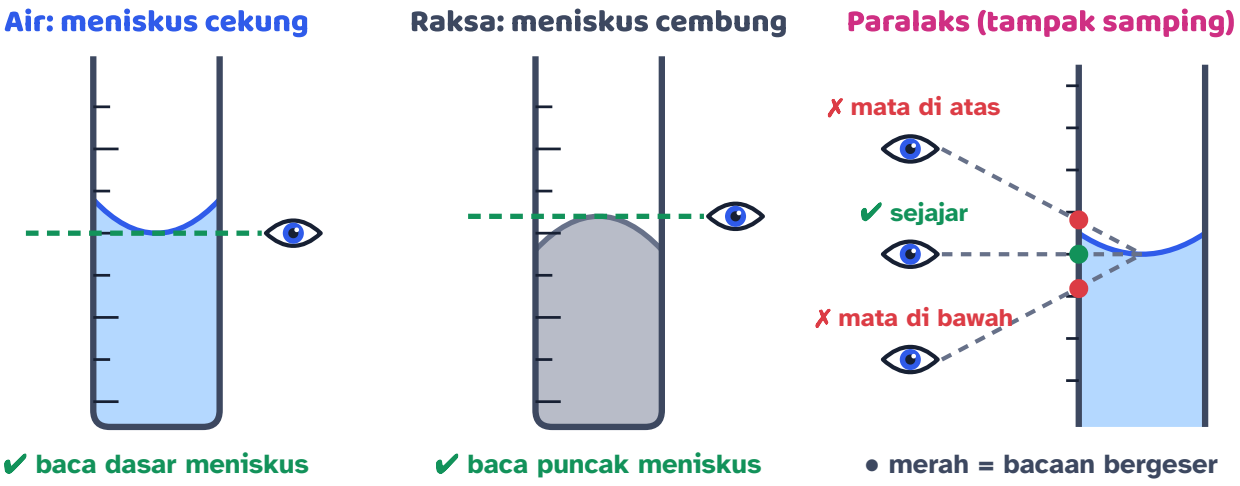
Karena galat tidak pernah nol, setiap hasil ukur ditulis bersama **ketidakpastian**nya: $x \pm \Delta x$. Untuk alat berskala (analog) seperti gelas ukur, ketidakpastian biasanya **setengah skala terkecil**. Untuk alat digital, ketidakpastiannya **satu digit terakhir**.

Alat	Skala terkecil	Ketidakpastian	Contoh catatan
Gelas kimia 250 mL	garis kasar tiap 50 mL	±5% (hanya perkiraan)	±200 mL
Gelas ukur 100 mL	1 mL	±0,5 mL	52,5 mL

Gelas ukur 10 mL	0,2 mL	±0,1 mL	7,4 mL
Buret 50 mL	0,1 mL	±0,05 mL per bacaan	23,45 mL
Pipet volume 25 mL (kelas A)	satu garis tanda	±0,03 mL	25,00 mL
Labu ukur 250 mL (kelas A)	satu garis tanda	±0,12 mL	250,0 mL
Timbangan dapur digital	1 g	±1 g	5 g
Neraca analitik	0,0001 g	±0,0001 g	5,0713 g
Termometer kaca	1 °C	±0,5 °C	25,5 °C

Membaca meniskus tanpa tertipu

Permukaan cairan di dalam tabung sempit tidak datar, tetapi melengkung. Lengkungan ini disebut **meniskus**. Di tingkat partikel, molekul air lebih tertarik ke kaca (adhesi) daripada ke sesamanya, sehingga air "memanjat" dinding dan permukaannya **cekung**. Atom raksa lebih tertarik ke sesamanya (kohesi), sehingga permukaannya **cembung**. Mata yang tidak sejajar membuat bacaan bergeser; galat ini disebut **paralaks**.

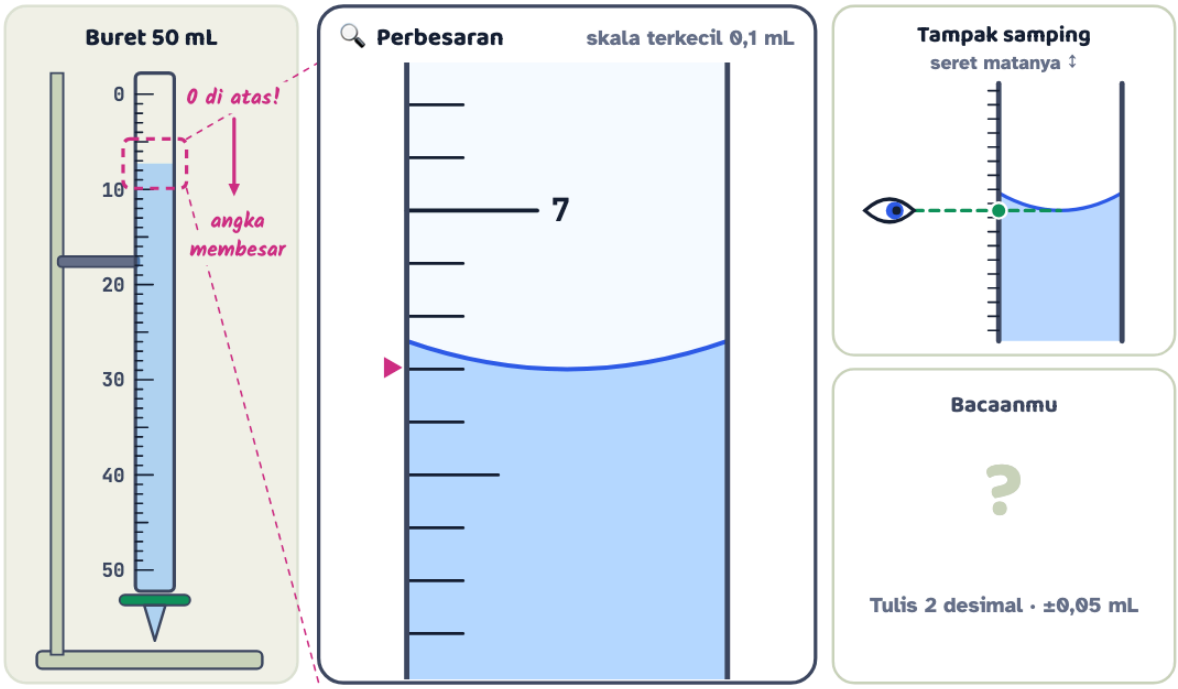


Air dibaca di dasar meniskus, raksa di puncaknya, dan mata selalu sejajar dengan permukaan cairan. Pada gelas ukur (angka membesar ke atas), mata di atas membuat bacaan terlalu besar dan mata di bawah membuatnya terlalu kecil.

LAB MINI

Detektif Meniskus: baca skala seperti analis

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-4



Skala terkecil	Dibaca sampai	Posisi mata	Nilai sebenarnya
0,1 mL	±0,05 mL (2 desimal)	sejajar ✔	rahasia

Cairan baru diisi ke buret 50 mL. Baca dasar meniskus dengan mata sejajar, ketik bacaanmu, lalu tekan ✔ Periksa bacaanku.

Pilih alat, baca dasar meniskus di jendela perbesaran, ketik bacaanmu (lengkap dengan angka taksiran!), lalu tekan ✔ **Periksa bacaanku**. Buret dibaca sampai 0,05 mL terdekat dengan dua desimal; gelas ukur 10 mL sampai 0,1 mL; gelas ukur 100 mL sampai 0,5 mL. Lalu seret mata di "tampak samping" ke atas dan ke bawah: ke mana bacaan bergeser? Mengapa arahnya terbalik pada buret?

RUMUS HIDUP

Persentase ketidakpastian

$$\%\,\text{ketidakpastian} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

Ketidakpastian alat tetap, tetapi persentasenya mengecil bila yang diukur makin besar. Karena itu titrasi dirancang agar volume titran sekitar 20–25 mL.

- Δx Ketidakpastian mutlak mL
- x Besaran yang diukur mL
- % Ketidakpastian relatif %

KETIDAKPASTIAN RELATIF

0,42

%

🎯 **di bawah 0,5%: mutu analisis volumetri**

(**24 ± 0,1**) mL berarti ketidakpastian **0,42** %.

Cek satuan: mL ÷ mL × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-UKUR-KETIDAKPASTIAN

KERJAKAN BERSAMA

Membaca buret saat titrasi

Pada titrasi cuka dapur, bacaan buret awal 0,50 mL dan bacaan akhir 23,35 mL. Setiap bacaan memiliki ketidakpastian ±0,05 mL. Tentukan volume titran beserta ketidakpastian mutlak dan persennya.

1. Volume titran = bacaan akhir − bacaan awal = 23,35 − 0,50 = 22,85 mL.
2. Dua bacaan, masing-masing ±0,05 mL. Pada pengurangan, ketidakpastian mutlak **dijumlahkan**: ±0,10 mL.
3. Persentase ketidakpastian = $\frac{0{,}10}{22{,}85} \times 100\% = 0{,}44\%$.

Volume titran = 22,85 ± 0,10 mL (±0,44%). Ingat, angka buret ditulis dua desimal dengan angka terakhir 0 atau 5. Angka buret membesar ke bawah, kebalikan dari gelas ukur.

RUMUS HIDUP **Galat relatif (%)**

$$\text{galat} = \frac{|x_{\text{ukur}} - x_{\text{benar}}|}{x_{\text{benar}}} \times 100\%$$

Seberapa jauh hasilmu meleset dari nilai sebenarnya, dalam persen. Makin kecil galatnya, makin tepat (akurat) pengukuranmu.

x_{ukur} Hasil pengukuran

x_{benar} Nilai sebenarnya (nilai buku)

galat Galat relatif %

GALAT RELATIF

3,63

%

👍 **galat 1–5%: cukup baik untuk praktikum sekolah**

Hasilmu meleset **0,7** dari **19,3**, yaitu **3,63** % **(terlalu kecil)**.

Cek satuan: satuan saling mencoret → persen ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-UKUR-GALAT

MITOS

"Makin banyak angka di belakang koma, makin benar hasilnya."

FAKTA

Angka harus jujur sesuai alat. Menulis ρ = 2,670526 g/mL dari volume yang hanya pasti ±0,5 mL berarti mengarang digit. Ketepatan ditentukan alat dan cara kerja, bukan banyaknya digit.

MITOS

"Timbangan digital pasti tepat, kan angkanya digital."

FAKTA

Digital bisa sangat teliti tetapi salah semua: lupa tara, belum dikalibrasi, atau diletakkan miring. Itulah sebabnya timbangan pasar pun wajib ditera ulang.

MITOS

"Mengulang pengukuran menghilangkan semua galat."

FAKTA

Merata-ratakan hanya mengurangi **galat acak**. Galat sistematik, seperti lupa tara atau selalu membaca dari atas, tetap ada berapa kali pun diulang.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

RAMBATAN KETIDAKPASTIAN

Bila hasil dihitung dari beberapa data, ketidakpastiannya ikut "merambat". Aturan sederhana yang dipakai IB Chemistry:

- **Penjumlahan dan pengurangan:** jumlahkan ketidakpastian **mutlak**. $(39{,}5 \pm 0{,}5) - (30{,}0 \pm 0{,}5) = 9{,}5 \pm 1{,}0$ mL.
- **Perkalian dan pembagian:** jumlahkan ketidakpastian **persen**. Untuk batu di animasi tadi: $m = 25{,}37 \pm 0{,}01$ g (0,04%) dan $V = 9{,}5 \pm 1{,}0$ mL (10,5%), sehingga ρ punya ketidakpastian ±10,6%: $\rho = 2{,}67 \pm 0{,}28 \rightarrow 2{,}7 \pm 0{,}3$ g/mL.
- **Pengukuran berulang:** laporkan rata-rata ± setengah rentang. Titrasi 24,35; 24,40; 24,30 mL → $24{,}35 \pm 0{,}05$ mL.

Ketidakpastian ditulis dengan 1 angka penting, dan nilai utamanya dibulatkan pada desimal yang sama. Bandingkan ketidakpastian dengan galat: bila galat relatif lebih besar daripada persentase ketidakpastian, pasti ada galat sistematik yang belum disadari.

4.6 Massa jenis: mengapa sesuatu mengapung atau tenggelam

Mana yang lebih berat, 1 kg kapas atau 1 kg besi? Tentu sama-sama 1 kg! Bedanya, kapas butuh tempat yang jauh lebih luas. Besaran yang membandingkan massa dengan ruang yang ditempati disebut **massa jenis** (densitas).

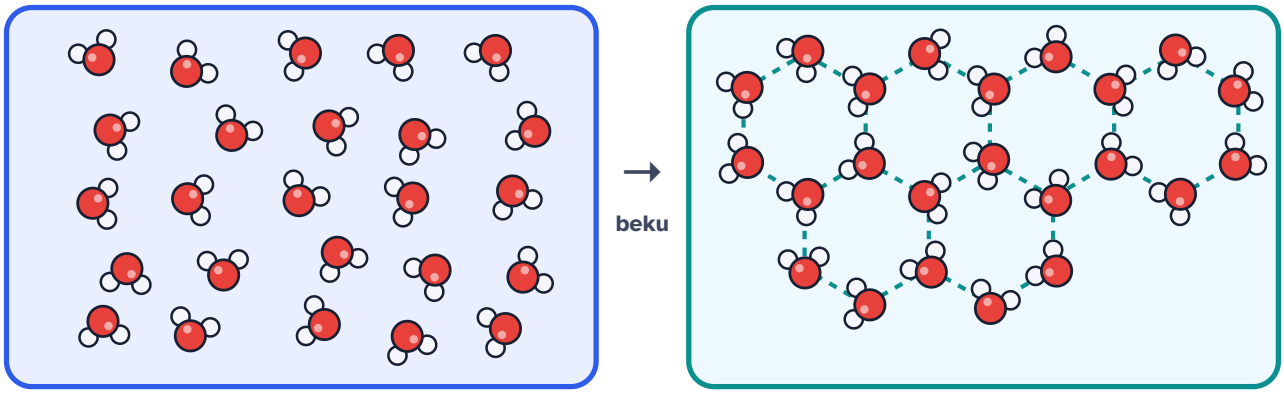
RUMUS · MASSA JENIS

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ (dibaca "rho") = massa jenis, m = massa, V = volume. Satuan yang lazim di kimia: g/cm³ = g/mL = kg/L. Satuan SI-nya kg/m³, dengan 1 g/cm³ = 1.000 kg/m³.

Di tingkat partikel, massa jenis bergantung pada dua hal: **seberapa berat partikelnya** dan **seberapa rapat susunannya**. Atom emas jauh lebih berat daripada atom aluminium dan tersusun rapat, sehingga emas tujuh kali

lebih rapat daripada aluminium. Contoh yang paling ajaib adalah es: molekulnya sama dengan air, tetapi susunannya lebih renggang.



Air cair: 1,00 g/cm³
25 molekul, rapat dan acak

Es: 0,92 g/cm³
23 molekul, jaringan heksagon berongga

Ruang yang sama, isi berbeda. Dalam es, setiap molekul air terkunci dalam jaringan heksagon (garis putus-putus = ikatan hidrogen) yang berongga, sehingga jumlah molekul per cm³ ±8% lebih sedikit. Karena itu es lebih ringan per volume dan mengapung di atas es teh.

Aturan mengapung sangat sederhana: benda **mengapung** bila massa jenisnya lebih kecil daripada cairan, dan **tenggelam** bila lebih besar. Minyak goreng (±0,92 g/mL) mengapung di atas kuah sayur, es (0,92 g/cm³) mengapung di air, sedangkan paku besi (7,87 g/cm³) langsung tenggelam.

Zat (±25 °C)	Massa jenis (g/cm³)	Di dalam air…
Bensin	±0,72–0,77	mengapung (itu sebabnya api bensin tidak boleh disiram air)
Etanol	0,79	bercampur
Minyak goreng	±0,92	mengapung
Es	0,92	mengapung
Air murni	1,00 (tepatnya 0,997)	pembanding
Air laut	±1,025	sedikit lebih rapat daripada air tawar
Aluminium	2,70	tenggelam
Besi	7,87	tenggelam
Tembaga	8,96	tenggelam

Perak	10,5	tenggelam
Raksa	13,5	tenggelam (besi justru mengapung di atas raksa!)
Emas	19,3	tenggelam

Tebak Dulu!

Dua kaleng minuman bersoda berukuran sama dimasukkan ke ember air: satu versi biasa (bergula), satu versi tanpa gula. Apa yang biasanya terjadi?

Keduanya mengapung, karena di dalamnya ada gas.

Keduanya tenggelam, karena kaleng terbuat dari logam.

Versi bergula tenggelam, versi tanpa gula mengapung.

Versi tanpa gula tenggelam, karena pemanis buatannya lebih berat.

Jawabannya: versi bergula tenggelam. Sekaleng minuman bergula berisi puluhan gram gula terlarut, sedangkan pemanis buatan hanya diperlukan beberapa ratus miligram. Volume kalengnya sama, tetapi massanya berbeda, sehingga massa jenis keseluruhan kaleng bergula sedikit di atas 1 g/mL dan kaleng tanpa gula sedikit di bawahnya. Selisih kecil itu cukup menentukan nasibnya!

RUMUS HIDUP

Massa jenis

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Massa jenis adalah massa setiap satu satuan volume: berapa gram 'dijejalkan' ke dalam setiap sentimeter kubik.

m Massa g | V Volume cm^3 | ρ Massa jenis g/cm^3

MASSA JENIS

19,3

g/cm^3

⚓ **lebih rapat daripada air: tenggelam** | 🥇 **cocok dengan emas murni (19,3 g/cm³)**

193 g dalam **10** cm^3 → ρ = **19,3** g/cm^3 = **19.300** kg/m^3.

Cek satuan: g ÷ cm^3 = g/cm^3 ✔ (1 g/cm^3 = 1.000 kg/m^3)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-UKUR-MASSA-JENIS

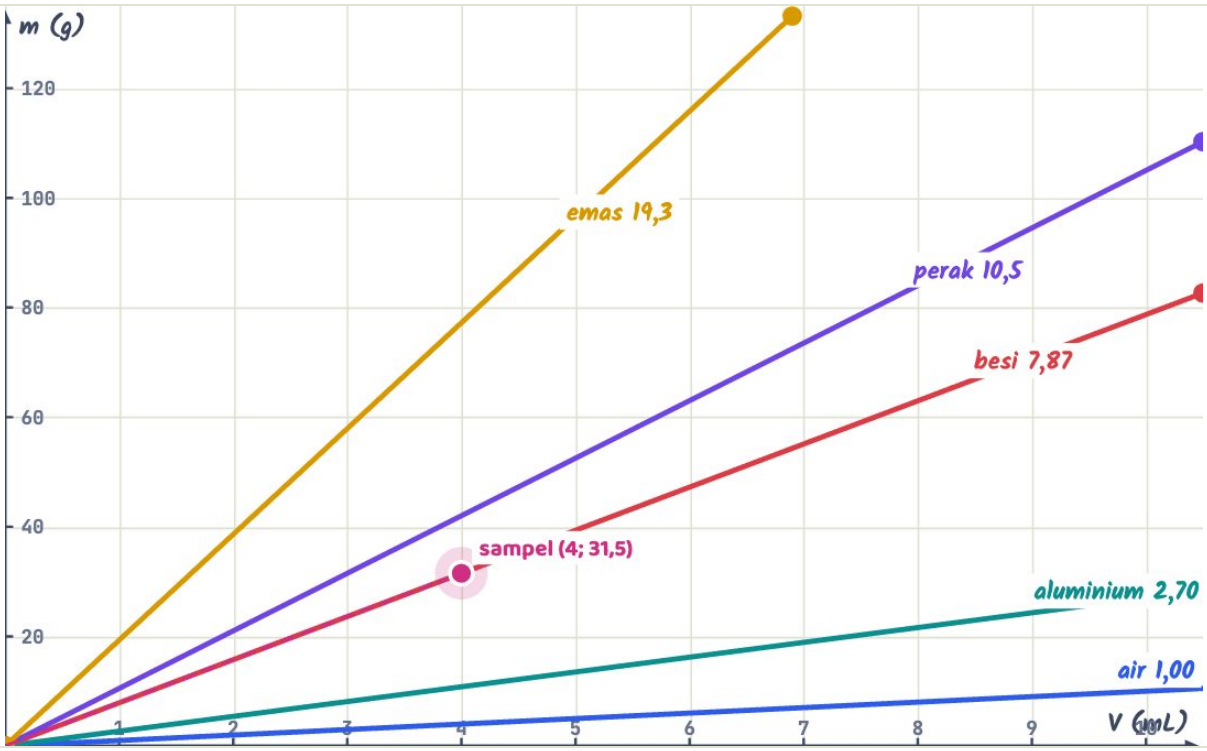
GRAFIK HIDUP

Garis massa–volume: kemiringannya adalah massa jenis

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-4

$$m = \rho \times V$$

$$\text{sampel: } V = 4\ \text{mL},\ m = 31{,}5\ \text{g} \ \Rightarrow\ \rho = 7{,}88\ \text{g/mL}$$



cocok dengan besi

ρ sampel	air bervolume sama
7,88 g/mL	4 g

Setiap garis adalah satu zat: makin curam garisnya, makin besar massa jenisnya. Seret titik magenta "sampel misterius" sesuai data hasil ukurmu (atau data LKPD). Garis zat mana yang paling dekat? Coba buat sampel bervolume 3 mL yang cocok dengan emas: berapa massanya?

TAMU DARI MASA LALU

Menurut kisah terkenal yang ditulis arsitek Romawi Vitruvius (mungkin sudah dibumbui), Raja Hieron II dari Syracusa curiga mahkota emasnya dicampur perak oleh pandai emas. **Archimedes** (±250 SM) diminta memeriksanya tanpa merusak mahkota. Saat masuk ke bak mandi dan melihat air meluap, ia sadar bahwa volume benda yang bentuknya rumit pun bisa diukur dari air yang terdesak. Konon ia berlari sambil berteriak "Eureka!" (aku menemukannya!). Mahkota yang dicampur perak akan mendesak lebih banyak air daripada emas murni bermassa sama, karena perak kurang rapat.

KIMIA NUSANTARA · EMAS TUA, EMAS MUDA, DAN KARAT

Di toko emas Indonesia, kadar emas dinyatakan dalam **karat**: emas murni adalah 24 karat, jadi 1 karat = 1/24 bagian emas. Emas 22 karat berisi $22/24 = 91{,}7\%$ emas, emas 18 karat berisi 75%. Orang menyebut emas berkadar tinggi sebagai "emas tua" (warnanya kuning pekat) dan emas berkadar rendah sebagai "emas muda" (lebih pucat atau kemerahan, karena dicampur perak dan tembaga). Makin rendah kadarnya, makin kecil massa jenisnya: emas murni 19,3 g/cm³, 22 karat ±17,6–18,0 g/cm³, dan 18 karat hanya ±15–16 g/cm³. Ornamen di pura dan keraton kadang dilapisi daun emas (prada) setipis ±0,1 µm!

COBA SENDIRI **Gelang warisan nenek: 24 karat?**

Laras ingin menguji gelang emas warisan nenek. Massanya 28,95 g (neraca 0,01 g). Saat dicelupkan ke gelas ukur 10 mL, air naik dari 5,0 mL menjadi 6,5 mL (setiap bacaan ±0,1 mL). Hitung massa jenisnya beserta ketidakpastiannya. Bisakah Laras memastikan gelang itu 24 karat, bukan 22 karat?

1. Volume gelang: $V = 6{,}5 - 5{,}0 = 1{,}5$ mL, dengan ketidakpastian $0{,}1 + 0{,}1 = \pm 0{,}2$ mL (13%).
2. Massa jenis: $\rho = \dfrac{28{,}95}{1{,}5} = 19{,}3$ g/mL. Dengan 2 AP (dari 1,5) ditulis 19 g/mL.
3. Ketidakpastian massa hanya 0,03%, jadi totalnya ±13%: $\rho = 19 \pm 3$ g/mL, artinya antara 16 dan 22 g/mL.
4. Rentang itu mencakup emas 24 karat (19,3) dan juga 22 karat (±17,8).

$\rho = 19 \pm 3$ g/mL. Hasilnya cocok dengan emas murni, tetapi belum bisa membedakan 24 dan 22 karat, karena gelas ukur terlalu kasar untuk volume sekecil 1,5 mL. Butuh cara yang lebih teliti: lihat kotak Lanjut di bawah!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PENIMBANGAN HIDROSTATIK DAN MASSA JENIS PADUAN

Cara Archimedes yang lebih teliti adalah **menimbang benda di dalam air**. Gelang digantung dengan benang tipis ke neraca dan dicelupkan seluruhnya. Massanya "berkurang" sebesar massa air yang terdesak. Karena 1 g air ≈ 1 cm³ air, pengurangan massa (dalam gram) sama dengan volume benda (dalam cm³).

Gelang Laras: di udara 28,95 g, di dalam air 27,45 g. Volume = 1,50 cm³ ± 0,02 cm³ (dua penimbangan ±0,01 g), hanya ±1,3%. Maka $\rho = 28{,}95/1{,}50 = 19{,}3 \pm 0{,}3$ g/cm³. Sekarang 22 karat (±17,8) jelas tersingkir: gelang itu emas tua sungguhan!

Untuk paduan, volume komponen (kurang lebih) dijumlahkan, sehingga yang dijumlahkan adalah kebalikan massa jenisnya, ditimbang dengan fraksi massa w:

$$\frac{1}{\rho_{\text{paduan}}} = \frac{w_{\text{Au}}}{\rho_{\text{Au}}} + \frac{w_{\text{lain}}}{\rho_{\text{lain}}}$$

Contoh: emas 18 karat dengan 25% tembaga: $1/\rho = 0{,}75/19{,}3 + 0{,}25/8{,}96 = 0{,}0668$, jadi $\rho \approx 15{,}0$ g/cm³. Rumus ini bisa dibalik untuk menebak kadar emas dari massa jenis yang terukur.

Kimia di sekitarmu

Takaran kue

Satu cangkir (±240 mL) tepung terigu hanya ±125 g, sedangkan satu cangkir gula pasir ±200 g. Itulah sebabnya pembuat kue profesional menimbang, bukan menakar dengan gelas.

Curah hujan BMKG

Curah hujan 1 mm berarti 1 liter air jatuh di setiap meter persegi tanah. Hujan 50 mm sehari mengguyur 50 liter air ke setiap meter persegi atap rumahmu.

Debu PM2,5

Partikel PM2,5 berdiameter ≤ 2,5 µm, jauh lebih kecil daripada tebal rambut (±70 µm). Kadarnya di udara dilaporkan dalam mikrogram per meter kubik (µg/m³).

Garam beryodium

Garam konsumsi wajib mengandung kalium iodat, KIO_3, minimal 30 ppm menurut SNI: hanya 30 mg dalam setiap kilogram garam, cukup untuk mencegah gondok.

Mutu bensin

Bensin bermassa jenis ±0,72–0,77 kg/L. Massa jenis diperiksa dengan hidrometer dan termometer; nilai yang menyimpang bisa menandakan BBM tercampur zat lain.

Sendok obat

Sendok takar obat berisi 5 mL, sedangkan sendok makan ±15 mL. Salah sendok bisa membuat dosis obat tiga kali lipat!

Cek Cepat

Berapa angka penting pada 0,02040?

- 2
- 3
- 5
- 4

Volume 2,5 L sama dengan …

- 2.500 mL
- 250 mL
- 25 mL
- 0,0025 mL

Massa sebenarnya sebuah anak timbangan 5,00 g. Bima menimbangnya tiga kali: 5,31 g; 5,30 g; 5,31 g. Hasil Bima …

- tepat dan teliti
- teliti tetapi tidak tepat
- tepat tetapi tidak teliti
- tidak tepat dan tidak teliti

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. A · 3. B

Tantangan Rumah: telur, kentang, dan sendok yang jujur

Bahan: 2 gelas plastik bening besar, air, garam dapur, 1 butir telur mentah, sepotong kentang, sendok makan, timbangan dapur digital, buku catatan.

1. Masukkan telur dan kentang ke gelas berisi air tawar. Catat: mengapung atau tenggelam?
2. Angkat telur dan kentang. Tambahkan garam satu sendok makan setiap kali, aduk sampai larut, lalu celupkan lagi. Hitung berapa sendok sampai telur mulai melayang, lalu sampai mengapung.
3. Ulangi untuk kentang. Mana yang butuh garam lebih banyak? Apa artinya bagi massa jenisnya?
4. Uji kejujuran sendokmu: timbang satu sendok makan garam peres sebanyak 5 kali (tekan tara setiap kali). Catat kelima hasilnya, hitung rata-rata dan selisih terbesar–terkecil.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa dan pakai gelas plastik agar tidak pecah. Cuci tangan dengan sabun setelah memegang telur mentah; telur dan kentang bekas percobaan jangan dimakan mentah. Air garam jangan diminum dan jangan disiramkan ke tanaman (garam merusak akar); buang ke wastafel. Lap tumpahan agar lantai tidak licin.

Pertanyaan: Mengapa telur mengapung setelah air diberi banyak garam? Apakah takaran "satu sendok makan" cukup teliti untuk resep kue? Bandingkan dengan timbangan.

RINGKASAN KILAT

Bab 4 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menyebutkan **besaran pokok SI** yang dipakai kimia dan mengubah suhu Celsius ke **kelvin**
- mengonversi satuan berawalan (mg, µL, dm^3, nm, ppm) dan menulis bilangan dalam **notasi ilmiah**
- menentukan jumlah **angka penting** dan membulatkan hasil perhitungan dengan benar
- membedakan **ketepatan** dan **ketelitian**, membaca meniskus dan buret, serta menghitung ketidakpastian dan galat
- menghitung **massa jenis** dan memakainya untuk meramal benda mengapung atau tenggelam, bahkan menguji keaslian emas

Istilah kunci

Besaran pokok · Satuan SI · besaran turunan · jumlah zat · nol mutlak · kelvin · awalan · faktor konversi · ppm · notasi ilmiah · angka penting · angka taksiran · Ketepatan · Ketelitian · galat · Galat sistematik

Rumus penting

$$T = t + 273{,}15$$

Celsius ke kelvin. Suhu kelvin sama dengan suhu Celsius ditambah 273,15. Skala kelvin dimulai dari nol mutlak, sehingga tidak pernah negatif.

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}}\ (\text{mg})}{m_{\text{campuran}}\ (\text{kg})}$$

Kadar dalam ppm (bagian per sejuta). Berapa miligram zat terdapat di setiap kilogram campuran. Untuk air encer, 1 kg ≈ 1 L, jadi 1 ppm ≈ 1 mg/L.

$$\%\,\text{ketidakpastian} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

Persentase ketidakpastian. Ketidakpastian alat tetap, tetapi persentasenya mengecil bila yang diukur makin besar. Karena itu titrasi dirancang agar volume titran sekitar 20–25 mL.

$$\text{galat} = \frac{|x_{\text{ukur}} - x_{\text{benar}}|}{x_{\text{benar}}} \times 100\%$$

Galat relatif (%). Seberapa jauh hasilmu meleset dari nilai sebenarnya, dalam persen. Makin kecil galatnya, makin tepat (akurat) pengukuranmu.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Massa jenis. Massa jenis adalah massa setiap satu satuan volume: berapa gram 'dijejalkan' ke dalam setiap sentimeter kubik.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Kelvin ditulis tanpa tanda derajat: 298 K, bukan 298 °K.
- Awalan ikut dipangkatkan bersama satuannya.
- Kalkulator tidak mengenal angka penting.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=4

🧩 Teka-teki untuk Bab 5

Sebutir garam halus beratnya hanya ±0,06 mg. Bayangkan kamu punya pisau ajaib dan membelahnya menjadi dua, lalu membelah salah satu bagiannya lagi, dan seterusnya. Kalau terus membagi sebutir garam menjadi dua, kapan kita harus berhenti? Apakah ada potongan terkecil yang tidak bisa dibelah lagi?

▼ Intip petunjuk

Sebutir garam berisi ±6×10^{17} pasangan ion Na^+ dan Cl^-. Karena $2^{59} \approx 5{,}8 \times 10^{17}$, cukup ±59 kali membelah dua untuk tiba di satu pasangan ion saja! Filsuf Yunani Demokritos menyebut potongan terakhir itu *atomos*, "tak terbagi". Tetapi benarkah atom tidak bisa dibelah? Di Bab 5 kita mengikuti perjalanan model atom dari Dalton sampai mekanika kuantum.

BAB 5 · ATOM & TABEL PERIODIK

05 Perjalanan Model Atom: dari Bola Pejal ke Awan Elektron

Belum pernah ada orang yang melihat bagian dalam atom dengan matanya sendiri. Namun selama dua abad, ilmuwan berhasil "memotret" isinya hanya dengan menimbang, menembak, dan membaca warna cahaya. Inilah kisah detektif terhebat dalam sejarah sains!

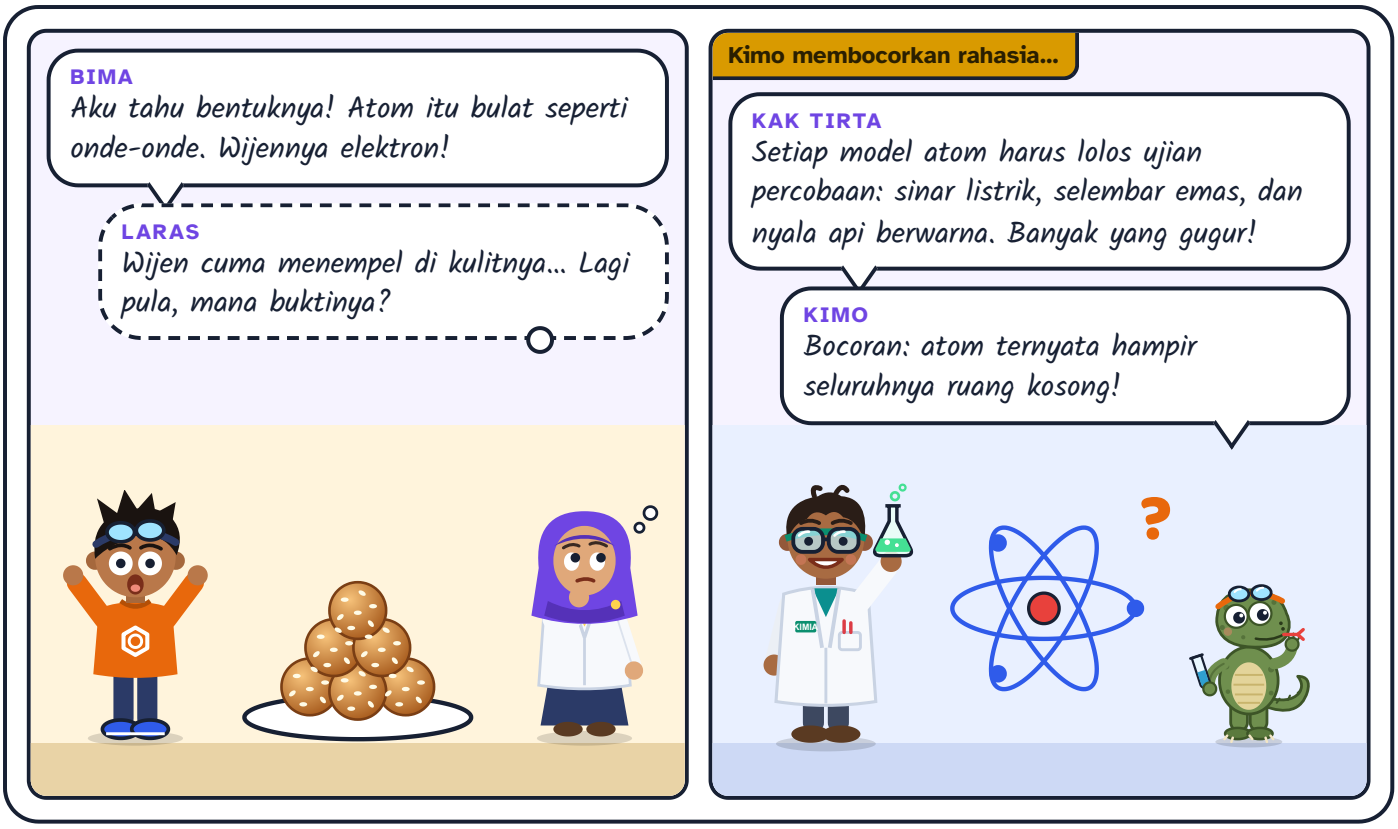
Setelah bab ini, kamu bisa

- menceritakan perkembangan model atom **Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr**, dan **mekanika kuantum** beserta percobaan yang melahirkannya;
- menjelaskan bukti adanya **elektron** (sinar katode) dan **inti atom** (hamburan sinar alfa);
- menghitung energi elektron pada **tingkat energi Bohr** dan panjang gelombang **foton** yang dipancarkan saat elektron berpindah tingkat;
- menghubungkan **spektrum garis** dan warna **uji nyala** dengan lompatan elektron;
- membandingkan ukuran inti dengan ukuran atom dan menjelaskan mengapa atom hampir seluruhnya **ruang kosong**.

KUE LAPIS YANG TAK HABIS DIBELAH

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Seandainya satu atom emas diperbesar sampai seluas Stadion Utama Gelora Bung Karno, apa yang paling banyak mengisi "stadion" itu?

- Materi emas yang padat dan rapat, karena emas sangat berat.
- Udara yang terperangkap di antara bagian-bagian atom.
- Ruang kosong. Hampir seluruh massanya terkumpul di satu titik sebesar kelereng di tengah lapangan.
- Cairan kental tempat elektron berenang.

Jawabannya: ruang kosong! Inti atom emas kira-kira 20.000 kali lebih kecil daripada atomnya, tetapi memuat lebih dari 99,9% massanya. Sisanya adalah wilayah elektron yang sangat ringan. Di dalam atom juga tidak ada udara, sebab udara sendiri tersusun atas atom dan molekul. Bagaimana ilmuwan bisa tahu? Ikuti perjalanannya!

5.1 Dari Demokritos ke Dalton: atom sebagai bola pejal

Sekitar 2.400 tahun lalu di Yunani, **Leukippos** dan muridnya, **Demokritos**, bertanya seperti Kimo. Jawaban mereka: pembelahan harus berhenti pada butiran yang tak bisa dibelah lagi, yaitu *atomos*. Mereka bahkan

membayangkan atom besi punya kait-kait sehingga besi keras, sedangkan atom air licin dan bulat sehingga air mudah mengalir.

Bahasa sederhana · Coba bayangkan kamu memotong sepotong kue lapis terus-menerus. Potongannya makin kecil, makin kecil, sampai pisaumu tidak bisa memotong lagi. Potongan terkecil yang masih berupa "kue lapis" itulah yang dibayangkan Demokritos sebagai atom. Bedanya, atom jauh lebih kecil: sebutir garam saja berisi miliaran miliar atom!

Sayangnya, gagasan itu hanya hasil berpikir, tanpa percobaan. Filsuf terkenal **Aristoteles** menolaknya dan lebih percaya bahwa segala sesuatu tersusun atas empat unsur: tanah, air, udara, dan api. Pendapat Aristoteles bertahan hampir 2.000 tahun.

Kimiawan mulai menimbang

Pada akhir abad ke-18, kimiawan mulai menimbang zat sebelum dan sesudah reaksi dengan neraca yang teliti. Dua aturan penting pun ditemukan:

- **Hukum kekekalan massa** (Antoine Lavoisier, 1789): dalam wadah tertutup, massa zat sebelum dan sesudah reaksi selalu sama.
- **Hukum perbandingan tetap** (Joseph Proust, ±1799): suatu senyawa selalu tersusun atas unsur-unsur dengan perbandingan massa yang tetap. Air dari sumur, hujan, atau es kutub selalu berisi hidrogen dan oksigen dengan perbandingan massa 1 : 8.

CONTOH **Perbandingan tetap dalam air**

Perbandingan massa hidrogen : oksigen dalam air adalah 1 : 8. Berapa gram oksigen yang tepat bereaksi dengan 5 g hidrogen, dan berapa gram air yang terbentuk?

1. Oksigen = 8 × massa hidrogen = 8 × 5 g = 40 g.
2. Hukum kekekalan massa: air = 5 g + 40 g = 45 g.

Dibutuhkan 40 g oksigen dan terbentuk 45 g air. Tidak ada massa yang hilang, hanya "berganti pasangan".

Seorang guru sekolah dari Manchester, Inggris, bernama **John Dalton**, mencari penjelasan untuk kedua hukum itu. Jawabannya kembali ke gagasan lama Demokritos, tetapi kali ini didukung data timbangan.

TEORI ATOM DALTON (1803–1808)

1. Semua materi tersusun atas partikel sangat kecil yang tidak dapat dibagi lagi, yaitu **atom**.
2. Atom-atom suatu unsur identik (massa dan sifatnya sama). Atom unsur yang berbeda memiliki massa dan sifat yang berbeda.
3. Atom tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Reaksi kimia hanyalah penataan ulang atom.
4. Atom-atom bergabung dengan perbandingan bilangan bulat sederhana membentuk senyawa.

Dalton membayangkan atom sebagai **bola pejal** yang tak terbagi, mirip bola biliar yang sangat kecil.

DEFINISI · ATOM

Atom adalah partikel terkecil suatu unsur yang masih memiliki sifat kimia unsur tersebut. Dalam reaksi kimia, atom tidak hilang dan tidak berubah menjadi atom unsur lain; atom hanya bertukar pasangan.

Teori Dalton menjelaskan kedua hukum tadi dengan indah. Massa kekal karena atom-atomnya tetap ada, hanya berganti pasangan. Perbandingan massa tetap karena setiap molekul air selalu tersusun atas atom-atom yang sama dengan jumlah yang sama. Dalton lalu meramalkan **hukum perbandingan berganda**: bila dua unsur dapat membentuk lebih dari satu senyawa, massa unsur kedua yang bergabung dengan massa tetap unsur pertama berbanding sebagai bilangan bulat sederhana.

KERJAKAN BERSAMA

Dua oksida karbon

Dalam karbon monoksida, 3 g karbon bergabung dengan 4 g oksigen. Dalam karbon dioksida, 3 g karbon bergabung dengan 8 g oksigen. Tunjukkan bahwa data ini sesuai dengan hukum perbandingan berganda.

1. Massa karbon dibuat sama (3 g) pada kedua senyawa.
2. Bandingkan massa oksigen: 4 g : 8 g = 1 : 2.
3. Perbandingan bilangan bulat sederhana muncul karena satu atom C mengikat *satu* atom O (CO) atau *dua* atom O (CO_2). Tidak ada "satu setengah atom".

Perbandingan massa oksigennya 1 : 2, bilangan bulat sederhana. Ini bukti kuat bahwa materi tersusun atas butiran utuh, yaitu atom.

Mengapa perbandingan bilangan bulat membuktikan adanya atom?

Bayangkan membeli telur di warung. Kamu bisa membeli 1 butir atau 2 butir, tetapi tidak bisa membeli 1,37 butir. Kalau materi bisa dibagi tanpa batas (seperti air yang bisa dituang sesuka hati), unsur-unsur boleh bergabung dengan perbandingan berapa pun. Kenyataannya, oksigen yang bergabung dengan karbon selalu

"melompat" dari 4 g ke 8 g, tidak pernah 5,3 g. Lompatan bilangan bulat itu menandakan ada satuan terkecil yang utuh: atom.

Lambang atom Dalton (1808)



hidrogen nitrogen karbon oksigen belerang emas

Senyawa = gabungan atom



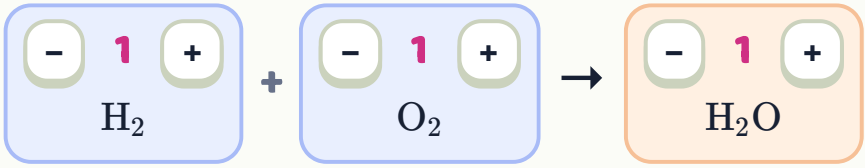
air (kata Dalton: HO) CO CO_2

Dalton mengira rumus air HO (satu H, satu O), sehingga ia menyimpulkan atom O hanya ±7 kali lebih berat daripada atom H. Nilai modern: ±16 kali, karena rumus air yang benar adalah H_2O.

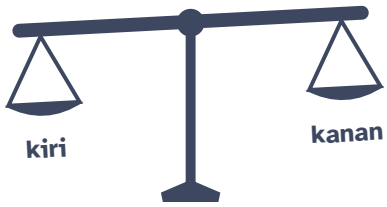
Dalton memberi setiap unsur lambang bulat, karena baginya atom adalah bola pejal. Lambang huruf seperti H, O, dan Au baru diusulkan Berzelius beberapa tahun kemudian.

PENYETARA REAKSI

Bukti Dalton: atom tidak hilang, hanya bertukar pasangan



Unsur	Kiri	Kanan	
H	2 ○○	2 ○○	✓
O	2 ●●	1 ●	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 4 null

Setarakan setiap reaksi. Perhatikan tabel atomnya: jumlah atom setiap unsur di kiri dan kanan harus sama. Itulah postulat ketiga Dalton dan alasan massa selalu kekal.



TAMU DARI MASA LALU · JOHN DALTON (1766–1844)

Dalton adalah anak penenun miskin yang sudah mengajar sejak usia 12 tahun. Selain atom, ia tekun mencatat cuaca setiap hari selama puluhan tahun dan meneliti buta warna yang dideritanya sendiri. Karena itu, buta warna merah-hijau pernah disebut *daltonisme*. Ia bahkan berpesan agar matanya diperiksa setelah ia wafat untuk mencari penyebab buta warnanya.



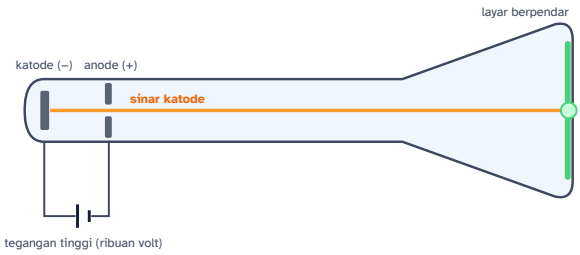
AWAS JEBAKAN

"Tak terbagi dalam reaksi kimia" tidak sama dengan "tak punya bagian". Pada akhir abad ke-19 ditemukan bahwa atom tersusun atas partikel yang lebih kecil (elektron dan inti). Ternyata pula atom-atom satu unsur bisa berbeda massanya (isotop, Bab 6). Meski begitu, gagasan Dalton bahwa reaksi kimia hanya menata ulang atom tetap dipakai sampai hari ini.

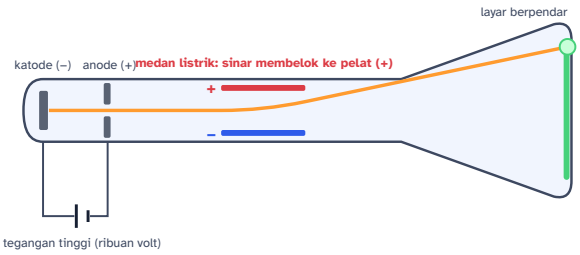
5.2 Thomson dan sinar katode: menemukan elektron

Menjelang tahun 1900, para fisikawan gemar bermain dengan **tabung sinar katode**: tabung kaca yang udaranya hampir habis dipompa keluar, dengan dua lempeng logam (elektrode) yang diberi tegangan sangat tinggi. Dari elektrode negatif (*katode*) memancar sinar tak kasatmata yang membuat dinding kaca atau layar di ujung tabung berpendar. Televisi tabung zaman dulu bekerja dengan prinsip yang sama.

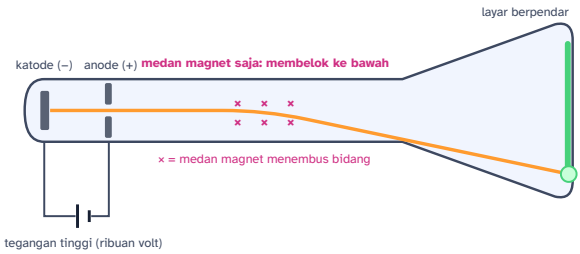
Pada 1897, **Joseph John (J.J.) Thomson** di Cambridge, Inggris, menguji sinar itu dengan medan listrik dan medan magnet. Ikuti percobaannya langkah demi langkah:



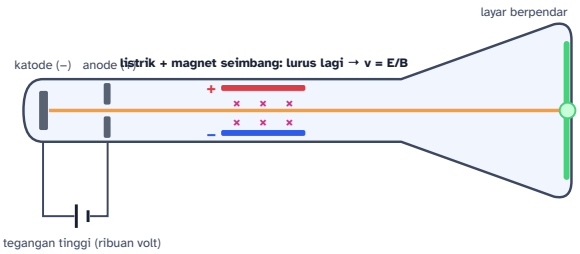
Langkah 1. Tegangan tinggi menghasilkan sinar dari katode (–). Sinar melewati lubang anode, merambat **lurus**, dan membuat layar berpendar di tengah.



Langkah 2. Thomson memasang dua pelat bermuatan. Sinar membelok **menuju pelat positif**. Kesimpulan: sinar katode tersusun atas partikel **bermuatan negatif**.



Langkah 3. Dengan magnet saja, sinar membelok ke arah lain. Partikel bermuatan yang bergerak memang dibelokkan oleh medan magnet.



Langkah 4. Thomson mengatur kedua medan sampai sinar lurus lagi. Gaya listrik sama dengan gaya magnet, sehingga kecepatan partikel dapat dihitung: $v = E/B$.



Langkah 5. Dari besar pembelokan, Thomson menghitung rasio muatan/massa $e/m \approx 1{,}76 \times 10^{11}$ C/kg, ±1.800 kali lebih besar daripada ion hidrogen. Partikel ini jauh lebih ringan daripada atom teringan, dan ada di dalam **semua** atom.

DEFINISI · ELEKTRON

Elektron adalah partikel penyusun semua atom yang bermuatan negatif ($-1{,}602 \times 10^{-19}$ C, ditulis muatan relatif –1) dengan massa $9{,}109 \times 10^{-31}$ kg, kira-kira 1/1836 massa proton.

Atom bersifat netral, padahal di dalamnya ada elektron negatif. Jadi pasti ada pula bagian bermuatan positif. Pada 1904 Thomson mengusulkan **model roti kismis** (*plum pudding*): atom berupa bola bermuatan positif yang merata, dengan elektron-elektron tersebar di dalamnya seperti kismis di dalam roti. Jumlah muatan positif dan negatifnya sama, sehingga atom netral.

ONDE-ONDE ATAU SEMANGKA?

Tebakan Bima di komik hampir tepat! Bedanya, wijen onde-onde hanya menempel di kulit, sedangkan elektron Thomson tersebar di *seluruh* bola. Model Thomson lebih mirip **semangka**: daging buah merah adalah muatan positif yang merata, biji-biji hitamnya adalah elektron.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DARI E/M KE MASSA ELEKTRON

Saat sinar lurus di medan listrik E dan medan magnet B yang bersilangan, $eE = evB$, sehingga $v = E/B$. Dengan medan magnet saja, elektron bergerak melingkar berjari-jari r: $evB = \frac{mv^2}{r}$. Gabungkan keduanya:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} = \frac{E}{B^2 r}$$

Pada 1909, Robert Millikan mengukur muatan satu elektron lewat percobaan tetes minyak: $e = 1{,}602 \times 10^{-19}$ C. Maka $m = \frac{e}{e/m} = \frac{1{,}602 \times 10^{-19}}{1{,}759 \times 10^{11}} = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg. Dua percobaan sederhana sudah cukup untuk "menimbang" partikel yang tak pernah terlihat!

TAMU DARI MASA LALU · AYAH DAN ANAK PERAIH NOBEL

J.J. Thomson meraih Nobel Fisika 1906 karena penelitiannya tentang hantaran listrik dalam gas. Tiga puluh satu tahun kemudian, putranya, **George Paget Thomson**, meraih Nobel Fisika 1937 karena membuktikan bahwa elektron juga berperilaku seperti *gelombang*. Sang ayah menunjukkan elektron sebagai partikel, sang anak menunjukkan elektron sebagai gelombang. Keduanya benar, seperti yang akan kamu lihat di subbab 5.5.

Model Thomson berhasil menjelaskan bahwa atom mengandung elektron dan tetap netral. Namun, model ini akan runtuh oleh sebuah percobaan dengan lembaran emas.

5.3 Rutherford dan lembaran emas: inti yang mungil

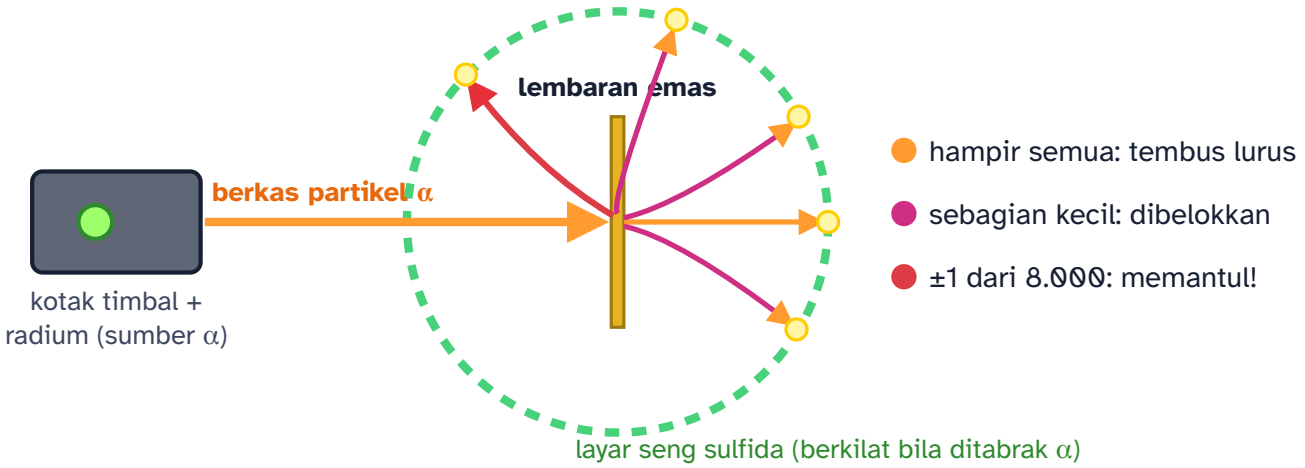
Tebak Dulu!

Partikel alfa yang sangat cepat ditembakkan ke selembar emas yang sangat tipis. Menurut model Thomson, muatan positif emas tersebar merata dan "lunak". Apa yang sebenarnya teramati?

- Semua partikel menembus lurus, sesuai ramalan model Thomson.
- Semua partikel tertahan di lembaran emas.
- Hampir semua menembus lurus, sebagian kecil dibelokkan, dan sangat sedikit memantul balik.
- Semua partikel memantul balik ke arah sumber.

Jawabannya: sebagian kecil memantul balik! Model Thomson meramalkan semua partikel hanya sedikit berbelok. Ketika beberapa partikel ternyata memantul, itu tanda ada "sesuatu" yang sangat kecil, sangat berat, dan bermuatan positif di dalam atom.

Pada 1909 di Manchester, **Hans Geiger** dan mahasiswanya yang baru berusia 20 tahun, **Ernest Marsden**, bekerja di bawah bimbingan **Ernest Rutherford**. Mereka menembakkan **partikel alfa** (α), yaitu inti atom helium (He^{2+}) yang dipancarkan unsur radioaktif radium dengan kecepatan ±15.000 km per detik, ke lembaran emas setipis kurang dari seperseribu milimeter. Setiap partikel α yang menabrak layar seng sulfida menimbulkan kilatan cahaya kecil, yang mereka hitung satu per satu di ruang gelap dengan mikroskop.



Susunan percobaan Geiger–Marsden (disederhanakan). Mikroskop dapat diputar mengelilingi lembaran emas untuk menghitung partikel α pada setiap sudut.

Pengamatan	Kesimpulan Rutherford (1911)
Hampir semua partikel α menembus lurus.	Sebagian besar atom adalah **ruang kosong**.
Sebagian kecil dibelokkan dengan sudut besar.	Ada pusat bermuatan **positif** yang menolak partikel α (yang juga positif).
Sangat sedikit (±1 dari 8.000) memantul balik.	Pusat itu **sangat kecil** tetapi memuat hampir **seluruh massa** atom.

DEFINISI · INTI ATOM

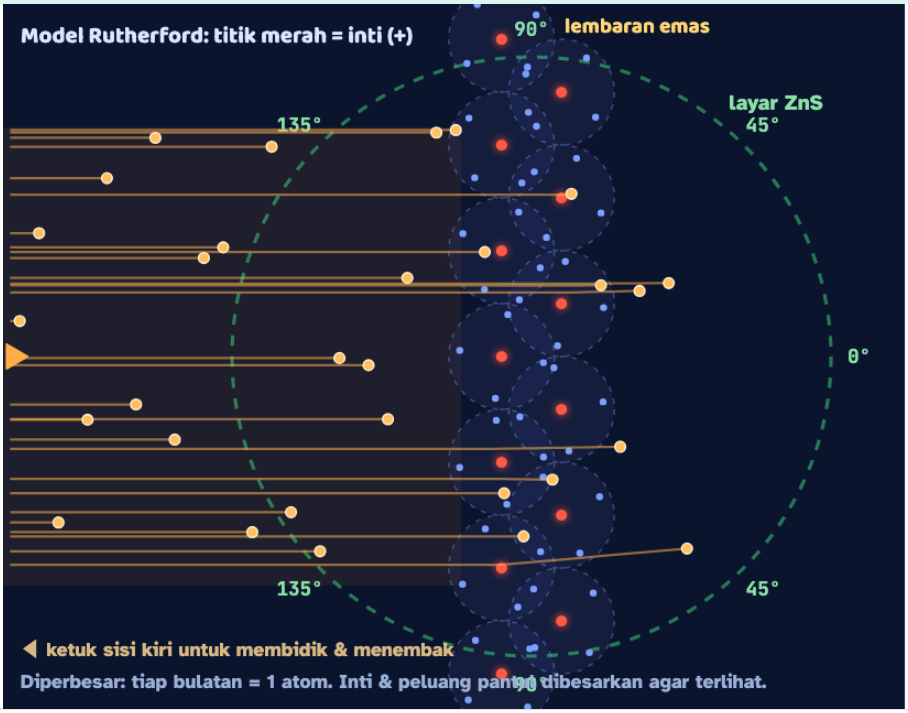
Inti atom (nukleus) adalah pusat atom yang sangat kecil, bermuatan positif, dan memuat lebih dari 99,9% massa atom. Elektron berada di sekitar inti, di ruang yang jauh lebih luas.

Rutherford lalu mengusulkan **model atom inti** (1911), sering disebut **model tata surya**: inti mungil di tengah seperti Matahari, dan elektron-elektron beredar mengelilinginya seperti planet. Kelak (1917–1919) Rutherford juga menemukan bahwa muatan positif inti dibawa oleh partikel yang ia namai **proton**.

Bahasa sederhana · Bayangkan kamu melempar bola kasti ke arah jaring nyamuk. Hampir semua bola lolos lewat lubang-lubangnya. Tetapi kalau di jaring itu tersembunyi beberapa kelereng besi yang sangat kecil, sesekali bolamu memantul balik saat tepat mengenainya. Begitulah cara Rutherford "melihat" inti atom tanpa pernah melihatnya!

LAB MINI **Tembak Lembaran Emas! Model Thomson vs Rutherford**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-5



Hasil hitungan

0 partikel α

tembus lurus (< 10°)

0 (0%)

dibelokkan (10°–90°)

0 (0%)

memantul (> 90°)

0 (0%)

Tekan ▶ Jalankan
atau ketuk kanvas.

Ditembakkan	Tembus lurus (< 10°)	Dibelokkan (10°–90°)	Memantul (> 90°)	Sudut terakhir
0	–	–	0 partikel	–

Tekan ▶ **Jalankan** untuk menghujani lembaran dengan partikel α, atau ketuk sisi kiri kanvas untuk menembak satu partikel. Bandingkan hasil hitungan model **Thomson** dan **Rutherford**. Bisakah kamu membidik tepat ke inti sampai partikelnya memantul? Ubah energi α dan jenis logam: kapan pantulan makin sering?

Mengapa hanya sedikit partikel yang memantul? Partikel α baru dibelokkan tajam bila lewat *sangat dekat* dengan inti. Jarak tegak lurus antara arah datang partikel dan inti disebut **jarak bidik** b. Geser titik oranye pada grafik ini:

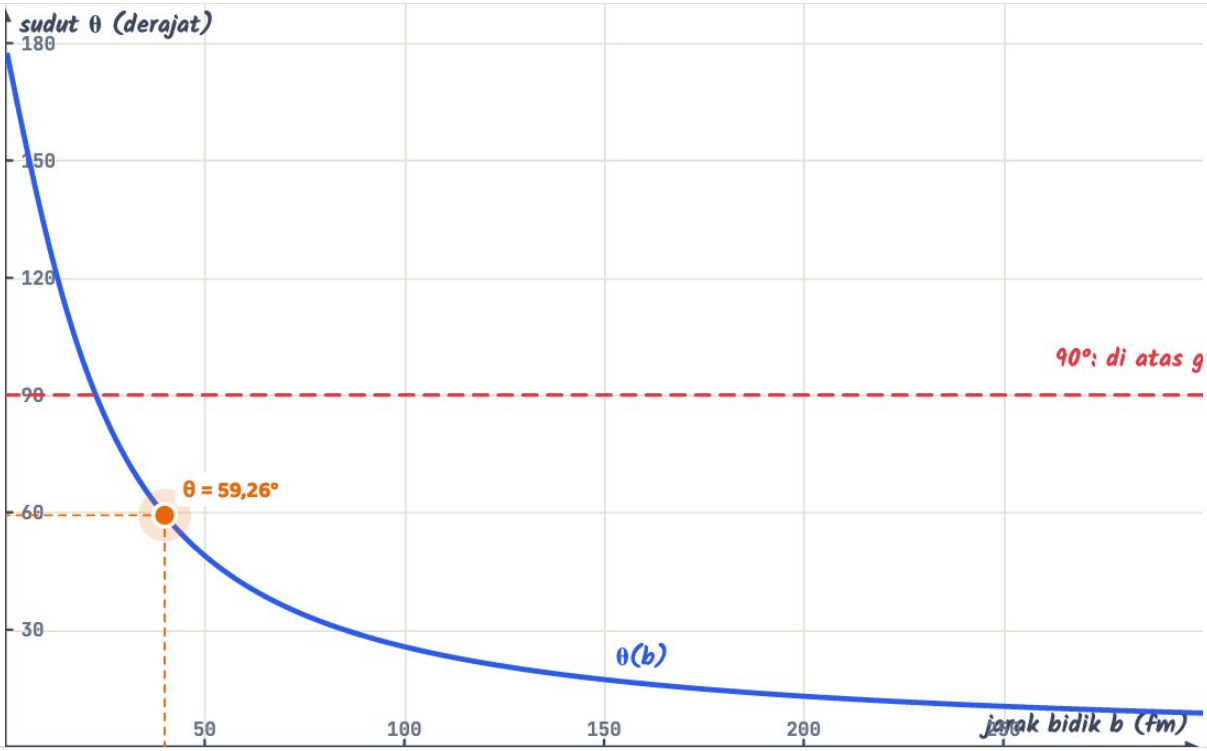
GRAFIK HIDUP

Sudut hamburan vs jarak bidik

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-5

$$\tan\frac{\theta}{2} = \frac{d_0}{2b}, \qquad d_0 = \frac{2Z \times 1{,}44\ \text{MeV}\cdot\text{fm}}{E_\alpha}$$

$$Z = 79,\ E_\alpha = 5\ \text{MeV},\ d_0 = 45{,}5\ \text{fm};\quad b = 40\ \text{fm} \Rightarrow \theta = 59{,}26^\circ$$



emas

jarak terdekat (tembakan lurus) d_0	sudut hamburan θ	jarak bidik untuk θ = 90°
45,5 fm	59,3 °	22,8 fm

1 fm (femtometer) = 10^{-15} m. Pada emas dengan α 5 MeV, partikel harus lewat kurang dari ±23 fm dari inti agar memantul. Padahal jari-jari atom emas ±144.000 fm! Karena itulah pantulan sangat jarang.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SEBERAPA DEKAT α KE INTI?

Pada tembakan lurus ($b = 0$), partikel α melambat karena ditolak inti, berhenti sesaat, lalu berbalik. Di titik terdekat d_0, seluruh energi kinetiknya berubah menjadi energi potensial listrik:

$$E_\alpha = \frac{k\,(2e)(Ze)}{d_0} \quad \Rightarrow \quad d_0 = \frac{2Z \times 1{,}44\ \text{MeV}}{E_\alpha}$$

($ke^2 = 1{,}44$ MeV·fm.) Untuk α 7,7 MeV (dipakai Geiger–Marsden) dan emas ($Z = 79$): $d_0 = 2 \times 79 \times 1{,}44/7{,}7 \approx 30$ fm. Jadi inti emas paling besar berjari-jari ±30 fm, ribuan kali lebih kecil daripada atomnya. (Nilai modern: ±7 fm.)

AWAS JEBAKAN

Atom **bukan** bola padat yang penuh materi. Hampir seluruh volumenya adalah ruang kosong yang dihuni elektron yang sangat ringan. Meja terasa keras bukan karena atomnya penuh, melainkan karena awan elektron atom-atom tanganmu dan atom-atom meja saling menolak.

TAMU DARI MASA LALU · ERNEST RUTHERFORD (1871–1937)

Rutherford, anak petani dari Selandia Baru, mengenang hasil percobaan itu sebagai peristiwa paling luar biasa dalam hidupnya: seakan-akan menembakkan peluru meriam ke selembar kertas tisu, lalu pelurunya memantul dan mengenai penembaknya. Lucunya, fisikawan yang suka bercanda bahwa fisika adalah ilmu paling hebat ini justru menerima **Nobel Kimia** 1908 untuk penelitiannya tentang unsur radioaktif.

Mengapa atom Rutherford seharusnya runtuh?

Menurut fisika klasik (teori Maxwell), muatan listrik yang bergerak melingkar selalu memancarkan gelombang elektromagnetik dan kehilangan energi. Elektron yang mengitari inti seharusnya terus memancarkan cahaya, lintasannya menyusut seperti spiral, lalu jatuh ke inti dalam waktu kurang dari sepermiliar detik. Kalau benar begitu, tidak akan ada atom yang stabil, termasuk atom-atom tubuhmu! Selain itu, cahaya yang dipancarkan seharusnya berwarna kontinu (pelangi utuh), bukan garis-garis tertentu. Dua masalah inilah yang dipecahkan Niels Bohr.

5.4 Bohr: tangga energi dan spektrum garis

Tebak Dulu!

Kuah sayur asin meluap dan menetes ke api kompor gas yang biru. Nyala api di bagian itu akan berubah menjadi warna apa?

- Biru yang lebih terang, karena apinya makin panas.
- Kuning-jingga terang.
- Hijau, karena ada sayuran.
- Tidak berubah, karena air memadamkan warna.

Jawabannya: kuning-jingga! Garam dapur mengandung natrium. Panas api "mengangkat" elektron atom natrium ke tingkat energi lebih tinggi. Saat turun kembali, elektron melepas cahaya kuning dengan panjang gelombang 589 nm. Warna ini adalah "tanda tangan" natrium, dan model Bohr menjelaskan asalnya.

Cahaya punya sidik jari

Cahaya Matahari yang dilewatkan prisma terurai menjadi pelangi utuh: **spektrum kontinu**. Tetapi gas hidrogen yang dialiri listrik dalam tabung berpendar ungu kemerahan, dan bila dilihat lewat prisma, cahayanya hanya berupa **empat garis berwarna** yang terpisah. Setiap unsur memiliki pola garis sendiri, seperti sidik jari atau kode batang (*barcode*) di kemasan belanjaan.



Garis-garis hidrogen di daerah tampak disebut **deret Balmer**: merah (656 nm), biru kehijauan (486 nm), nila (434 nm), dan ungu (410 nm). Gas hidrogen yang dingin *menyerap* warna-warna yang sama persis.

DEFINISI · SPEKTRUM GARIS

Spektrum emisi (spektrum garis) adalah kumpulan garis cahaya terang dengan panjang gelombang tertentu yang dipancarkan atom suatu unsur saat dipanaskan atau dialiri listrik. Pola garisnya khas untuk setiap unsur.

Model atom Bohr (1913)

Fisikawan muda Denmark, **Niels Bohr**, yang pernah belajar bersama Rutherford, menggabungkan model inti dengan gagasan baru Max Planck dan Albert Einstein bahwa cahaya datang dalam paket energi bernama **foton**. Energi satu foton sebanding dengan frekuensinya: $E = hf = \dfrac{hc}{\lambda}$.

POSTULAT BOHR

1. Elektron hanya boleh berada pada lintasan (kulit) tertentu dengan energi tertentu, disebut **tingkat energi**, diberi nomor $n = 1, 2, 3, \ldots$ (kulit K, L, M, N, ...). Selama berada di sana, elektron **tidak** memancarkan energi.
2. Elektron dapat berpindah tingkat. Naik ke tingkat lebih tinggi bila **menyerap** energi yang tepat sama dengan selisih tingkat. Turun ke tingkat lebih rendah sambil **memancarkan** satu foton: $\Delta E = E_{\text{awal}} - E_{\text{akhir}} = \dfrac{hc}{\lambda}$.
3. Tingkat terendah ($n = 1$) disebut **keadaan dasar**. Tingkat yang lebih tinggi disebut **keadaan tereksitasi**.

Bahasa sederhana · Bayangkan tangga rumah panggung. Kamu bisa berdiri di anak tangga pertama, kedua, atau ketiga, tetapi tidak bisa melayang di antara dua anak tangga. Elektron juga begitu: ia hanya boleh "berdiri" di tingkat energi tertentu. Saat melompat turun, kelebihan energinya keluar sebagai cahaya.

Untuk atom hidrogen, Bohr menghitung energi setiap tingkat dengan rumus yang sangat sederhana. Tanda negatif berarti elektron *terikat* pada inti; energi nol berarti elektron baru saja lepas dari atom.

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\ \text{eV} \qquad \Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

RUMUS HIDUP

Energi elektron pada tingkat Bohr

$$E_n = -\frac{13{,}6\ Z^2}{n^2}\ \text{eV}$$

Makin jauh tingkatnya dari inti (n makin besar), energinya makin mendekati nol: elektron makin longgar terikat.

- n Nomor kulit
- Z Nomor atom
- E_n Energi elektron eV

ENERGI ELEKTRON

-13,6

eV

⚓ **keadaan dasar (paling stabil)**

energi ionisasi hidrogen: 13,6 eV = 1.312 kJ/mol

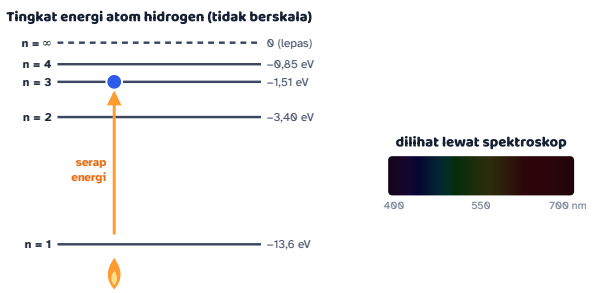
Elektron di kulit n = **1** berenergi **-13,6** eV. Untuk melepaskannya dari atom diperlukan **13,6** eV, atau **1.312,196** kJ untuk satu mol atom. Jari-jari orbit Bohr-nya ≈ **0,053** nm.

Cek satuan: eV (elektronvolt); 1 eV = 1,602 × 10^{-19} J, dan 1 eV per atom = 96,485 kJ/mol

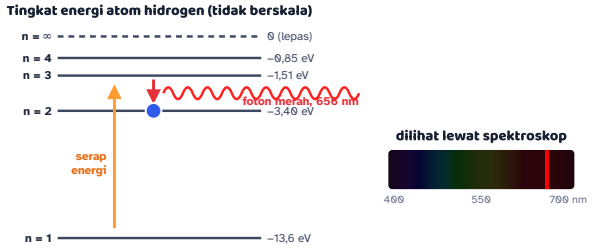
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-BOHR-ENERGI-TINGKAT



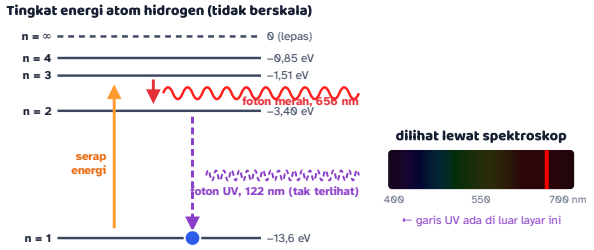
Langkah 1. Elektron atom hidrogen biasanya menempati tingkat energi terendah, $n = 1$: **keadaan dasar**.



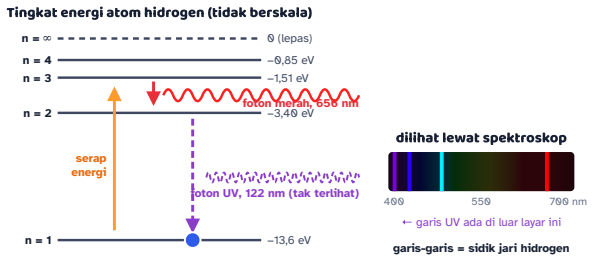
Langkah 2. Atom menyerap energi (panas nyala atau listrik), dan elektron melompat ke $n = 3$: **keadaan tereksitasi**. Ia hanya menerima energi yang tepat sama dengan selisih tingkat.



Langkah 3. Keadaan tereksitasi tidak stabil. Elektron turun ke $n = 2$ sambil melepas foton $\Delta E = 3{,}40 - 1{,}51 = 1{,}89$ eV, yaitu cahaya merah $\lambda = 656$ nm.



Langkah 4. Elektron turun lagi ke $n = 1$ dan melepas foton 10,2 eV ($\lambda = 122$ nm). Ini ultraviolet: tidak terlihat mata, tetapi terekam alat.



Langkah 5. Miliaran atom melompat dengan cara berbeda ($4 \to 2$, $5 \to 2$, $6 \to 2$, ...). Spektroskop menampilkan garis-garis terang di posisi yang selalu sama: **sidik jari hidrogen**.

Selisih energi menentukan warna. Lompatan kecil menghasilkan foton berenergi rendah (merah atau inframerah), sedangkan lompatan besar menghasilkan foton berenergi tinggi (ungu atau ultraviolet).

RUMUS HIDUP

Panjang gelombang foton dari selisih energi

$$\lambda = \frac{h\,c}{\Delta E}$$

Makin besar lompatan energi elektron, makin pendek gelombang cahaya yang dilepaskan: dari merah ke ungu, lalu ultraviolet.

ΔE Selisih energi tingkat eV

λ Panjang gelombang foton nm

PANJANG GELOMBANG FOTON

656,1

nm

Hα: garis merah hidrogen (3 → 2)

Foton **1,89** eV (= **3,028 × 10⁻¹⁹** J) memiliki λ = **656,1** nm, berwarna **merah**. Frekuensinya **4,57 × 10¹⁴** Hz.

Cek satuan: (J s × m/s) ÷ J = m, lalu × 10^9 = nm ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-FOTON-HC-LAMBDA

TRIK KAK TIRTA · ANGKA AJAIB 1240

Karena $hc = 1240$ eV·nm, kamu tidak perlu repot dengan pangkat sepuluh:

$$\lambda\,(\text{nm}) \approx \frac{1240}{\Delta E\,(\text{eV})}$$

Contoh: 2,48 eV → 1240 ÷ 2,48 = 500 nm (hijau). Hafalkan juga urutan warna dari energi rendah ke tinggi: "**Me-Ji-Ku-Hi-Bi-Ni-U**" (merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, ungu).

CONTOH **Energi elektron di kulit M**

Elektron atom hidrogen berada di kulit $n = 3$. Berapa energinya, dan berapa energi yang dibutuhkan untuk melepaskannya dari atom?

1. $E_3 = -\frac{13{,}6}{3^2} = -\frac{13{,}6}{9} = -1{,}51$ eV.
2. Lepas dari atom berarti naik ke $E_\infty = 0$. Energi yang dibutuhkan $= 0 - (-1{,}51) = 1{,}51$ eV.

$E_3 = -1{,}51$ eV; untuk melepaskannya perlu 1,51 eV, jauh lebih kecil daripada 13,6 eV dari keadaan dasar. Elektron di kulit luar lebih mudah lepas.

KERJAKAN BERSAMA **Warna garis 4 → 2**

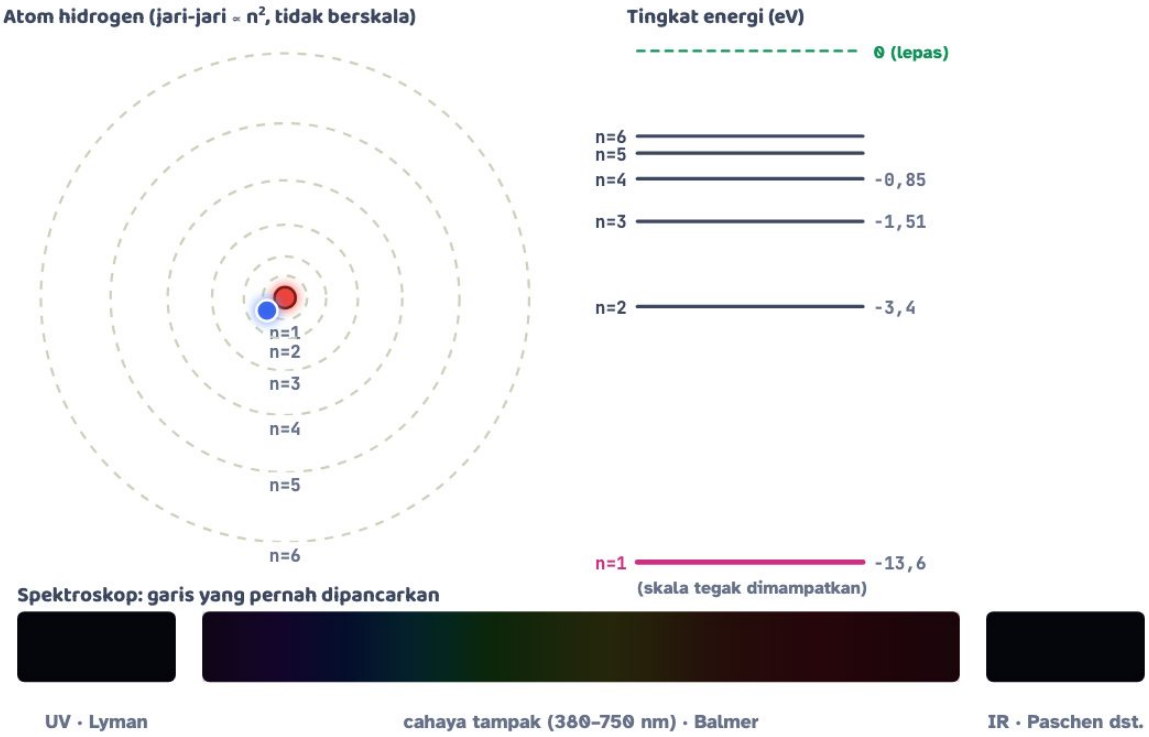
Elektron hidrogen turun dari $n = 4$ ke $n = 2$. Hitung energi foton dan panjang gelombangnya. Apa warnanya?

1. $E_4 = -13{,}6/16 = -0{,}85$ eV dan $E_2 = -13{,}6/4 = -3{,}40$ eV.
2. $\Delta E = E_4 - E_2 = -0{,}85 - (-3{,}40) = 2{,}55$ eV.
3. $\lambda = \frac{1240}{2{,}55} = 486$ nm.

Foton 2,55 eV dengan $\lambda \approx$ 486 nm: garis biru kehijauan (Hβ) dalam deret Balmer.

LAB MINI Atom Bohr Hidrogen: Lompat dan Bersinar!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-5



Kulit sekarang n	Energi elektron	Transisi terakhir	ΔE	λ foton	Deret / warna
1	-13,6 eV	–	–	–	keadaan dasar

Ketuk sebuah lintasan atau tingkat energi (atau pilih di menu) untuk memindahkan elektron. Saat turun, foton berwarna nyata terbang keluar dan garisnya tercatat di spektroskop. Nyalakan **Lampu hidrogen** untuk melihat jutaan lompatan acak. Garis apa saja yang muncul di daerah cahaya tampak? Lompatan mana yang menghasilkan garis merah?

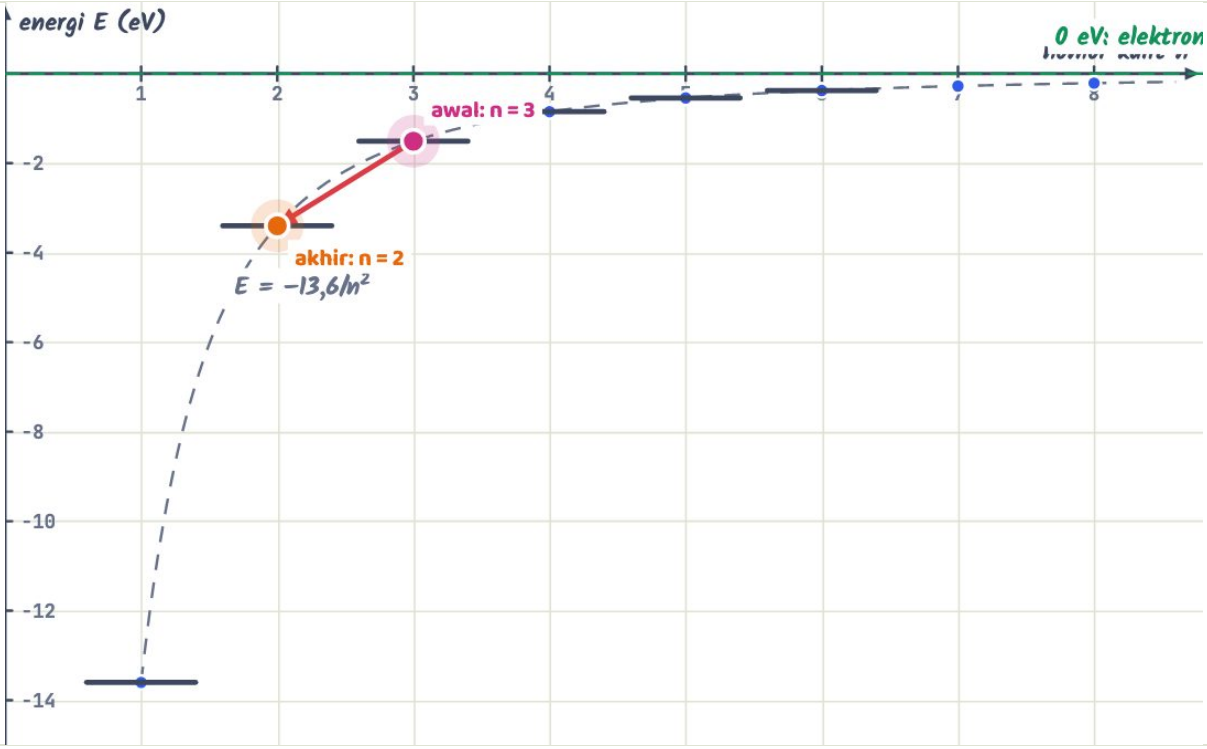
GRAFIK HIDUP

Tangga energi hidrogen

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-5

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\ \text{eV}$$

$$E_{\text{awal}} = -1{,}51\ \text{eV}, \quad E_{\text{akhir}} = -3{,}4\ \text{eV}, \quad \Delta E = 1{,}89\ \text{eV}$$



deret Balmer (sebagian besar cahaya tampak)

656 nm, merah

ΔE	λ foton	proses
1,889 eV	656,5 nm	emisi: foton dilepas

Seret titik magenta (tingkat awal) dan titik oranye (tingkat akhir). Perhatikan: makin tinggi tingkatnya, makin rapat jaraknya. Itulah sebabnya garis-garis deret Balmer makin berdesakan di dekat ungu.

ADU CEPAT

ΔE → λ dengan angka 1240

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-5

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

λ (nm) = 1240 ÷ ΔE (eV). Contoh: 2,48 eV → 500 nm.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

RUMUS RYDBERG, ION MIRIP HIDROGEN, DAN ENERGI IONISASI

Untuk ion yang hanya punya satu elektron (He^+, Li^{2+}, ...) inti bermuatan $+Z$ menarik elektron lebih kuat: $E_n = -13{,}6\,Z^2/n^2$ eV. Panjang gelombang garisnya mengikuti **rumus Rydberg**:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H Z^2 \left(\frac{1}{n^2_{\text{akhir}}} - \frac{1}{n^2_{\text{awal}}} \right), \qquad R_H = 1{,}097$$

Garis-garis setiap deret makin rapat dan akhirnya menyatu di **batas konvergensi**. Untuk deret Lyman (turun ke $n = 1$) batasnya 91,2 nm, yaitu foton yang energinya tepat cukup untuk melepaskan elektron dari keadaan dasar: $1240/91{,}2 = 13{,}6$ eV per atom, atau $13{,}6 \times 96{,}485 = 1312$ kJ/mol. Inilah **energi ionisasi pertama** hidrogen yang akan kamu temui lagi di Bab 8.

Uji nyala: warna rahasia logam

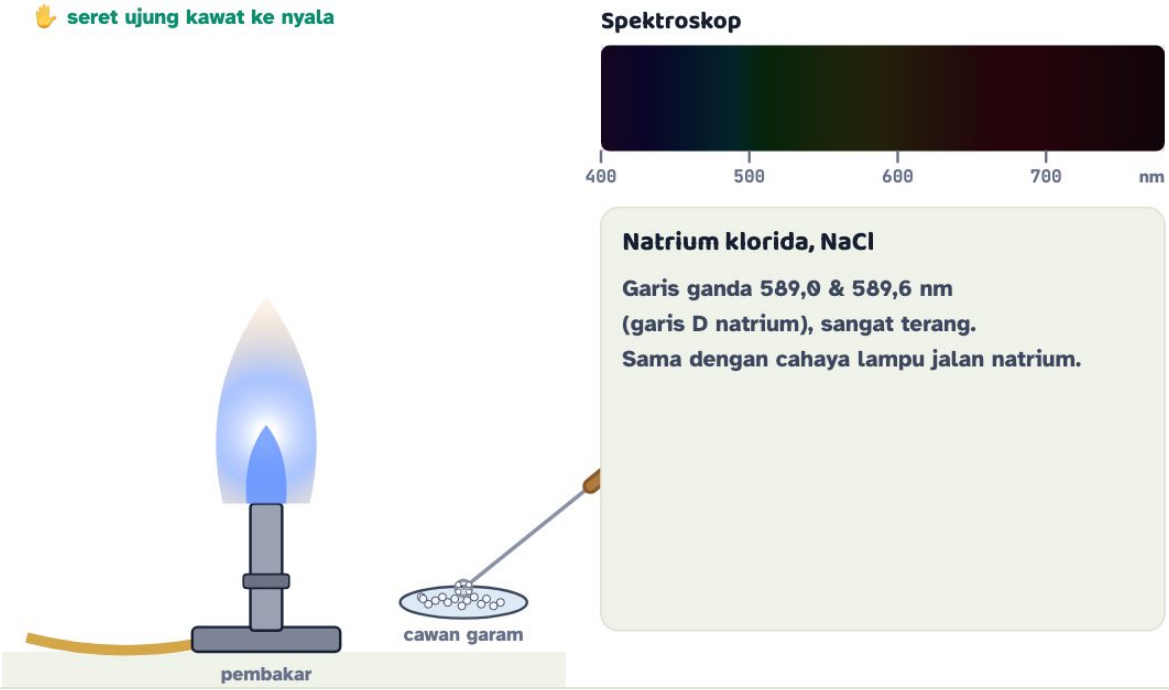
Kalau Bohr benar, setiap unsur punya tangga energi yang berbeda, sehingga warna cahayanya juga berbeda. Inilah dasar **uji nyala**: sedikit garam logam pada kawat nikrom atau platina yang bersih dimasukkan ke nyala pembakar. Panas nyala mengeksitasi elektron ion logam, lalu elektron itu turun sambil memancarkan warna khas.

Ion logam	Contoh garam	Warna nyala	Garis/pita utama (nm)	Catatan
Li Li^+	LiCl	merah tua (krimson)	671	mirip stronsium; bedakan dengan spektroskop
Na Na^+	NaCl (garam dapur)	kuning-jingga terang	589	sangat kuat; lampu jalan natrium
K K^+	KCl	ungu muda (lila)	766 (merah tua) & 404 (ungu)	mudah tertutup kuning natrium; lihat lewat kaca kobalt
Ca Ca^{2+}	$CaCl_2$	merah bata (jingga kemerahan)	pita ±622 & ±554	dari kapur dan cangkang telur
Sr Sr^{2+}	$SrCl_2$	merah terang (krimson)	pita ±606–682 & 461	kembang api dan suar merah
Ba Ba^{2+}	$BaCl_2$	hijau pucat (hijau apel)	pita ±513–524 & 554	kembang api hijau; garamnya beracun

Cu Cu^{2+}	$CuCl_2$	hijau kebiruan	±510–522 & pita 420–450	kembang api biru (dengan klorida)

LAB MINI Uji Nyala: Warna Rahasia Logam

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-5



Ion logam	Warna nyala	Garis terkuat
Na^+	biru pucat (belum ada garam di nyala)	–

ΔE garis itu
–

Pilih garam, lalu seret ujung kawat ke dalam nyala (atau tekan 🔥 **Celupkan ke nyala**). Amati warna nyala dan garis-garisnya di spektroskop. Coba campuran NaCl + KCl: ke mana perginya warna ungu kalium? Nyalakan **kaca kobalt**! Lalu uji kemampuanmu dengan **garam misteri**.

⚠️ **KESELAMATAN**

Uji nyala dengan pembakar hanya dilakukan di laboratorium sekolah bersama guru. Pakai kacamata pelindung, ikat rambut panjang, dan jauhkan kertas serta botol spiritus dari api. Garam barium dan stronsium beracun bila tertelan, dan garam tembaga mencemari air. Ambil secuil saja dengan kawat bersih, jangan dicicipi, cuci tangan sesudahnya, dan buang sisa garam ke wadah limbah yang disediakan guru. Di rumah, jangan menaburkan bahan apa pun ke kompor kecuali mengamati percikan garam dapur yang tidak sengaja.



Mudah menyala (spiritus)



Toksik (garam barium)



Berbahaya bagi lingkungan (garam tembaga)

COBA SENDIRI **Energi di balik cahaya kuning natrium**

Lampu jalan natrium memancarkan cahaya kuning dengan $\lambda = 589$ nm. Hitung selisih energi tingkat elektron natrium yang menghasilkan cahaya itu dalam eV dan dalam kJ/mol. ($h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ J s; $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m/s; $N_A = 6{,}022 \times 10^{23}$)

1. Energi satu foton: $E = \dfrac{hc}{\lambda} = \dfrac{6{,}626 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{589 \times 10^{-9}} = 3{,}37 \times 10^{-19}$ J.
2. Dalam eV: $3{,}37 \times 10^{-19} / 1{,}602 \times 10^{-19} = 2{,}11$ eV. (Cek dengan trik 1240: $1240/589 = 2{,}11$ ✔)
3. Untuk satu mol foton: $3{,}37 \times 10^{-19} \times 6{,}022 \times 10^{23} = 2{,}03 \times 10^{5}$ J = 203 kJ/mol.

$\Delta E \approx$ 2,11 eV per atom atau 203 kJ/mol, setara dengan energi ikatan kimia yang lemah. Panas nyala cukup untuk mengeksitasi elektron natrium, tetapi foton kuningnya tidak cukup kuat untuk membakar kulit seperti ultraviolet.

ID **KIMIA NUSANTARA · LANGIT TAHUN BARU DAN LAMPU JALAN**

Saat kembang api malam Tahun Baru meledak di langit kota-kota Indonesia, kamu sebenarnya sedang menonton model Bohr! Merah berasal dari garam **Sr** stronsium, hijau dari **Ba** barium, biru dari **Cu** tembaga, kuning dari natrium, dan ungu dari campuran stronsium dan tembaga. Biru adalah warna tersulit, karena senyawa tembaga pembawa warnanya mudah rusak pada suhu terlalu tinggi. Lampu jalan kuning-jingga yang dulu banyak menerangi jalan raya adalah lampu uap natrium; kini banyak yang diganti lampu LED putih yang lebih hemat listrik.

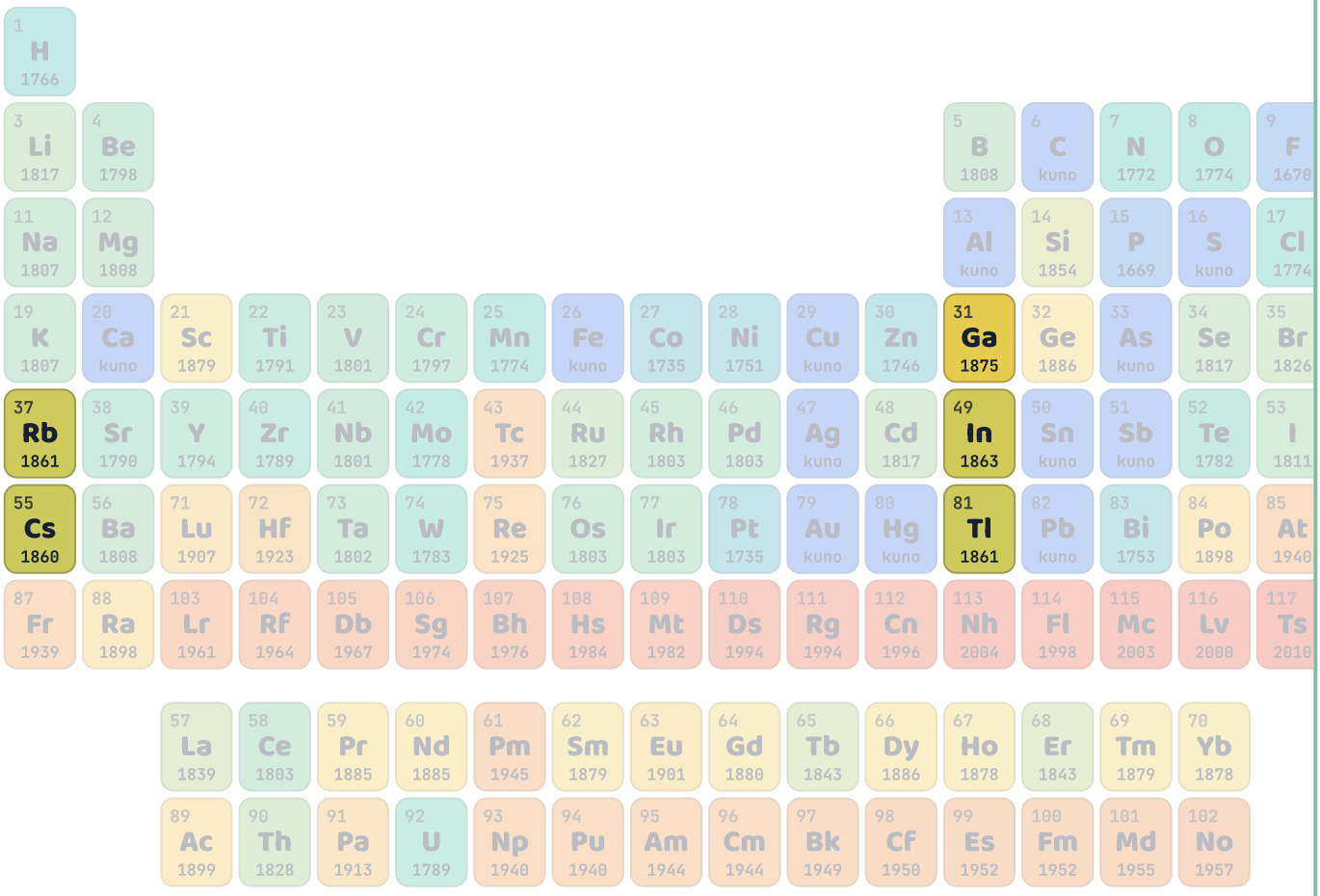
TAMU DARI MASA LALU · BUNSEN, KIRCHHOFF, DAN BOHR

Sekitar 1859, **Robert Bunsen** (penemu pembakar Bunsen yang nyalanya hampir tak berwarna) dan **Gustav Kirchhoff** membuat spektroskop pertama. Dalam dua tahun, mereka menemukan dua unsur baru hanya dari garis spektrumnya: sesium (garis biru, Latin *caesius* = biru langit) dan rubidium (garis merah tua, *rubidus*). Setengah abad kemudian, **Niels Bohr** menjelaskan asal garis-garis itu dan meraih Nobel Fisika 1922.

TABEL PERIODIK HIDUP

Unsur yang ditemukan lewat garis spektrum

Warnai menurut Tahun ditemukan



1.650 — 2.010 Tahun ditemukan

Warna menunjukkan tahun penemuan. Enam unsur yang menyala ditemukan berkat garis spektrumnya: sesium (1860), rubidium dan talium (1861, garis hijau), indium (1863, garis nila), helium (1868, di spektrum Matahari sebelum ditemukan di Bumi), dan galium (1875). Ketuk unsurnya untuk membaca kisahnya.

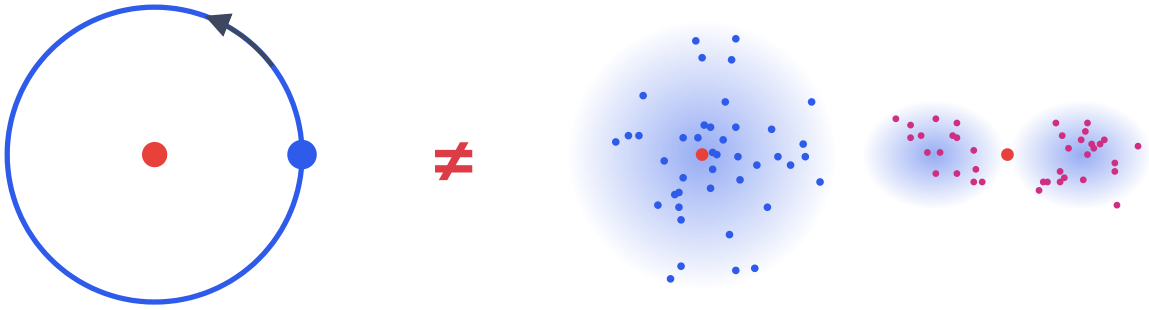
Model Bohr sukses besar untuk hidrogen: ramalannya cocok dengan garis spektrum sampai beberapa angka penting. Namun model ini gagal meramalkan spektrum atom berelektron banyak, bahkan helium yang hanya punya dua elektron. Model Bohr juga tidak menjelaskan *mengapa* elektron hanya boleh berada di tingkat tertentu. Jawabannya datang dari sifat elektron yang paling aneh: ia juga sebuah gelombang.

5.5 Model mekanika kuantum: awan elektron

Tiga gagasan besar pada 1920-an mengubah cara kita membayangkan elektron:

- **Louis de Broglie** (1924): setiap partikel yang bergerak juga bersifat gelombang, dengan panjang gelombang $\lambda = \frac{h}{mv}$. Untuk elektron, panjang gelombang ini seukuran atom!
- **Erwin Schrödinger** (1926): menulis persamaan gelombang untuk elektron dalam atom. Penyelesaiannya disebut **orbital** dan otomatis menghasilkan tingkat-tingkat energi Bohr untuk hidrogen.
- **Werner Heisenberg** (1927): **prinsip ketidakpastian**. Posisi dan kecepatan elektron tidak dapat diketahui tepat sekaligus. Jadi, lintasan elektron yang pasti seperti orbit planet tidak bisa digambar.

Bohr: orbit (lintasan pasti) ≠ **Kuantum: orbital (awan peluang)**



elektron di jalur melingkar yang pasti — orbital 1s (bola) — orbital 2p (dua cuping)

Setiap titik menandai tempat elektron "tertangkap" bila posisinya diukur berkali-kali. Makin rapat titiknya, makin besar peluang elektron berada di sana. Bentuk orbital s, p, d, dan f dibahas di Bab 7.

DEFINISI · ORBITAL

Orbital adalah daerah di sekitar inti tempat peluang menemukan elektron paling besar (biasanya digambar sebagai daerah yang memuat ±90% peluang). Dalam **model mekanika kuantum**, elektron digambarkan sebagai **awan elektron**, bukan titik yang beredar di lintasan.

Bahasa sederhana · Pernah memotret kipas angin yang sedang berputar? Bilahnya tampak seperti cakram kabur. Kamu tahu bilahnya ada di suatu tempat di dalam cakram itu, tetapi tidak tahu tepatnya di mana pada saat tertentu. Awan elektron mirip cakram kabur itu: kita hanya tahu di mana elektron *kemungkinan besar* berada.

AWAS JEBAKAN

Elektron **tidak** mengitari inti seperti planet mengitari Matahari pada lintasan yang pasti. "Orbit" adalah lintasan dalam model Bohr, sedangkan "orbital" adalah awan peluang dalam model kuantum. Kata "kulit" (K, L, M, N) tetap dipakai untuk menyebut tingkat energi utama n.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

GELOMBANG ELEKTRON YANG PAS MELINGKAR

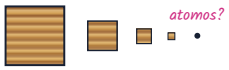
Elektron hidrogen di $n = 1$ bergerak dengan kelajuan $\pm 2{,}19 \times 10^{6}$ m/s. Panjang gelombang de Broglie-nya:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6{,}626 \times 10^{-34}}{9{,}109 \times 10^{-31} \times 2{,}19 \times 10^{6}} = 3{,}32$$

Keliling orbit Bohr pertama $= 2\pi \times 0{,}0529$ nm $= 0{,}332$ nm, tepat satu panjang gelombang! Di kulit n, keliling lintasan memuat tepat n gelombang ($2\pi r = n\lambda$), seperti senar gitar yang hanya bergetar dengan nada tertentu. Itulah alasan tersembunyi mengapa energi elektron "berjenjang". Sebagai pembanding, bola kasti 0,15 kg yang dilempar 40 m/s punya $\lambda \approx 10^{-34}$ m, terlalu kecil untuk teramati, sehingga benda sehari-hari tidak tampak bergelombang.

Mari rangkum seluruh perjalanan. Perhatikan bahwa setiap model baru tidak membuang semua model lama; model baru memperbaiki bagian yang gagal menjelaskan hasil percobaan.

Model	Tahun	Bukti utama	Gambaran atom	Kelemahan
Dalton	1803–1808	hukum kekekalan massa, perbandingan tetap & berganda	bola pejal tak terbagi	tak menjelaskan listrik, elektron, isotop
Thomson	1897/1904	sinar katode (rasio e/m)	bola positif bertabur elektron	gagal menjelaskan α yang memantul
Rutherford	1911	hamburan sinar α (Geiger–Marsden)	inti mungil positif; elektron beredar; hampir kosong	elektron seharusnya jatuh ke inti; tak menjelaskan spektrum garis
Bohr	1913	spektrum garis hidrogen	elektron di tingkat energi tertentu	hanya cocok untuk atom/ion berelektron tunggal
Mekanika kuantum	1926	sifat gelombang elektron	awan peluang (orbital)	model terbaik saat ini; matematikanya rumit

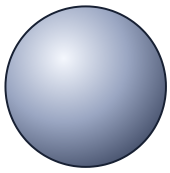


Demokritos · ±400 SM

Gagasan filsafat: materi yang dibelah terus akan berhenti pada butiran "atomos". Belum ada percobaan yang mendukung.

Demokritos ±400 SM · Dalton 1803 · Thomson 1897 · Rutherford 1911 · Bohr 1913 · Schrödinger 1926

Langkah 1. Gagasan atom lahir dari pertanyaan sederhana: sampai kapan materi bisa dibelah? Jawaban Demokritos masih berupa tebakan cerdas.

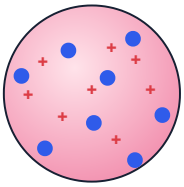


Dalton · 1803–1808

Bukti: kekekalan massa dan perbandingan tetap/berganda. Atom = bola pejal tak terbagi, seperti bola biliar mini.

Demokritos ±400 SM · Dalton 1803 · Thomson 1897 · Rutherford 1911 · Bohr 1913 · Schrödinger 1926

Langkah 2. Dalton mengubah tebakan itu menjadi teori ilmiah berdasarkan data timbangan. Reaksi kimia = penataan ulang bola-bola atom.

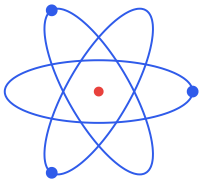


Thomson · 1897 & 1904

Bukti: sinar katode (elektron). Bola positif yang merata, bertabur elektron negatif, seperti roti kismis/semangka.

Demokritos ±400 SM · Dalton 1803 · Thomson 1897 · Rutherford 1911 · Bohr 1913 · Schrödinger 1926

Langkah 3. Penemuan elektron membuktikan atom punya bagian. Thomson menaruh elektron di dalam bola bermuatan positif.



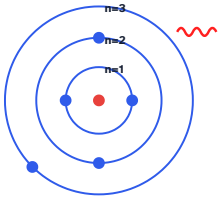
Rutherford · 1911

Bukti: hamburan sinar alfa. Inti mungil, positif, berat; elektron beredar di sekitarnya. Atom hampir seluruhnya kosong.

(inti digambar jauh lebih besar dari aslinya)

Demokritos ±400 SM · Dalton 1803 · Thomson 1897 · Rutherford 1911 · Bohr 1913 · Schrödinger 1926

Langkah 4. Partikel α yang memantul memaksa Rutherford memusatkan muatan positif dan massa atom di inti yang sangat kecil.

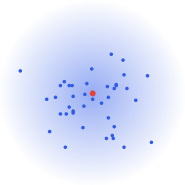


Bohr · 1913

Bukti: spektrum garis hidrogen. Elektron di tingkat energi tertentu; lompatan antartingkat menyerap atau melepas foton.

Demokritos ±400 SM · Dalton 1803 · Thomson 1897 · Rutherford 1911 · Bohr 1913 · Schrödinger 1926

Langkah 5. Bohr menjelaskan spektrum garis: elektron hanya boleh berada di tingkat energi tertentu.



Mekanika kuantum · 1926

Bukti: elektron bersifat gelombang. Elektron = awan peluang (orbital), bukan titik di lintasan yang pasti.

Demokritos ±400 SM · Dalton 1803 · Thomson 1897 · Rutherford 1911 · Bohr 1913 · Schrödinger 1926

Langkah 6. Model mekanika kuantum menggambarkan elektron sebagai awan peluang (orbital). Inilah model yang dipakai kimiawan sekarang.

TRIK KAK TIRTA · URUTAN MODEL ATOM

Ingat Kimo yang pelit berbagi kue lapis: "**D**ia **T**idak **R**ela **B**agi **K**ue" = **D**alton, **T**homson, **R**utherford, **B**ohr, **K**uantum. Lalu pasangkan setiap nama dengan "senjatanya": timbangan, sinar katode, lembaran emas, spektrum garis, gelombang elektron.

MITOS

"Elektron mengitari inti seperti planet di lintasan yang pasti."

FAKTA

Itu gambaran model Bohr yang sudah diperbaiki. Menurut model kuantum, posisi elektron hanya bisa dinyatakan sebagai peluang di dalam orbital (awan elektron).

MITOS

"Atom itu padat, makanya batu terasa keras."

FAKTA

Hampir seluruh volume atom adalah ruang kosong. Batu terasa keras karena awan elektron atom-atomnya saling menolak dan terikat kuat, bukan karena atomnya penuh materi.

MITOS

"Model atom lama sudah salah, jadi tidak perlu dipelajari."

FAKTA

Setiap model menjelaskan sebagian data dengan baik. Model Dalton masih dipakai untuk menyetarakan reaksi, dan model Bohr tetap berguna untuk spektrum hidrogen dan kulit elektron.

MITOS

"Warna kembang api berasal dari apinya yang lebih panas."

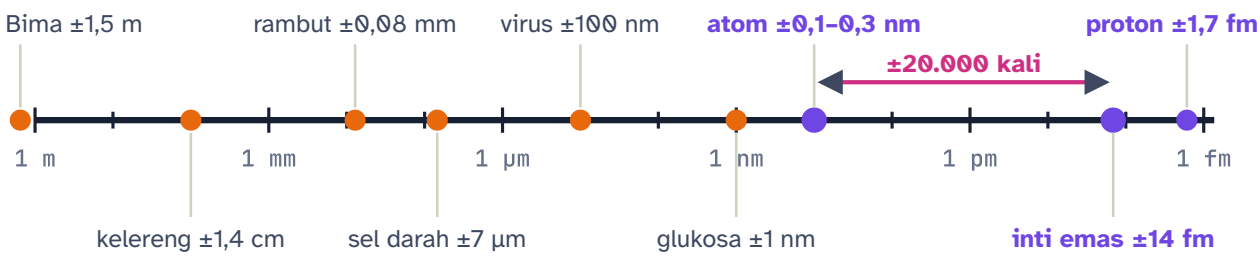
FAKTA

Warnanya berasal dari ion logam: elektron yang tereksitasi turun kembali dan memancarkan panjang gelombang khas. Stronsium merah, barium hijau, tembaga biru.

5.6 Seberapa kecil atom itu?

Diameter atom berkisar antara 0,1 dan 0,5 nanometer ($1\ \text{nm} = 10^{-9}$ m). Atom hidrogen berdiameter **±0,1 nm** dan atom emas ±0,29 nm. Inti atomnya jauh lebih kecil lagi: hanya beberapa femtometer ($1\ \text{fm} = 10^{-15}$ m). Diameter atom kira-kira **10.000 sampai 100.000 kali** diameter intinya.

Bahasa sederhana · Sehelai rambutmu tebalnya **±0,08 mm**. Kalau atom emas dijajarkan melintang di atas rambut itu, dibutuhkan sekitar 280 ribu atom! Padahal hampir seluruh isi setiap atom itu adalah ruang kosong.



setiap garis kecil = 10 kali lebih kecil daripada garis di kirinya

Penggaris logaritmik: setiap langkah ke kanan berarti 10 kali lebih kecil. Jarak dari atom ke intinya sama jauhnya dengan jarak dari sebutir kelereng ke sebuah sel darah merah!

KIMIA NUSANTARA · ATOM SELUAS STADION GBK

Bayangkan inti sebuah atom emas sebesar kelereng (±1,4 cm) yang diletakkan di titik tengah lapangan Stadion Utama Gelora Bung Karno di Jakarta. Pada skala itu, atom emasnya berdiameter ±290 m: elektron-elektron terluarnya berada kira-kira di sekitar tribun paling atas, ±145 m dari kelereng. Seluruh ruang di antara kelereng dan tribun itu nyaris kosong, padahal kelereng itulah yang memuat lebih dari 99,9% massa atom!

RUMUS HIDUP

Kalau inti atom diperbesar...

$$D_{\text{atom}} = d_{\text{inti}} \times k$$

Diameter atom kira-kira puluhan ribu kali diameter intinya. Perbesar intinya, lalu lihat seberapa luas 'rumah' elektronnya.

d_{inti} Diameter model inti `cm`

k Perbandingan diameter atom : inti `kali`

D_{atom} Diameter model atom `m`

DIAMETER MODEL ATOM

288

m

kira-kira seukuran Stadion Utama GBK

Inti sebesar **1,4** cm → atomnya selebar **288** m, kira-kira **2,747** kali panjang lapangan sepak bola. Volume atomnya **±8,742 × 10¹²** kali volume intinya: hampir semuanya ruang kosong!

Satuan Nusantara: ≈ 2,2 × tinggi Monas · ≈ 2,7 × panjang lapangan sepak bola · ≈ 6% dari tinggi Puncak Jaya

Cek satuan: cm × (tanpa satuan) ÷ 100 = m ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-SKALA-INTI-ATOM

KERJAKAN BERSAMA **Kelereng di tengah stadion**

Jari-jari atom emas 0,144 nm, sedangkan jari-jari intinya ±7,0 fm. Jika inti diperbesar menjadi kelereng berdiameter 1,4 cm, berapa diameter atom pada skala yang sama?

1. Samakan satuan: 0,144 nm = $1{,}44 \times 10^{-10}$ m dan 7,0 fm = $7{,}0 \times 10^{-15}$ m.
2. Perbandingan: $k = \dfrac{1{,}44 \times 10^{-10}}{7{,}0 \times 10^{-15}} \approx 2{,}06 \times 10^{4}$ (sekitar 20.600 kali).
3. Diameter model atom $= 1{,}4\ \text{cm} \times 20.600 = 28.800\ \text{cm} \approx 290\ \text{m}$.

Atomnya selebar ±290 m, seukuran stadion besar. Perbandingan volumenya $k^3 \approx 9 \times 10^{12}$: inti menempati kurang dari sepertriliun volume atom.

FAKTA UNIK DARI KIMO

Karena hampir seluruh massa atom terkumpul di inti yang mungil, materi inti luar biasa padat: ±2 × 10^{17} kg per meter kubik. Satu sendok teh materi inti murni akan bermassa sekitar **satu miliar ton**, lebih berat daripada semua kendaraan di Indonesia! Materi sepadat itu ada di alam semesta, yaitu di dalam bintang neutron.

Bisakah atom dilihat? Mikroskop cahaya tidak bisa, karena gelombang cahaya tampak (400–700 nm) ribuan kali lebih panjang daripada atom. Namun sejak 1981, **mikroskop penerowongan** (*scanning tunneling microscope*) dapat "meraba" permukaan logam dengan jarum setajam satu atom dan menampilkan atom-atomnya sebagai bukit-bukit kecil. Ilmuwan bahkan pernah menyusun puluhan atom satu per satu membentuk tulisan. Setelah dua ribu tahun, tebakan Demokritos akhirnya bisa "dipotret".

Kimia di sekitarmu



Kembang api Tahun Baru

Merah dari stronsium, hijau dari barium, biru dari tembaga, kuning dari natrium. Setiap warna adalah lompatan elektron tertentu.



Lampu jalan natrium

Lampu uap natrium memancarkan hampir hanya cahaya kuning 589 nm. Karena itu, di bawahnya mobil merah tampak gelap kecokelatan.



Observatorium Bosscha

Di Lembang, astronom memecah cahaya bintang menjadi spektrum. Garis-garisnya mengungkap unsur penyusun bintang yang jaraknya triliunan kilometer.

Papan reklame neon

Gas neon dalam tabung bertegangan tinggi berpendar merah-jingga. Warna lain diperoleh dari gas lain atau lapisan serbuk berpendar di kaca.

Mikroskop elektron

Laboratorium riset di universitas dan BRIN memakai berkas elektron, yang bersifat gelombang, untuk memotret virus dan partikel nano.

Detektor asap

Sebagian detektor asap di gedung dan hotel memakai sedikit amerisium-241 yang memancarkan partikel alfa, sama seperti pada percobaan Rutherford.

Cek Cepat

Percobaan yang membuktikan bahwa atom memiliki inti kecil bermuatan positif adalah ...

- percobaan sinar katode Thomson
- hamburan sinar alfa oleh lembaran emas
- percobaan tetes minyak Millikan
- uji nyala Bunsen dan Kirchhoff

Elektron atom hidrogen turun dari $n = 4$ ke $n = 2$. Foton yang dipancarkan berwarna ...

- merah (656 nm)
- ungu (410 nm)
- biru kehijauan (486 nm)
- ultraviolet (122 nm)

Menurut model mekanika kuantum, orbital adalah ...

- daerah di sekitar inti dengan peluang terbesar menemukan elektron
- lintasan berbentuk lingkaran tempat elektron beredar
- jalur elips seperti orbit planet
- bagian inti tempat proton berada

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: spektroskop dari CD bekas

Bahan: 1 keping CD/DVD bekas, kotak kardus kecil (bekas pasta gigi atau teh celup), gunting, selotip hitam, dua potong kertas karton, pensil warna, serta lampu-lampu di rumah (lampu neon/LED, senter HP).

1. Minta orang dewasa memotong CD menjadi potongan ±3 × 3 cm. Tutup tepi potongan yang tajam dengan selotip.
2. Di satu ujung kotak, buat celah tegak yang sangat sempit (±1 mm) dengan menempelkan dua potong karton yang hampir bersentuhan.
3. Di ujung lain, tempelkan potongan CD di dalam kotak, sisi mengilap menghadap celah, dimiringkan ±45°. Buat lubang intip di sisi atas kotak dekat CD.
4. Arahkan celah ke lampu neon atau LED, lalu intip. Putar kotak perlahan sampai pita warna tampak jelas.
5. Ulangi untuk layar HP berwarna kuning dan langit biru siang hari. Gambar setiap spektrum dengan pensil warna.

Keselamatan: jangan pernah mengarahkan spektroskop atau matamu langsung ke Matahari, karena dapat merusak retina secara permanen. Pemotongan CD dilakukan orang dewasa. Jangan membongkar atau memecahkan lampu neon hemat energi, karena berisi sedikit uap raksa.

Pertanyaan: Sumber cahaya mana yang memberi pelangi utuh, dan mana yang berupa garis-garis terpisah? Mengapa layar HP yang tampak kuning ternyata tidak memancarkan cahaya kuning sama sekali?

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 5 dalam 3 menit

☑ Kamu sekarang bisa...

- menceritakan perkembangan model atom **Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr**, dan **mekanika kuantum** beserta percobaan yang melahirkannya
- menjelaskan bukti adanya **elektron** (sinar katode) dan **inti atom** (hamburan sinar alfa)
- menghitung energi elektron pada **tingkat energi Bohr** dan panjang gelombang **foton** yang dipancarkan saat elektron berpindah tingkat
- menghubungkan **spektrum garis** dan warna **uji nyala** dengan lompatan elektron
- membandingkan ukuran inti dengan ukuran atom dan menjelaskan mengapa atom hampir seluruhnya **ruang kosong**

🔑 Istilah kunci

atom · Atom · Elektron · partikel alfa · Inti atom · Spektrum emisi · foton · tingkat energi · keadaan dasar · keadaan tereksitasi · uji nyala · Orbital · model mekanika kuantum

Rumus penting

$$E_n = -\frac{13{,}6\ Z^2}{n^2}\ \text{eV}$$

Energi elektron pada tingkat Bohr. Makin jauh tingkatnya dari inti (n makin besar), energinya makin mendekati nol: elektron makin longgar terikat.

$$\lambda = \frac{h\,c}{\Delta E}$$

Panjang gelombang foton dari selisih energi. Makin besar lompatan energi elektron, makin pendek gelombang cahaya yang dilepaskan: dari merah ke ungu, lalu ultraviolet.

$$D_{\text{atom}} = d_{\text{inti}} \times k$$

Kalau inti atom diperbesar.... Diameter atom kira-kira puluhan ribu kali diameter intinya. Perbesar intinya, lalu lihat seberapa luas 'rumah' elektronnya.

Jangan sampai terjebak

- "Tak terbagi dalam reaksi kimia" tidak sama dengan "tak punya bagian".
- Atom bukan bola padat yang penuh materi.
- Uji nyala dengan pembakar hanya dilakukan di laboratorium sekolah bersama guru.

Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=5

Teka-teki untuk Bab 6

Semua atom karbon punya 6 proton di intinya. Tetapi ada atom karbon yang "lebih berat", dan "jam atom" seperti inilah yang dipakai arkeolog untuk menentukan umur temuan purbakala. Bagaimana mungkin atom-atom satu unsur punya massa berbeda, padahal Dalton bilang atom satu unsur identik?

▼ Intip petunjuk

Inti atom tidak hanya berisi proton. Pada 1932, James Chadwick menemukan partikel netral di dalam inti: **neutron**. Karbon-12 punya 6 neutron, sedangkan karbon-14 punya 8 neutron. Atom satu unsur dengan jumlah neutron berbeda disebut **isotop**. Karbon-14 cocok untuk benda berumur sampai ±50.000 tahun; untuk lapisan fosil Sangiran yang berumur jutaan tahun, ilmuwan memakai "jam isotop" lain, misalnya argon pada abu vulkanik. Semua itu dibahas di Bab 6.

06 Partikel Atom, Isotop & Massa Atom: Menimbang yang Tak Terlihat

Semua atom karbon punya 6 proton, tetapi tidak semuanya sama berat. Ada karbon "gemuk" yang bisa menjadi jam penunjuk umur, dan ada klorin yang massanya 35,45, bukan bilangan bulat. Mari membongkar isi atom dan menimbangnya!

Setelah bab ini, kamu bisa

- menyebutkan **muatan, massa relatif, dan letak** proton, neutron, dan elektron;
- menentukan jumlah proton, neutron, dan elektron dari **notasi nuklida** ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, untuk atom maupun **ion**;
- membedakan **isotop, isobar, dan isoton**, serta isotop stabil dan radioaktif;
- menghitung **massa atom relatif (Ar)** sebagai rata-rata berbobot dari kelimpahan isotop, dan sebaliknya;
- membaca **spektrum massa** (klorin, brom, magnesium) dan menjelaskan cara kerja spektrometer massa.

KEMBAR YANG BEDA BERAT

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Di tabel periodik, massa atom relatif klorin tertulis 35,45. Mengapa angkanya tidak bulat?

- Karena atom klorin punya "setengah proton" atau "setengah neutron".
- Karena timbangan para ilmuwan kurang teliti.
- Karena 35,45 adalah rata-rata dari campuran atom Cl-35 dan Cl-37.
- Karena massa elektron menambah 0,45 pada nomor massa 35.

Jawabannya: rata-rata campuran isotop. Tidak ada satu pun atom klorin bermassa 35,45. Sekitar 3 dari 4 atom klorin adalah Cl-35, sisanya Cl-37. Rata-ratanya lebih dekat ke 35, persis seperti nilai rata-rata kelas yang lebih dekat ke nilai kebanyakan siswa. Tidak ada setengah proton, dan elektron terlalu ringan untuk menambah 0,45. Bab ini mengajarkan cara menghitungnya.

6.1 Tiga partikel penyusun atom

Di Bab 5 kamu sudah mengikuti para ilmuwan membongkar atom. Hasilnya, setiap atom tersusun atas tiga jenis **partikel subatom**. Dua di antaranya, **proton** dan **neutron**, berdesakan di **inti atom** yang sangat mungil. Partikel ketiga, **elektron**, bergerak di ruang luas di sekeliling inti.

Bahasa sederhana · Bayangkan atom seperti sebuah desa. Di tengahnya ada balai desa yang sangat padat, yaitu inti. Di balai itu tinggal warga bermuatan positif (proton) dan warga netral (neutron). Di sekelilingnya, warga yang sangat ringan dan bermuatan negatif (elektron) berlarian ke sana kemari. Desa ini hampir seluruhnya berupa lapangan kosong!

Partikel	Lambang	Muatan relatif	Massa relatif	Massa sebenarnya	Letak	Ditemukan
Proton	${}_{1}^{1}\mathrm{p}$ atau p^{+}	+1	1	$1{,}673 \times 10^{-27}$ kg	inti	Rutherford, 1919
Neutron	${}_{0}^{1}\mathrm{n}$ atau n^{0}	0	1	$1{,}675 \times 10^{-27}$ kg	inti	Chadwick, 1932
Elektron	${}_{-1}^{0}\mathrm{e}$ atau e^{-}	−1	$\frac{1}{1836}$ (≈ 0,0005)	$9{,}109 \times 10^{-31}$ kg	di luar inti (kulit/awan elektron)	Thomson, 1897

Dua hal penting dari tabel itu:

- **Muatan proton dan elektron sama besar** ($1{,}602 \times 10^{-19}$ coulomb) tetapi berlawanan tanda. Jadi atom yang punya jumlah proton dan elektron sama bersifat **netral**.
- **Proton dan neutron hampir sama berat, elektron sangat ringan.** Kalau satu proton seberat sekarung beras 50 kg, satu neutron kira-kira 50,07 kg, sedangkan satu elektron hanya ±27 gram, kira-kira dua sendok makan gula pasir.

Akibatnya, lebih dari 99,9% massa atom terkumpul di inti. Pada atom karbon, keenam elektronnya hanya menyumbang ±0,03% massa. Saat menimbang atom, elektron hampir boleh diabaikan.

> 🕰️ **TAMU DARI MASA LALU · PARTIKEL TANPA MUATAN**
>
> Pada 1920 Ernest Rutherford menduga ada partikel netral di dalam inti, sebab massa inti jauh lebih besar daripada jumlah protonnya. Partikel tanpa muatan sangat sulit ditangkap karena tidak ditarik atau ditolak oleh listrik. Pada 1932 **James Chadwick** menembaki logam berilium dengan partikel alfa. Keluarlah "sinar" tak bermuatan yang mampu menendang proton keluar dari lilin parafin. Chadwick membuktikan bahwa sinar itu adalah partikel netral yang massanya hampir sama dengan proton: **neutron**. Ia meraih Nobel Fisika 1935.

6.2 Nomor atom, nomor massa, dan ion

Setiap warga Indonesia punya NIK di KTP-nya. Atom juga punya "KTP", yaitu **jumlah protonnya**. Semua atom dengan 6 proton pasti karbon. Semua atom dengan 8 proton pasti oksigen. Tambah satu proton saja, unsurnya berubah!

DEFINISI · NOMOR ATOM DAN NOMOR MASSA

Nomor atom (Z) adalah jumlah proton dalam inti. Nomor atom menentukan jenis unsur.
Nomor massa (A) adalah jumlah proton ditambah neutron dalam inti. Proton dan neutron bersama-sama disebut **nukleon**. Atom dengan Z dan A tertentu disebut **nuklida**.

Keduanya ditulis dalam **notasi nuklida**. Nomor massa di kiri atas, nomor atom di kiri bawah, dan muatan (bila ada) di kanan atas:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X}^{\text{muatan}} \qquad N = A - Z $$



Ion klorida dari garam dapur, ${}^{35}_{17}\mathrm{Cl}^{-}$: 17 proton, 35 – 17 = 18 neutron, dan 17 + 1 = 18 elektron.

TRIK KAK TIRTA · A DI ATAS

"**A** di **A**tas, **Z** di bawah." Angka besar di atas selalu nomor massa, angka kecil di bawah selalu nomor atom. Lalu ingat tiga peran partikel: **proton = KTP** (tidak boleh diganti, menentukan unsur), **neutron = berat badan** (boleh beda, unsurnya tetap), **elektron = jaket** (boleh dilepas atau ditambah, membentuk ion).

Tebak Dulu!

Atom natrium berubah menjadi ion Na^{+} di dalam garam dapur. Apa yang terjadi pada atom itu?

- Natrium mendapat satu proton tambahan, jadi muatannya positif.
- Natrium melepaskan satu elektron, jadi protonnya lebih banyak satu.
- Natrium kehilangan satu neutron.
- Natrium mendapat satu elektron.

Jawabannya: melepaskan satu elektron. Ion terbentuk karena atom melepas atau menerima *elektron*. Proton tidak ikut berpindah dalam reaksi kimia. Seandainya natrium mendapat proton, ia berubah menjadi magnesium! Natrium punya 11 proton dan 11 elektron. Setelah melepas 1 elektron tinggal 10 elektron, sehingga muatannya $11 - 10 = +1$.

Atom bisa melepas atau menerima elektron. Hasilnya adalah **ion**, partikel bermuatan listrik. Proton dan neutronnya tidak berubah sedikit pun.

DEFINISI · KATION DAN ANION

Kation adalah ion bermuatan positif. Kation terbentuk saat atom **melepas** elektron, sehingga proton lebih banyak daripada elektron. Contoh: Na^{+}, Mg^{2+}, Al^{3+}.

Anion adalah ion bermuatan negatif. Anion terbentuk saat atom **menerima** elektron, sehingga elektron lebih banyak daripada proton. Contoh: Cl^{-}, O^{2-}, N^{3-}.

ATURAN · MENGHITUNG PARTIKEL DARI NOTASI

$$p = Z \qquad n = A - Z \qquad e = Z - (\text{muatan ion})$$

Untuk atom netral, muatannya 0, jadi $e = p$. Untuk Al^{3+}: $e = 13 - (+3) = 10$. Untuk O^{2-}: $e = 8 - (-2) = 10$.

Notasi	Proton	Neutron	Elektron	Jenis
$^{23}_{11}\mathrm{Na}$	11	12	11	atom netral
$^{23}_{11}\mathrm{Na}^{+}$	11	12	10	kation
$^{16}_{8}\mathrm{O}^{2-}$	8	8	10	anion

$^{27}_{13}Al^{3+}$	13	14	10	kation
$^{35}_{17}Cl^{-}$	17	18	18	anion
$^{56}_{26}Fe^{3+}$	26	30	23	kation (karat besi)

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Ion terbentuk dengan menambah atau mengurangi **elektron**, bukan proton. Muatan positif berarti *kekurangan* elektron. Ingat seperti utang: kehilangan sesuatu yang negatif membuatmu makin "positif". Mengubah jumlah proton berarti mengubah unsurnya, dan itu hanya terjadi pada reaksi inti (Bab 37), bukan reaksi kimia biasa.

RUMUS HIDUP

Proton, neutron, elektron dari notasi

$$n = A - Z \qquad e = Z - q$$

Nomor atom memberi jumlah proton. Nomor massa dikurangi nomor atom memberi jumlah neutron. Elektron sama dengan proton dikurangi muatan ion.

- A Nomor massa
- Z Nomor atom
- q Muatan ion
- n Jumlah neutron `neutron`

JUMLAH NEUTRON

18

neutron

anion: elektron lebih banyak daripada proton

ion klorida dari garam dapur

Partikel ini punya **17** proton, **18** neutron, dan **18** elektron. (Tanda — berarti mustahil.)

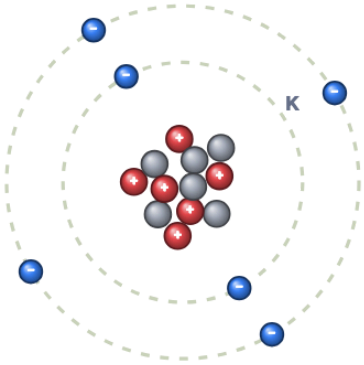
Cek satuan: semua besaran berupa bilangan cacah (banyaknya partikel)

`RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PARTIKEL-NOTASI`

LAB MINI **Bangun Atom: rakit proton, neutron, dan elektron**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-6

✅ **Tantangan 1/12: Buat atom karbon-12 yang netral (^{12}C).**



susunan elektron: 2, 4

12
6 C
Karbon-12

− 6 proton +
− 6 neutron +
− 6 elektron +

muatan 0 · netral

inti stabil ✔

Unsur	Notasi	Nomor massa A	Muatan	Jenis
Karbon-12	$^{12}_{6}C$	12	0 (netral)	atom netral

Inti
inti stabil ✔

Geser slider atau ketuk tombol **−** dan **+** di gambar. Perhatikan: apa yang berubah saat kamu menambah **proton**? Bagaimana kalau hanya **neutron**? Atau hanya **elektron**? Kerjakan tantangan di pita kuning, misalnya "buat ion O^{2-}", lalu tekan 🎯 untuk tantangan berikutnya. Label "inti" memberi tahu apakah inti rakitanmu stabil atau radioaktif.

CONTOH **Membaca notasi ion**

Tentukan jumlah proton, neutron, dan elektron dalam ion $^{27}_{13}Al^{3+}$ dan ion $^{32}_{16}S^{2-}$.

1. Al^{3+}: proton $= Z = 13$; neutron $= 27 - 13 = 14$; elektron $= 13 - 3 = 10$.
2. S^{2-}: proton $= 16$; neutron $= 32 - 16 = 16$; elektron $= 16 + 2 = 18$.

Al^{3+}: 13 p, 14 n, 10 e. S^{2-}: 16 p, 16 n, 18 e. Perhatikan: muatan hanya mengubah jumlah elektron, inti tetap sama.

KELUARGA 10 ELEKTRON

O^{2-}, F^{-}, Ne, Na^{+}, Mg^{2+}, dan Al^{3+} sama-sama punya **10 elektron**. Partikel dengan jumlah elektron sama disebut **isoelektronik**. Susunan elektronnya sama dengan neon, gas mulia yang sangat stabil. Di Bab 7 dan Bab 10 kamu akan melihat mengapa banyak ion "ingin" meniru gas mulia.

ADU CEPAT **Adu Cepat: hitung neutron**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-6

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

n = A − Z: angka atas dikurangi angka bawah.

ADU CEPAT **Adu Cepat: hitung elektron ion**

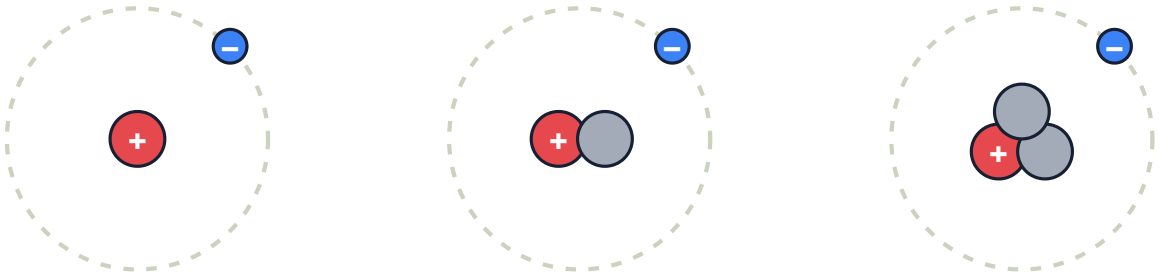
ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-6

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

e = Z − muatan. Muatan 2+ berarti 2 elektron lepas; muatan 2− berarti 2 elektron masuk.

6.3 Isotop: kembar yang beda berat

Kembali ke kelereng Bima. Dua kelereng bisa tampak kembar dari luar tetapi berbeda isinya. Atom juga begitu. Semua atom hidrogen punya 1 proton, tetapi ada yang intinya hanya berisi proton, ada yang ditemani 1 neutron, dan ada yang ditemani 2 neutron.



protium ^{1}H
1 p · 0 n · ±99,98%

deuterium ^{2}H (D)
1 p · 1 n · ±0,015%

tritium ^{3}H (T)
1 p · 2 n · radioaktif

Tiga isotop hidrogen. Semuanya punya 1 proton dan 1 elektron, jadi sifat kimianya sama. Yang berbeda hanya jumlah neutron, sehingga massanya berbeda. Tritium meluruh dengan waktu paruh 12,3 tahun.

DEFINISI · ISOTOP, ISOBAR, ISOTON

Isotop: atom-atom dari unsur yang sama (nomor atom Z sama) tetapi nomor massanya berbeda karena jumlah neutronnya berbeda. Contoh: ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$.

Isobar: atom-atom unsur berbeda yang nomor massanya sama. Contoh: ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ dan ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$; ${}^{40}_{18}\mathrm{Ar}$, ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$, dan ${}^{40}_{20}\mathrm{Ca}$.

Isoton: atom-atom unsur berbeda yang jumlah neutronnya sama. Contoh: ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$ dan ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$ (sama-sama 7 neutron).

TRIK KAK TIRTA · HURUF TERAKHIR YANG SAMA

Lihat huruf penting di setiap nama: isoto**P** → **P**roton sama; isob**A**r → nomor massa **A** sama; isoto**N** → **N**eutron sama.

Bahasa sederhana · Isotop itu seperti saudara kembar yang memakai baju sama (elektron sama) dan punya nama keluarga sama (proton sama), tetapi berat badannya berbeda (neutron berbeda). Karena bajunya sama, cara mereka bergaul dengan atom lain juga sama.

Mengapa sifat kimia isotop sama? Reaksi kimia hanya melibatkan **elektron**, terutama elektron terluar. Isotop-isotop satu unsur punya jumlah dan susunan elektron yang sama, jadi bereaksi dengan cara yang sama. Garam dari Cl-35 dan garam dari Cl-37 sama asinnya. Yang berbeda adalah **sifat fisika** yang bergantung pada massa: massa jenis, titik didih, dan kecepatan berdifusi.

AIR BERAT: ES YANG TENGGELAM

Air berat, $\mathrm{D_2O}$, dibuat dari deuterium. Rasanya tidak bisa dibedakan dari air biasa, tetapi massa jenisnya ±1,11 g/mL, titik didihnya 101,4 °C, dan titik bekunya 3,8 °C. Es batu air berat **tenggelam** di dalam air biasa! Air berat dipakai di beberapa reaktor nuklir untuk memperlambat neutron.

Coba ikuti animasi ini. Perhatikan kapan unsurnya tetap, dan kapan unsurnya berganti.



?
6 C

Z = 6 → pasti KARBON

p = 6 · n = 0 · e = 0

(bayangkan dulu inti berisi proton saja)

Langkah 1. Mulai dari inti berisi 6 proton (merah). Jumlah proton menentukan unsur: $Z = 6$ berarti **karbon**. (Inti sungguhan selalu butuh neutron sebagai "lem"; ini baru bayangan.)



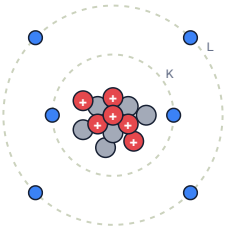
12
6 C

A = p + n = 6 + 6 = 12

p = 6 · n = 6 · e = 0

inti karbon-12

Langkah 2. Masukkan 6 neutron (abu-abu). Nomor massa $A = 6 + 6 = 12$. Kita punya inti **karbon-12**.



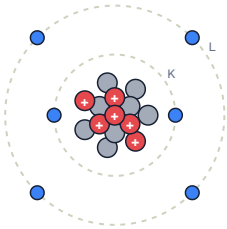
12
6 C

atom netral: muatan 0

p = 6 · n = 6 · e = 6

6 muatan (+) dan 6 muatan (–)

Langkah 3. Tambahkan 6 elektron di kulit K (2) dan kulit L (4). Muatan 6+ dan 6– saling meniadakan: atom $^{12}_{6}\mathrm{C}$ yang **netral**.



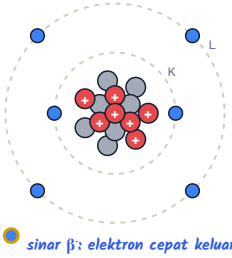
14
6 C

masih KARBON (Z tetap 6)

p = 6 · n = 8 · e = 6

isotop karbon, radioaktif

Langkah 4. Tambahkan 2 neutron lagi. Proton tetap 6, jadi atom ini **masih karbon**, yaitu $^{14}_{6}\mathrm{C}$, isotop karbon. Kelebihan neutron membuat intinya tidak stabil (radioaktif).



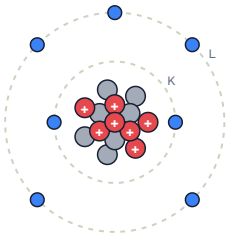
14
7 N +

n → p⁺ + e⁻ (sinar β)

p = 7 · n = 7 · e = 6

proton bertambah: unsur BERUBAH!

Langkah 5. Suatu saat satu neutron berubah menjadi proton sambil menembakkan elektron cepat (sinar beta). Kini ada **7 proton**: unsurnya berubah menjadi **nitrogen**! Elektronnya masih 6, jadi untuk sementara ia ion N^{+}.



14
7 N

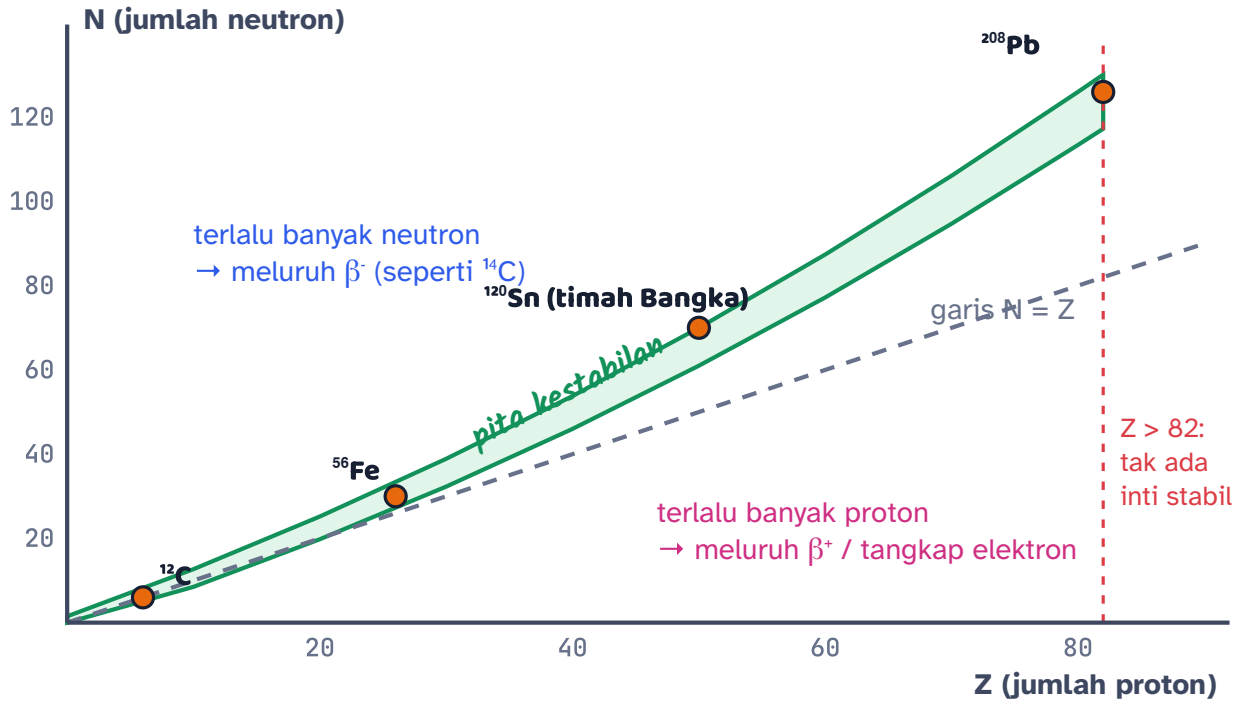
nitrogen-14, atom netral

p = 7 · n = 7 · e = 7

isobar karbon-14: A sama, Z beda

Langkah 6. Ion itu segera menangkap satu elektron dari sekitarnya: $^{14}_{7}\mathrm{N}$ netral. Karbon-14 dan nitrogen-14 adalah **isobar**. Begitulah karbon-14 di fosil perlahan "menghilang" menjadi nitrogen.

Ada isotop yang intinya **stabil**, tidak berubah selamanya. Ada pula yang intinya tidak stabil sehingga meluruh sambil memancarkan radiasi. Isotop seperti ini disebut **isotop radioaktif** atau radioisotop. Dari ±3.000 nuklida yang sudah dikenal, hanya sekitar 250 yang stabil. Inti stabil berkumpul di sebuah "pita" yang sempit.



Pita kestabilan. Inti ringan stabil bila jumlah neutron ≈ jumlah proton. Inti berat butuh neutron lebih banyak (timbal-208: 126 neutron untuk 82 proton) karena neutron menambah "lem" tanpa menambah tolak-menolak listrik antarproton.

TAMU DARI MASA LALU · NAMA DARI "TEMPAT YANG SAMA"

Pada 1913 kimiawan Inggris **Frederick Soddy** menyadari bahwa beberapa zat hasil peluruhan radioaktif bermassa berbeda tetapi sifat kimianya sama persis, sehingga harus menempati kotak yang sama di tabel periodik. Atas usul dokter Margaret Todd, ia menamainya *isotop*, dari bahasa Yunani *isos* (sama) dan *topos* (tempat). Soddy meraih Nobel Kimia 1921. Pada tahun yang sama, J.J. Thomson menemukan bahwa gas neon biasa pun tersusun atas dua jenis atom, bermassa 20 dan 22.

Isotop radioaktif meluruh dengan laju yang tetap, diukur dengan **waktu paruh** ($t_{1/2}$): waktu yang dibutuhkan sampai separuh atomnya meluruh. Inilah dasar "jam atom" untuk menanggali benda purba. Karbon-14 terus terbentuk di udara atas saat neutron dari sinar kosmik menabrak nitrogen. Tumbuhan menyerapnya lewat CO_2, dan hewan memakan tumbuhan. Setelah makhluk hidup mati, pasokan karbon-14 berhenti dan yang tersisa meluruh dengan waktu paruh 5.730 tahun.

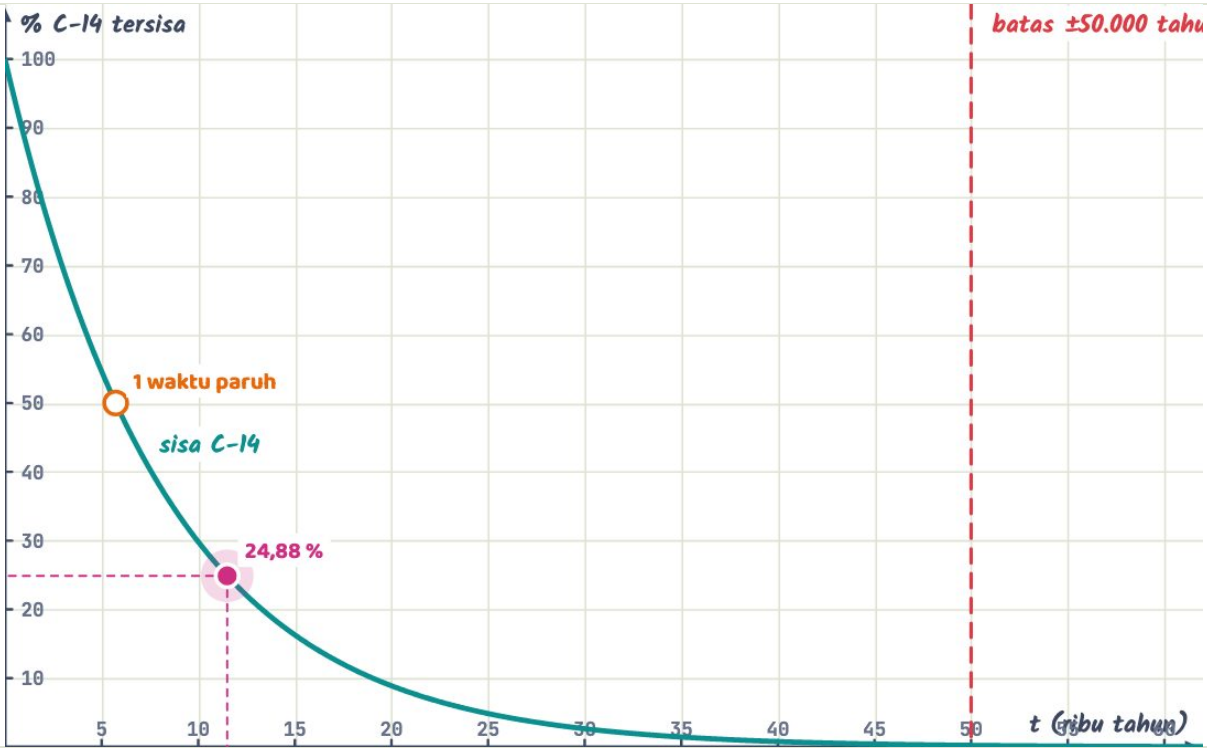
GRAFIK HIDUP

Jam karbon-14: berapa yang masih tersisa?

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-6

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/5730}$$

$$t = 11{,}5 \text{ ribu tahun} \Rightarrow \text{sisa } {}^{14}\text{C} = 24{,}88\,\%$$



dua waktu paruh: tinggal seperempat

sisa C-14	banyaknya waktu paruh
24,88 %	2,01

Seret titik magenta. Setiap 5.730 tahun, sisa karbon-14 tinggal separuhnya. Mulai umur berapa sisanya terlalu sedikit untuk diukur dengan teliti?

ID

KIMIA NUSANTARA · MENANGGALI MANUSIA PURBA SANGIRAN

Situs Sangiran di Sragen, Jawa Tengah, menyimpan fosil *Homo erectus* yang berumur ratusan ribu hingga lebih dari satu juta tahun. Karbon-14 tidak sanggup menanggalinya: setelah ±50.000 tahun, karbon-14 yang tersisa sudah terlalu sedikit. Para peneliti memakai jam isotop lain yang jauh lebih lambat, yaitu **kalium-40** (waktu paruh 1,25 miliar tahun) yang meluruh menjadi **argon-40** di dalam lapisan abu gunung api yang mengapit fosil. Sementara itu, lukisan tangan di gua-gua Maros–Pangkep, Sulawesi Selatan, yang berumur lebih dari 40.000 tahun ditanggali dengan isotop **uranium dan torium** pada kerak kapur yang menutupinya. Isotop adalah kalender sejarah Nusantara!

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Karbon-14 tidak bisa menanggali semua benda tua. Ia hanya untuk bahan yang pernah hidup (kayu, arang, tulang, kain) dan berumur kurang dari ±50.000 tahun. Batuan, fosil jutaan tahun, dan dinosaurus ditanggali dengan isotop lain seperti kalium-40 atau uranium-238.

CONTOH **Isotop, isobar, atau isoton?**

Tentukan hubungan setiap pasangan: (a) $^{35}_{17}\mathrm{Cl}$ dan $^{37}_{17}\mathrm{Cl}$; (b) $^{40}_{19}\mathrm{K}$ dan $^{40}_{20}\mathrm{Ca}$; (c) $^{39}_{19}\mathrm{K}$ dan $^{40}_{20}\mathrm{Ca}$.

1. (a) Z sama-sama 17, A berbeda (35 dan 37) → **isotop**.
2. (b) A sama-sama 40, Z berbeda → **isobar**.
3. (c) Neutron: $39 - 19 = 20$ dan $40 - 20 = 20$. Jumlah neutron sama → **isoton**.

(a) isotop, (b) isobar, (c) isoton. Kuncinya: hitung dulu Z, A, dan $N = A - Z$ untuk kedua atom, lalu lihat mana yang sama.

6.4 Menimbang atom: satuan massa atom dan Ar

Satu atom karbon-12 bermassa $1{,}993 \times 10^{-23}$ gram. Menuliskan angka sekecil itu setiap hari sangat merepotkan. Kimiawan memakai cara yang lebih cerdik: membandingkan massa atom dengan sebuah **anak timbangan standar**, sama seperti pedagang membandingkan barang dengan anak timbangan di pasar.

DEFINISI · SATUAN MASSA ATOM DAN MASSA ATOM RELATIF

Satuan massa atom (sma, lambang u atau Da) adalah $\frac{1}{12}$ massa satu atom karbon-12:

$$1\ \mathrm{u} = \tfrac{1}{12} \times 1{,}993 \times 10^{-23}\ \mathrm{g} = 1{,}6605 \times 10^{-24}\ \mathrm{g}$$

Massa atom relatif (A_r) suatu unsur adalah massa rata-rata satu atom unsur itu dibandingkan dengan $\frac{1}{12}$ massa satu atom karbon-12:

$$A_r\,\mathrm{X} = \frac{\text{massa rata-rata 1 atom X}}{\frac{1}{12} \times \text{massa 1 atom } {}^{12}\mathrm{C}}$$

Karena berupa perbandingan, A_r **tidak bersatuan**.

Bahasa sederhana · Bayangkan kamu menimbang semua benda dengan "satuan kelereng". Kalau sebuah bola beratnya sama dengan 12 kelereng, kita sebut beratnya 12. Atom juga ditimbang dengan "kelereng atom", yaitu seperdua belas atom karbon-12. Atom besi kira-kira seberat 56 kelereng atom, jadi A_r besi ±56.

RUMUS HIDUP

Ar dari massa satu atom

$$A_r = \frac{m_{\text{atom}}}{1{,}6605 \times 10^{-24}\ \text{g}}$$

Ar menjawab pertanyaan: satu atom unsur ini berapa kali lebih berat daripada seperdua belas atom karbon-12?

m_{atom} Massa rata-rata satu atom × 10^{-24} g

A_r Massa atom relatif

MASSA ATOM RELATIF

55,84

besi

Satu atom ini **55,84** kali lebih berat daripada 1 u, jadi satu mol atomnya bermassa **55,84** gram.

Cek satuan: g ÷ g = tanpa satuan (karena itu disebut relatif)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-AR-DARI-MASSA-ATOM

Tetapi hampir setiap unsur di alam adalah **campuran isotop**. Klorin di garam Madura, air laut, maupun air PDAM selalu berisi ±75,8% atom Cl-35 dan ±24,2% atom Cl-37. Maka A_r yang tertulis di tabel periodik adalah **rata-rata berbobot**: setiap isotop "bersuara" sebanyak kelimpahannya.

ATURAN · AR SEBAGAI RATA-RATA BERBOBOT

$$A_r = \frac{\sum(\text{massa isotop} \times \text{kelimpahan }\%)}{100}$$

Untuk klorin: $A_r = \dfrac{34{,}969 \times 75{,}8 + 36{,}966 \times 24{,}2}{100} = 35{,}45.$

Kalau massa isotop didekati dengan nomor massanya (35 dan 37), hasilnya $35{,}48 \approx 35{,}5$, nilai yang sering dipakai di buku sekolah.

RUMUS HIDUP

Ar rata-rata dua isotop

$$A_r = \frac{m_1\, p_1 + m_2\,(100 - p_1)}{100}$$

Massa atom relatif adalah rata-rata berbobot: setiap massa isotop dikali persen kelimpahannya, dijumlahkan, lalu dibagi 100.

- m_1 Massa isotop 1
- p_1 Kelimpahan isotop 1 %
- m_2 Massa isotop 2
- A_r Massa atom relatif

MASSA ATOM RELATIF

35,452

klorin!

Dari setiap 100 atom: **75,8** atom bermassa **34,969** dan **24,2** atom bermassa **36,966**. Rata-ratanya **35,452**.

Cek satuan: massa × % ÷ 100 = massa relatif (tanpa satuan)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-AR-DUA-ISOTOP

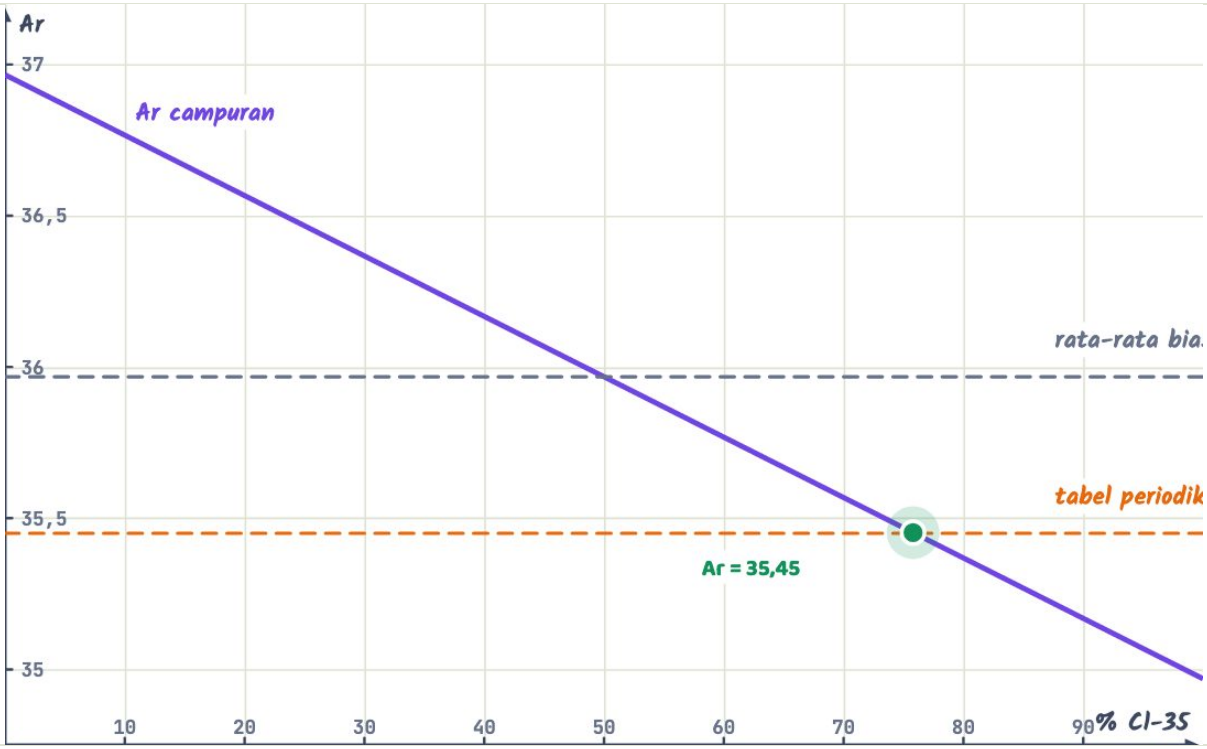
GRAFIK HIDUP

Ar klorin: jungkat-jungkit dua isotop

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-6

$$A_r = \frac{34{,}969\,p + 36{,}966\,(100 - p)}{100}$$

$$p = 75{,}8\%\ \text{Cl-35} \Rightarrow A_r = 35{,}452$$



komposisi alami klorin di Bumi

Ar	% Cl-37
35,452	24,2 %

Seret titik hijau. Semakin banyak Cl-35, semakin dekat Ar ke 35. Ar hanya sama dengan rata-rata biasa (35,97) kalau kedua isotop sama banyak.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

A_r bukan nomor massa isotop yang paling umum. A_r adalah rata-rata berbobot sehingga biasanya tidak bulat: klorin 35,45, tembaga 63,55, magnesium 24,31. Nomor massa (A) selalu bilangan bulat karena menghitung partikel, sedangkan A_r adalah massa rata-rata. Jangan menulis $A = 35{,}5$!

KERJAKAN BERSAMA

Ar tembaga untuk kabel listrik

Tembaga di alam terdiri atas Cu-63 (massa isotop 62,93; kelimpahan 69,15%) dan Cu-65 (massa isotop 64,93; kelimpahan 30,85%). Hitung A_r tembaga.

1. Kalikan setiap massa dengan kelimpahannya: $62{,}93 \times 69{,}15 = 4351{,}6$ dan $64{,}93 \times 30{,}85 = 2003{,}1$.
2. Jumlahkan lalu bagi 100: $A_r = \dfrac{4351{,}6 + 2003{,}1}{100} = 63{,}55$.
3. Cek kewajaran: hasilnya di antara 62,93 dan 64,93, dan lebih dekat ke Cu-63 yang lebih melimpah ✔

A_r tembaga = 63,55 (di buku sekolah sering dibulatkan 63,5).

COBA SENDIRI

Membalik soal: kelimpahan dari Ar

Boron punya dua isotop: B-10 (massa 10,01) dan B-11 (massa 11,01). A_r boron = 10,81. Berapa persen kelimpahan B-10?

1. Misalkan kelimpahan B-10 = x%, maka B-11 = $(100 - x)$%.
2. Tulis persamaan rata-rata: $\dfrac{10{,}01x + 11{,}01(100 - x)}{100} = 10{,}81$.
3. Sederhanakan: $10{,}01x + 1101 - 11{,}01x = 1081 \rightarrow -1{,}00x = -20 \rightarrow x = 20$.
4. Cek: $(10{,}01 \times 20 + 11{,}01 \times 80)/100 = 10{,}81$ ✔

Kelimpahan B-10 = 20% dan B-11 = 80%. Trik cepat: Ar 10,81 berjarak 0,20 dari 11,01 dan 0,80 dari 10,01, jadi perbandingannya terbalik, 20 : 80.

TAMU DARI MASA LALU · BERGANTI ANAK TIMBANGAN

John Dalton (1803) memakai hidrogen sebagai patokan, A_r H = 1. Kemudian para kimiawan beralih ke oksigen = 16 karena oksigen bersenyawa dengan hampir semua unsur. Masalahnya, para fisikawan memakai "oksigen-16 = 16", sedangkan kimiawan memakai campuran isotop oksigen alami = 16. Dua tabel yang sedikit berbeda membuat kacau! Pada 1960–1961, fisikawan (IUPAP) dan kimiawan (IUPAC) sepakat memakai satu patokan bersama: **karbon-12 = tepat 12**. Patokan itu masih kita pakai sampai sekarang.

MENGAPA AR BEBERAPA UNSUR DITULIS SEBAGAI RENTANG?

Kelimpahan isotop sedikit berbeda menurut asal sampel. Karbon dari tumbuhan sedikit lebih "ringan" daripada karbon dari batu kapur, karena fotosintesis lebih suka $^{12}CO_2$. Karena itu IUPAC kini menuliskan A_r hidrogen, karbon, oksigen, dan beberapa unsur lain sebagai rentang, misalnya karbon [12,0096; 12,0116]. Untuk perhitungan sekolah, nilai 12,011 sudah sangat memadai.

MITOS

"Ar klorin 35,5 berarti ada atom klorin yang bermassa 35,5."

FAKTA

Tidak ada satu pun atom klorin bermassa 35,5. Yang ada hanya atom bermassa ±35 dan ±37. Angka 35,5 adalah rata-rata, seperti "rata-rata keluarga punya 2,5 anak".

MITOS

"Elektron jauh lebih kecil, jadi muatannya juga lebih kecil daripada proton."

FAKTA

Muatan elektron dan proton sama besar ($1{,}602 \times 10^{-19}$ C), hanya tandanya berlawanan. Yang jauh berbeda adalah massanya: proton ±1836 kali lebih berat.

MITOS

"Isotop radioaktif selalu buatan manusia dan pasti berbahaya."

FAKTA

Isotop radioaktif alami ada di sekitar kita: kalium-40 di pisang dan tubuhmu, karbon-14 di semua makhluk hidup. Jumlahnya sangat kecil dan aman. Bahaya bergantung pada dosis.

MITOS

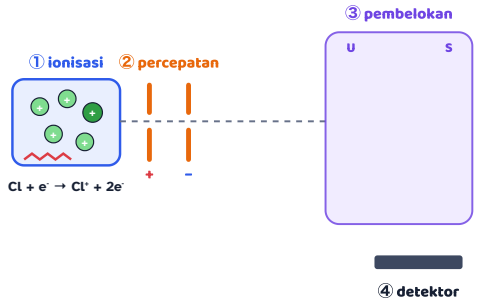
"Karbon-14 bisa menentukan umur fosil Sangiran."

FAKTA

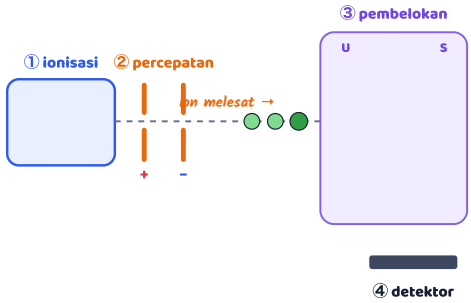
Fosil Sangiran berumur ratusan ribu sampai lebih dari sejuta tahun. Karbon-14 sudah habis setelah ±50.000 tahun. Umurnya ditentukan dengan isotop lain, misalnya kalium-40 → argon-40 di lapisan abu gunung api.

6.5 Spektrometer massa: timbangan atom

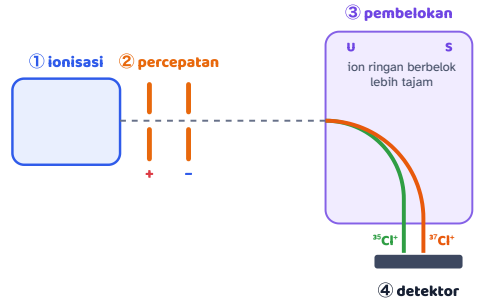
Dari mana kita tahu klorin berisi 75,8% Cl-35? Jawabannya dari alat bernama **spektrometer massa**. Alat ini memisahkan partikel bermuatan menurut perbandingan massa terhadap muatannya, m/z, lalu menghitung berapa banyak partikel untuk setiap m/z. Prinsipnya mirip melempar bola pingpong dan bola tenis yang sama cepat ke arah angin samping: bola ringan lebih mudah dibelokkan.



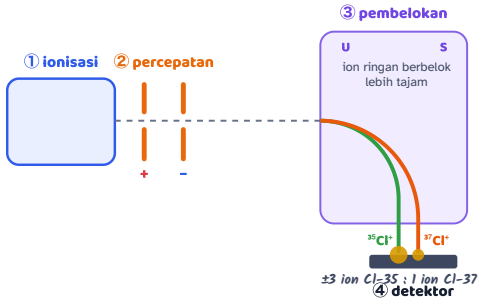
Langkah 1. Ionisasi. Sampel diuapkan, lalu ditembaki elektron dari filamen panas. Elektron penembak menendang satu elektron dari setiap atom, sehingga terbentuk ion positif: $\mathrm{Cl(g)} + \mathrm{e^-} \qquad \mathrm{Cl^+(g)} + 2\,\mathrm{e^-}$.



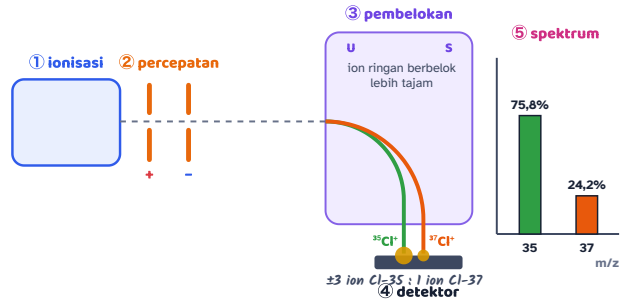
Langkah 2. Percepatan. Ion positif ditarik oleh pelat bermuatan negatif dan melesat menjadi berkas ion yang sangat cepat.



Langkah 3. Pembelokan. Medan magnet membelokkan berkas ion. Ion yang lebih ringan (atau bermuatan lebih besar) berbelok **lebih tajam**. Berkas $^{35}\mathrm{Cl}^+$ dan $^{37}\mathrm{Cl}^+$ pun terpisah.



Langkah 4. Deteksi. Setiap ion yang menabrak detektor menghasilkan arus listrik kecil. Semakin banyak ion, semakin besar arusnya. Ion Cl-35 kira-kira tiga kali lebih banyak.



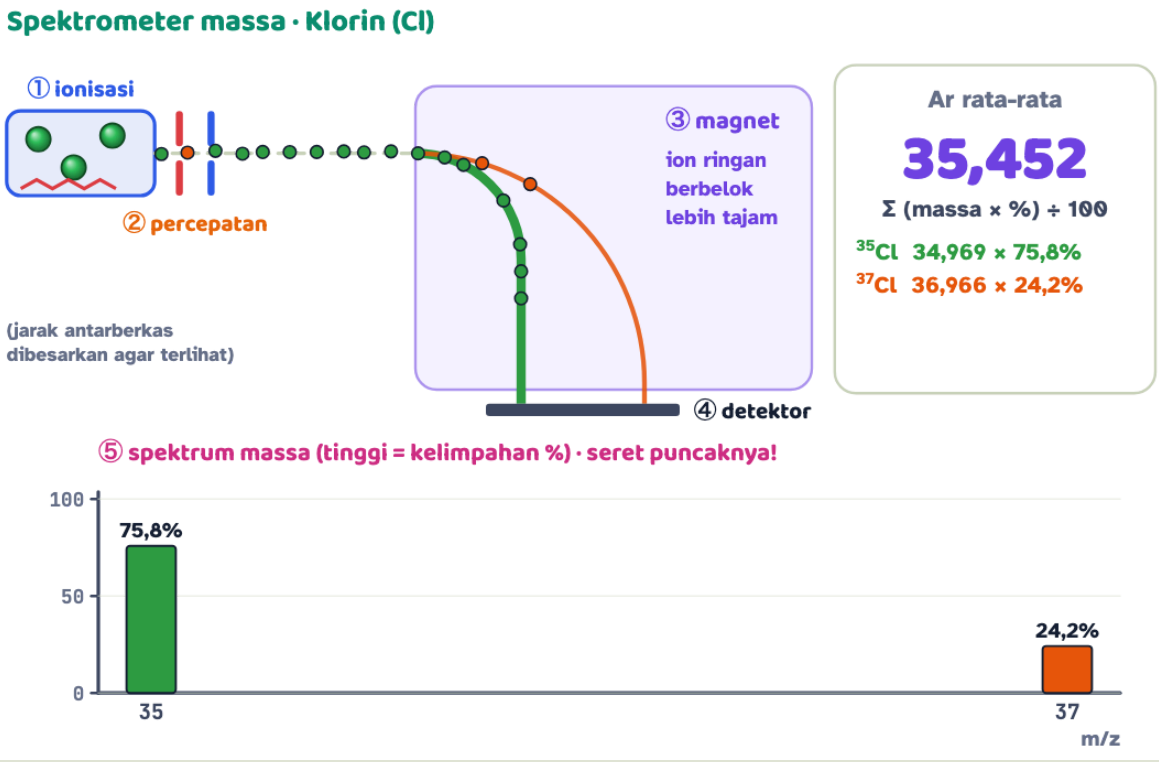
Langkah 5. Spektrum massa. Komputer menggambar tinggi sinyal terhadap m/z. Tinggi puncak sebanding dengan kelimpahan isotop. Dari spektrum ini kita langsung menghitung A_r.

Dengan Lab Mini berikut, kamu menjadi operator spektrometer massa. Pilih unsur, amati berkas ionnya berbelok, lalu "curangi" kelimpahannya untuk melihat A_r berubah.

LAB MINI

Spektrometer Massa: timbang isotop satu per satu

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-6



Ar (rata-rata berbobot)	Ar dengan nomor massa	Ar di tabel periodik	Isotop terbanyak
35,452	35,48	35,45	Cl-35 (75,8%)

Keadaan: **kelimpahan alami**

Pilih unsur dan amati: berapa berkas ion yang muncul? Lalu **seret puncak** pada spektrum (atau geser slider kelimpahan) dan perhatikan A_r di kotak kanan. Nyalakan "ion molekul X_2^+" untuk klorin dan brom: mengapa muncul tiga puncak? Nyalakan "unsur misteri", minta temanmu memilih unsur, lalu tebak unsurnya dari spektrum!

Membaca spektrum massa itu seperti membaca grafik nilai ulangan: posisi puncak memberi tahu **massa** isotop, tinggi puncak memberi tahu **banyaknya**.

KERJAKAN BERSAMA

Ar dari spektrum magnesium

Spektrum massa magnesium menunjukkan puncak pada m/z 24, 25, dan 26 dengan tinggi relatif 79,0 : 10,0 : 11,0. Hitung A_r magnesium (anggap massa isotop = nomor massa).

1. Jumlah tinggi puncak: $79{,}0 + 10{,}0 + 11{,}0 = 100{,}0$, jadi tinggi relatif sudah sama dengan persen kelimpahan.
2. $$A_r = \frac{24 \times 79{,}0 + 25 \times 10{,}0 + 26 \times 11{,}0}{100} = \frac{1896 + 250 + 286}{100} = 24{,}32.$$

A_r magnesium ≈ 24,3. Kalau jumlah tinggi puncak tidak 100, bagi dengan jumlah tinggi seluruh puncak, bukan dengan 100.

COBA SENDIRI

Tiga puncak molekul klorin

Gas klorin terdiri atas molekul $\mathrm{Cl_2}$. Spektrum massanya memiliki puncak ion molekul $\mathrm{Cl_2}^+$ pada m/z 70, 72, dan 74. Jelaskan asalnya dan hitung perbandingan tingginya. (Cl-35 = 75%, Cl-37 = 25%)

1. Ada tiga kombinasi: $^{35}\mathrm{Cl}-{}^{35}\mathrm{Cl}$ (m/z 70), $^{35}\mathrm{Cl}-{}^{37}\mathrm{Cl}$ (72), dan $^{37}\mathrm{Cl}-{}^{37}\mathrm{Cl}$ (74).
2. Peluang setiap atom: $\frac{3}{4}$ untuk Cl-35 dan $\frac{1}{4}$ untuk Cl-37.
3. 70: $\frac{3}{4} \times \frac{3}{4} = \frac{9}{16}$. 72: $2 \times \frac{3}{4} \times \frac{1}{4} = \frac{6}{16}$ (dikali 2 karena 35–37 dan 37–35 sama-sama mungkin). 74: $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{16}$.

Perbandingan tinggi puncak 70 : 72 : 74 = 9 : 6 : 1. Pola ini menjadi "sidik jari" senyawa yang mengandung dua atom klorin. Untuk $\mathrm{Br_2}$ (Br-79 ≈ Br-81 ≈ 50%) polanya 158 : 160 : 162 = 1 : 2 : 1.

ID

KIMIA NUSANTARA · ISOTOP DI LADANG DAN DI DALAM TANAH

Peneliti BRIN (dahulu BATAN) memakai isotop untuk pertanian dan air. Benih padi, kedelai, dan sorgum disinari sinar gamma dari isotop **kobalt-60** untuk memicu mutasi, lalu dipilih yang paling unggul. Dari cara ini lahir berbagai varietas unggul yang ditanam petani Indonesia. Pupuk yang "ditandai" isotop nitrogen-15 dipakai untuk mengukur berapa banyak pupuk yang benar-benar diserap tanaman. Di bidang hidrologi, perbandingan isotop alami **deuterium dan oksigen-18** dalam air, yang diukur dengan spektrometer massa, menunjukkan dari mana air tanah berasal. Tritium dan karbon-14 menunjukkan berapa lama air itu sudah tersimpan di dalam tanah.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PUNCAK M+1: MENGHITUNG ATOM KARBON DARI SPEKTRUM

Sekitar 1,1% atom karbon adalah karbon-13. Akibatnya, molekul organik selalu menunjukkan puncak kecil satu satuan di kanan ion molekul (M), disebut puncak $M+1$. Semakin banyak atom karbon, semakin besar peluang molekul memuat satu atom karbon-13:

$$n_{\mathrm{C}} \approx \frac{\text{tinggi puncak } (M+1)}{\text{tinggi puncak } M} \times \frac{100}{1{,}1}$$

Contoh: benzena, $\mathrm{C_6H_6}$, punya puncak M pada m/z 78 dan puncak $M+1$ pada 79 yang tingginya ±6,6% dari M. Maka $n_{\mathrm{C}} \approx 6{,}6/1{,}1 = 6$ ✔

Spektrometer modern (dipakai di silabus IB) sering berjenis **waktu terbang** (*time-of-flight*, TOF): semua ion diberi energi kinetik yang sama, lalu "berlomba" sepanjang tabung. Ion ringan lebih cepat dan tiba lebih dulu di detektor, dengan waktu tempuh $t \propto \sqrt{m/z}$. Di Bab 39 kamu akan memakai spektrum massa untuk menebak struktur molekul dari pecahan-pecahannya.

6.6 Lanjut: defek massa dan energi ikat inti

Ada satu keanehan kecil. Massa isotop klorin-35 adalah 34,969, bukan 35. Padahal ia tersusun atas 17 proton, 18 neutron, dan 17 elektron yang masing-masing bermassa sedikit *lebih* dari 1 u (kecuali elektron). Ke mana perginya massa itu?

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MASSA YANG BERUBAH MENJADI "LEM" INTI

Hitung massa penyusun atom helium-4 (2 proton, 2 neutron, 2 elektron). Massa 2 atom hidrogen-1 (proton + elektron) adalah $2 \times 1{,}00783$ u, dan massa 2 neutron $2 \times 1{,}00867$ u:

$$m_{\text{penyusun}} = 2(1{,}00783) + 2(1{,}00867) = 4{,}03300 \text{ u} \qquad m_{^4\mathrm{He}} = 4{,}00260 \text{ u}$$

Selisihnya, $\Delta m = 0{,}03040$ u, disebut **defek massa**. Massa itu tidak lenyap: ia berubah menjadi energi saat inti terbentuk, sesuai rumus Einstein $E = \Delta m\, c^2$. Energi ini, yaitu **energi ikat inti**, harus diberikan kembali bila kita ingin membongkar inti menjadi nukleon-nukleon terpisah. Setiap 1 u setara dengan 931,5 MeV:

$$E_{\text{ikat}} = 0{,}03040 \times 931{,}5 = 28{,}3 \text{ MeV} \quad \Rightarrow \quad \frac{E_{\text{ikat}}}{A} = \frac{28{,}3}{4} = 7{,}08 \text{ MeV per nukleon}$$

Sebagai pembanding, memutus satu ikatan kimia hanya butuh beberapa elektronvolt (eV). Energi inti jutaan kali lebih besar! Inilah sebabnya satu gram bahan bakar nuklir menghasilkan energi setara berton-ton batu bara.

RUMUS HIDUP

Energi ikat per nukleon dari defek massa

$$\frac{E_{\text{ikat}}}{A} = \frac{\Delta m \times 931{,}5\ \text{MeV}}{A}$$

Setiap 1 u massa yang 'hilang' saat inti terbentuk berubah menjadi 931,5 MeV energi pengikat. Bagi dengan jumlah nukleon untuk melihat seberapa kokoh inti itu.

- Δm Defek massa u
- A Jumlah nukleon
- E/A Energi ikat per nukleon MeV

ENERGI IKAT PER NUKLEON

7,08

MeV

≈ helium-4 (partikel alfa)

Energi ikat total = **28,318** MeV, yaitu **4,536 × 10⁻¹²** joule untuk satu inti saja.

Cek satuan: u × (MeV/u) ÷ nukleon = MeV per nukleon

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENERGI-IKAT-NUKLEON

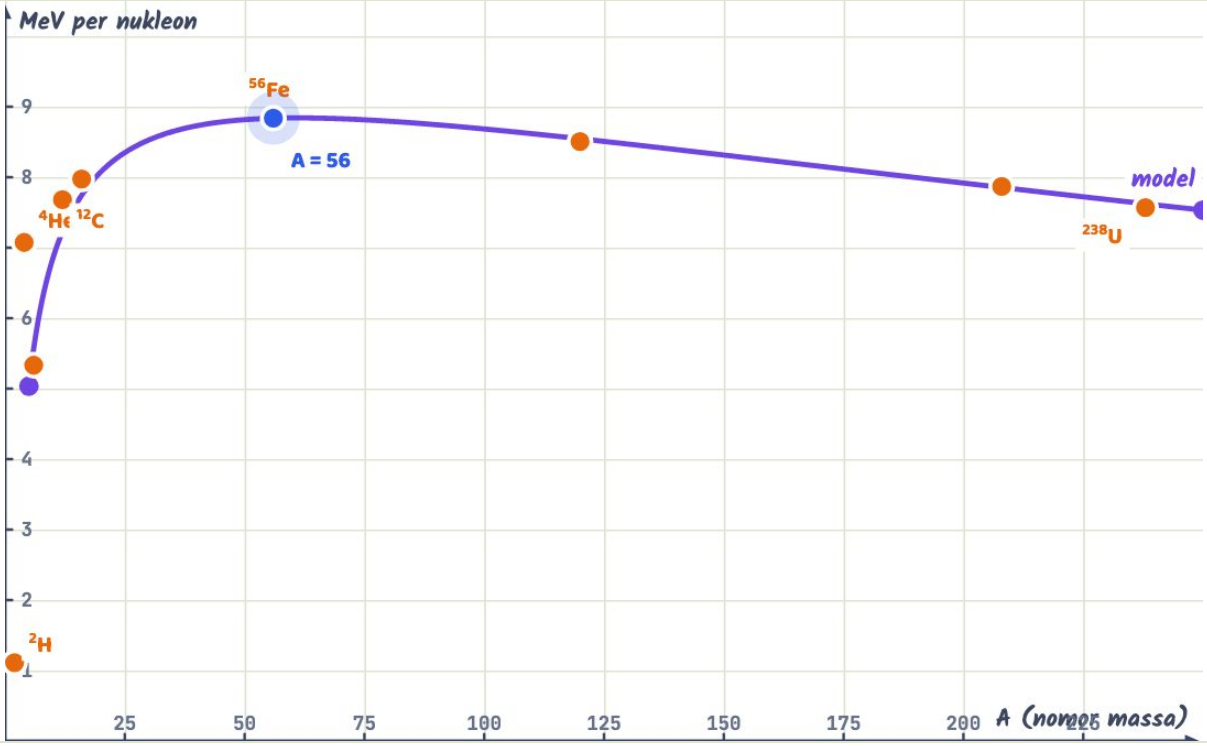
GRAFIK HIDUP

Kurva energi ikat: puncaknya di sekitar besi

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-6

$\frac{E_{\text{ikat}}}{A}$ (MeV per nukleon) terhadap A

Garis ungu adalah model tetes cairan; titik oranye adalah data inti nyata.



puncak kurva: besi dan nikel, inti paling kokoh

E/A menurut model
8,84 MeV

Seret titik biru sepanjang kurva. Inti di puncak kurva paling sulit dibongkar. Ke arah mana inti ringan dan inti berat "ingin" bergerak supaya makin kokoh?

Kurva ini menjelaskan dua sumber energi terbesar di alam semesta. Inti ringan seperti hidrogen **bergabung** (fusi) menjadi helium di Matahari, sedangkan inti berat seperti uranium-235 **membelah** (fisi) di reaktor nuklir. Keduanya bergerak menuju puncak kurva di sekitar besi dan melepaskan energi. Ceritanya berlanjut di Bab 37.

Kimia di sekitarmu

Kalender fosil

Umur fosil Sangiran ditentukan dari isotop kalium-40 dan argon-40 di abu gunung api, sedangkan arang dan tulang yang lebih muda dari ±50.000 tahun memakai karbon-14.

Padi varietas unggul

Sinar gamma dari kobalt-60 memicu mutasi pada benih. Peneliti BRIN memilih tanaman yang lebih genjah, tahan hama, atau tahan rebah.

Asal-usul air tanah

Perbandingan deuterium dan oksigen-18 dalam air sumur dan mata air menunjukkan dari mana air itu berasal, penting untuk mengelola air tanah kota.

Kedokteran nuklir

Teknesium-99m (waktu paruh 6 jam) dipakai untuk memotret organ tubuh, dan iodin-131 untuk mengobati kelenjar tiroid. Sebagian radioisotop ini diproduksi di reaktor riset Serpong.

Pisang yang sedikit radioaktif

Sekitar 0,012% atom kalium adalah kalium-40 yang radioaktif. Pisang, kentang, dan tubuhmu sendiri mengandungnya dalam jumlah kecil yang aman.

Timah Bangka, juara isotop

Timah (Sn) punya 10 isotop stabil, terbanyak di antara semua unsur. Spektrum massanya seperti deretan pagar, dan Ar-nya 118,71.

Cek Cepat

Atom $^{40}_{20}\mathrm{Ca}$ melepas 2 elektron menjadi ion Ca^{2+}. Berapa jumlah proton ion itu?

- 18
- 20
- 22
- 40

Manakah pasangan isobar?

- $^{12}\mathrm{C}$ dan $^{13}\mathrm{C}$
- $^{13}_{6}\mathrm{C}$ dan $^{14}_{7}\mathrm{N}$
- $^{14}_{6}\mathrm{C}$ dan $^{14}_{7}\mathrm{N}$
- $^{16}\mathrm{O}$ dan $^{16}\mathrm{O}^{2-}$

Galium hanya punya isotop Ga-69 dan Ga-71, dengan A_r = 69,7. Isotop mana yang lebih melimpah?

- Ga-69
- Ga-71
- Sama banyak
- Tidak bisa ditentukan

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: unsur "Kacangium"

Bahan: kacang merah dan kacang hijau (atau kedelai), timbangan dapur digital, 3 mangkuk kecil, kertas dan pensil.

1. Hitung 40 butir kacang merah dan timbang. Bagi dengan 40 untuk mendapat massa rata-rata satu butir. Lakukan hal yang sama untuk 40 butir kacang hijau.
2. Anggap keduanya dua "isotop" dari unsur khayalan Kacangium. Campurkan 30 butir kacang merah dan 10 butir kacang hijau, sehingga kelimpahannya 75% : 25%, mirip klorin.
3. Hitung "Ar" Kacangium dengan rumus rata-rata berbobot: (massa merah × 75 + massa hijau × 25) ÷ 100.
4. Cek: timbang seluruh campuran lalu bagi dengan 40. Apakah hasilnya sama dengan langkah 3?
5. Ubah komposisi menjadi 20 : 20, lalu 10 : 30. Catat bagaimana "Ar" bergeser.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Jangan memakan kacang yang sudah dipegang-pegang selama percobaan. Jauhkan butiran kacang dari adik balita karena bisa tertelan dan menyumbat napas. Bila ada anggota keluarga yang alergi kacang, ganti dengan kancing baju dua ukuran. Cuci tangan setelah selesai, dan cuci kacang yang bersih sebelum dimasak.

Pertanyaan: Mengapa "Ar" Kacangium lebih dekat ke massa kacang merah pada komposisi 30 : 10? Apa persamaan dan perbedaan model ini dengan isotop sungguhan?

RINGKASAN KILAT

Bab 6 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menyebutkan **muatan, massa relatif, dan letak** proton, neutron, dan elektron
- menentukan jumlah proton, neutron, dan elektron dari **notasi nuklida** ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, untuk atom maupun **ion**
- membedakan **isotop, isobar, dan isoton**, serta isotop stabil dan radioaktif
- menghitung **massa atom relatif (Ar)** sebagai rata-rata berbobot dari kelimpahan isotop, dan sebaliknya
- membaca **spektrum massa** (klorin, brom, magnesium) dan menjelaskan cara kerja spektrometer massa

Istilah kunci

partikel subatom · inti atom · Nomor atom · Nomor massa · nukleon · nuklida · ion · Kation · Anion · isoelektronik · Isotop · Isobar · Isoton · stabil · isotop radioaktif · waktu paruh

Rumus penting

$$n = A - Z \qquad e = Z - q$$

Proton, neutron, elektron dari notasi. Nomor atom memberi jumlah proton. Nomor massa dikurangi nomor atom memberi jumlah neutron. Elektron sama dengan proton dikurangi muatan ion.

$$A_r = \frac{m_{\text{atom}}}{1{,}6605 \times 10^{-24}\ \text{g}}$$

Ar dari massa satu atom. Ar menjawab pertanyaan: satu atom unsur ini berapa kali lebih berat daripada seperdua belas atom karbon-12?

$$A_r = \frac{m_1\, p_1 + m_2\, (100 - p_1)}{100}$$

Ar rata-rata dua isotop. Massa atom relatif adalah rata-rata berbobot: setiap massa isotop dikali persen kelimpahannya, dijumlahkan, lalu dibagi 100.

$$\frac{E_{\text{ikat}}}{A} = \frac{\Delta m \times 931{,}5\ \text{MeV}}{A}$$

Energi ikat per nukleon dari defek massa. Setiap 1 u massa yang 'hilang' saat inti terbentuk berubah menjadi 931,5 MeV energi pengikat. Bagi dengan jumlah nukleon untuk melihat seberapa kokoh inti itu.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Ion terbentuk dengan menambah atau mengurangi elektron, bukan proton.
- Karbon-14 tidak bisa menanggali semua benda tua.
- A_r bukan nomor massa isotop yang paling umum.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=6

🧩 Teka-teki untuk Bab 7

Natrium hanya punya 1 elektron di kulit terluarnya dan sangat "royal" memberikannya: ia mudah menjadi Na^+. Padahal natrium punya 11 elektron. Bagaimana kita tahu elektron mana yang paling luar, dan di "lantai" mana ia tinggal?

▼ **Intip petunjuk**

Coba cabut elektron natrium satu per satu. Elektron pertama lepas dengan mudah (±5,1 eV), tetapi elektron kedua butuh energi hampir 10 kali lipat (±47 eV)! Lonjakan itu menandakan elektron kedua berada di kulit yang lebih dalam. Di Bab 7 kamu akan menginap di "Hotel Elektron" dan menyusun konfigurasi 2, 8, 1 untuk natrium.

07 Hotel Elektron: Di Mana Elektron Menginap?

Natrium punya 11 elektron, tetapi hanya satu yang rela dilepas. Mengapa yang satu itu istimewa? Jawabannya ada di sebuah "hotel" mungil di sekeliling inti, lengkap dengan lantai, sayap, kamar, dan aturan check-in yang sangat ketat.

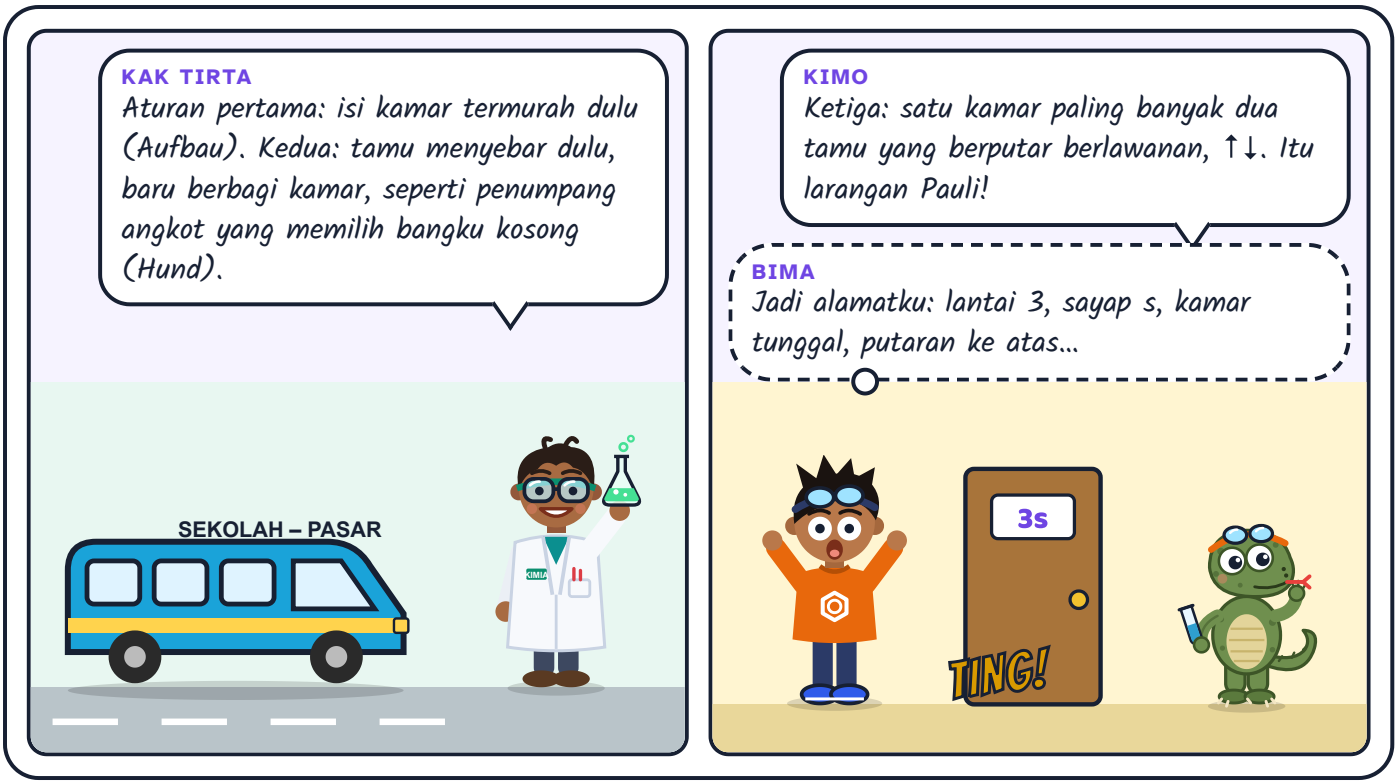
Setelah bab ini, kamu bisa

- menuliskan **konfigurasi elektron per kulit** (K, L, M, N) dan memakai kapasitas kulit $2n^2$;
- menjelaskan **subkulit s, p, d, f** serta bentuk **orbital** sebagai awan peluang, bukan lintasan;
- menyusun konfigurasi elektron dan **diagram orbital** dengan aturan **Aufbau**, larangan **Pauli**, dan aturan **Hund**, termasuk pengecualian kromium dan tembaga;
- menentukan **empat bilangan kuantum** (n, l, m_l, m_s) sebuah elektron;
- menghubungkan **elektron valensi** dengan golongan, periode, dan blok, menulis **konfigurasi ion**, serta membaca **energi ionisasi berturutan** sebagai bukti adanya kulit.

HOTEL ELEKTRON

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kalium (Z = 19) punya 19 elektron. Kulit M (kulit ketiga) sanggup menampung 18 elektron. Di mana elektron ke-19 menginap?

- Di kulit M, karena kulit M baru terisi 8 dan masih punya banyak tempat.
- Di kulit L, karena elektron selalu ingin dekat dengan inti.
- Di kulit N (kulit keempat), sehingga susunannya 2, 8, 8, 1.
- Tidak punya tempat, sehingga atom kalium tidak stabil.

Jawabannya: di kulit N. Aneh, ya? Kulit M memang masih "punya kamar", tetapi kamar sisanya (subkulit 3d) lebih mahal energinya daripada kamar 4s di lantai berikutnya. Elektron selalu memilih kamar termurah. Bab ini membongkar daftar harga kamar itu.

7.1 Lantai-lantai hotel: kulit K, L, M, N

Di Bab 5 kita berkenalan dengan model atom Bohr: elektron bergerak di sekitar inti pada tingkat-tingkat energi tertentu. Sekarang mari kita lihat atom sebagai sebuah hotel. Inti yang bermuatan positif adalah lobinya. Elektron yang bermuatan negatif tertarik ke lobi, tetapi tidak bisa semuanya berdesakan di sana. Mereka menginap di **kulit elektron**, yaitu "lantai-lantai" energi di sekeliling inti.

Bahasa sederhana · Bayangkan gedung bertingkat dengan lobi di tengah. Lantai 1 paling dekat lobi tetapi kamarnya hanya sedikit, cukup untuk 2 tamu. Lantai 2 lebih luas, muat 8 tamu. Lantai 3 muat 18, lantai 4 muat 32. Tamu selalu mengisi lantai bawah dulu karena paling dekat dengan lobi dan "paling murah" energinya. Tamu di lantai teratas paling jauh dari lobi, jadi paling mudah pergi. Merekalah yang ikut bereaksi!

Kulit pertama diberi huruf **K**, lalu **L**, **M**, **N**, dan seterusnya. Nomor kulit disebut n. Semakin besar n, semakin jauh elektron dari inti, semakin tinggi energinya, dan semakin lemah tarikan inti padanya.

DEFINISI · KULIT ELEKTRON

Kulit elektron adalah tingkat energi utama tempat elektron berada, bernomor $n = 1, 2, 3, \ldots$ (kulit K, L, M, N, ...). Kulit ke-n dapat menampung paling banyak $2n^2$ elektron.

Kulit	n	Kapasitas $2n^2$	Analogi hotel
K	1	$2(1)^2 = 2$	lantai 1: kamar sedikit, paling dekat lobi
L	2	$2(2)^2 = 8$	lantai 2
M	3	$2(3)^2 = 18$	lantai 3
N	4	$2(4)^2 = 32$	lantai 4: luas, jauh dari lobi

RUMUS HIDUP

Kapasitas kulit elektron

$$N_{\text{maks}} = 2\,n^2$$

Kulit ke-n menampung paling banyak dua kali kuadrat nomor kulitnya.

n Nomor kulit

N_{maks} Elektron maksimum `elektron`

ELEKTRON MAKSIMUM

18

elektron

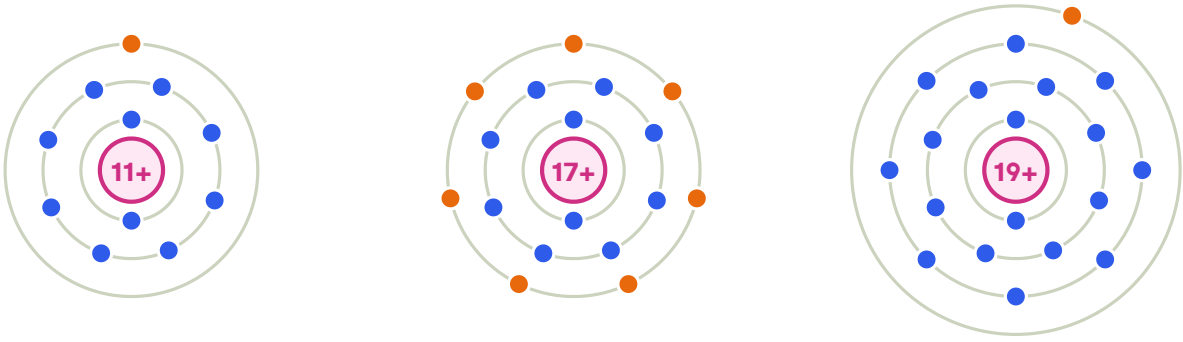
kulit M: 18 kursi, tetapi pada kalium dan kalsium baru terisi 8

Kulit **M** (n = **3**) punya **3** subkulit dan **9** orbital, sehingga menampung paling banyak **18** elektron.

Cek satuan: tanpa satuan: jumlah elektron

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KAPASITAS-KULIT

Untuk **20 unsur pertama** (hidrogen sampai kalsium) ada cara cepat yang diajarkan di SMP: isi kulit K sampai 2, kulit L sampai 8, lalu kulit M sampai 8, dan sisanya ke kulit N. Kulit terluar tidak pernah berisi lebih dari 8 elektron. Coba ketuk chip unsur ini untuk melihat model atomnya: Na Cl K Ca.



Natrium · 2, 8, 1 **Klorin · 2, 8, 7** **Kalium · 2, 8, 8, 1**

Model kulit (model Bohr) natrium, klorin, dan kalium. Elektron oranye adalah elektron kulit terluar, yaitu **elektron valensi**. Natrium dan kalium sama-sama punya 1 elektron valensi, sehingga sifat kimianya mirip.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Kalium bukan 2, 8, 9! Walaupun kulit M sanggup menampung 18 elektron, elektron ke-19 justru masuk ke kulit N. Begitu pula kalsium: 2, 8, 8, 2. Baru mulai unsur ke-21 (skandium), kulit M kembali diisi sampai 18. Alasannya baru terlihat jelas setelah kita mengenal subkulit di 7.2 dan 7.3.

CONTOH **Konfigurasi kulit tiga unsur**

Tuliskan susunan elektron per kulit untuk magnesium (Z = 12), belerang (Z = 16), dan kalsium (Z = 20). Berapa elektron valensi masing-masing?

1. Magnesium, 12 elektron: K diisi 2, L diisi 8, sisa 2 ke M → **2, 8, 2**.
2. Belerang, 16 elektron: K 2, L 8, sisa 6 ke M → **2, 8, 6**.
3. Kalsium, 20 elektron: K 2, L 8, M 8, sisa 2 ke N → **2, 8, 8, 2**.

Elektron valensi: Mg = 2, S = 6, Ca = 2. Magnesium dan kalsium sama-sama punya 2 elektron valensi, jadi keduanya "sekeluarga" (golongan 2) dan sama-sama membentuk ion bermuatan 2+.

ADU CEPAT **Elektron di kulit terluar (Z = 1–20)**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-7

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Isi kulit berurutan: 2, lalu 8, lalu 8, lalu sisanya. Contoh Z = 13: 2, 8, 3 → jawabannya 3.

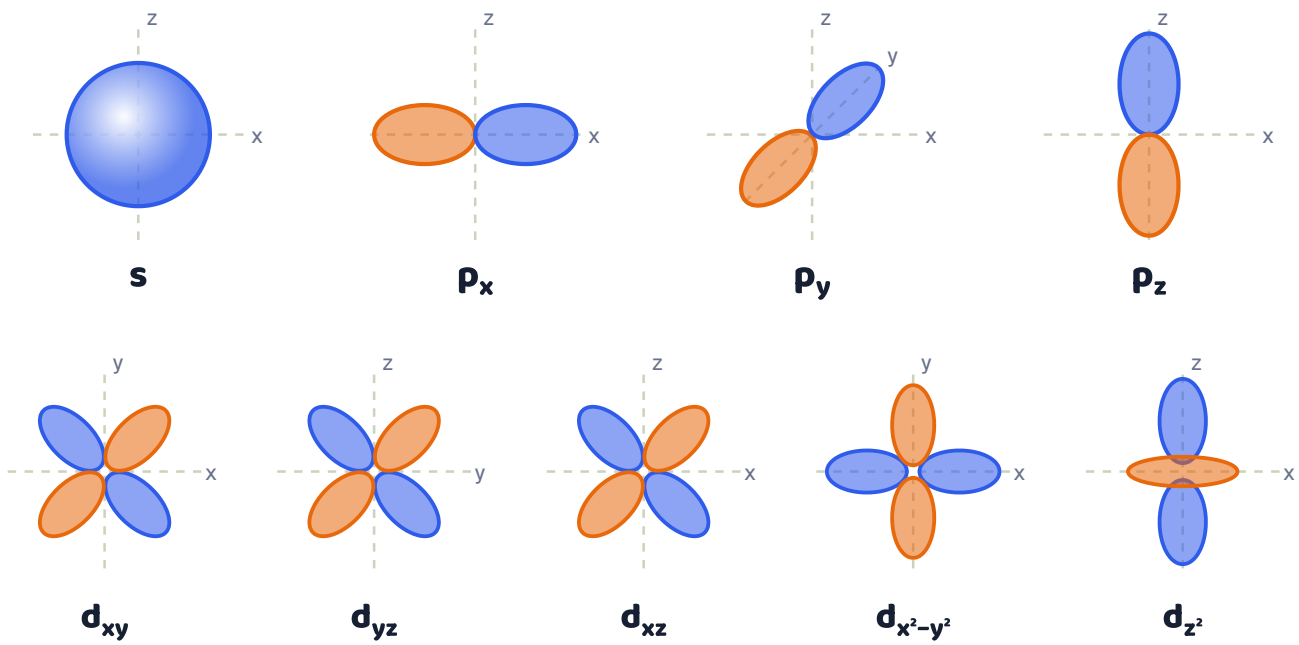
7.2 Sayap dan kamar: subkulit s, p, d, f dan bentuk orbital

Model kulit menjelaskan banyak hal, tetapi tidak bisa menjawab teka-teki kalium tadi. Para ilmuwan menemukan bahwa setiap lantai hotel ternyata terbagi lagi menjadi beberapa **sayap** yang harganya berbeda. Sayap itu disebut **subkulit**, diberi huruf **s**, **p**, **d**, dan **f**. Setiap sayap berisi beberapa **kamar** yang disebut **orbital**.

- Kulit ke-n punya n subkulit: kulit K hanya punya 1s; kulit L punya 2s dan 2p; kulit M punya 3s, 3p, dan 3d; kulit N punya 4s, 4p, 4d, dan 4f.
- Subkulit s punya 1 orbital, p punya 3, d punya 5, dan f punya 7.
- Setiap orbital menampung **paling banyak 2 elektron**.

DEFINISI · ORBITAL

Orbital adalah daerah di sekitar inti tempat peluang menemukan elektron paling besar. Gambarnya biasanya berupa batas yang memuat ±90% peluang keberadaan elektron. Satu orbital menampung paling banyak dua elektron. Orbital **bukan** lintasan: kita tidak bisa tahu jalur pasti sebuah elektron, hanya peluangnya berada di suatu tempat.



Bentuk orbital s, p, dan d (gambar batas ±90% peluang). Warna biru dan oranye menandai **fase** (tanda + dan –) gelombang elektron, bukan muatan. Orbital f (7 buah) bentuknya lebih rumit lagi. Lihat awannya berputar di Lab Mini **Awan Orbital** pada 7.4.

Subkulit	Nilai l	Jumlah orbital $(2l+1)$	Elektron maks $2(2l+1)$	Bentuk orbital	Asal huruf
s	0	1	2	bola	*sharp*
p	1	3	6	halter (dua cuping)	*principal*
d	2	5	10	daun semanggi (4 cuping), satu halter bercincin	*diffuse*
f	3	7	14	rumit, banyak cuping	*fundamental*

RUMUS HIDUP

Orbital dan elektron dalam satu subkulit

$$e_{\text{maks}} = 2\,(2l + 1)$$

Subkulit dengan bilangan kuantum azimut l punya 2l + 1 orbital; setiap orbital memuat dua elektron.

- l — Bilangan kuantum azimut
- e_{maks} — Elektron maksimum subkulit `elektron`

ELEKTRON MAKSIMUM SUBKULIT

6

elektron

Subkulit **p** punya **3** orbital (kamar), dengan nilai m_l dari **-1** sampai **1**. Daya tampungnya **6** elektron, sehingga blok **p** di tabel periodik selebar **6** kolom.

Cek satuan: orbital × 2 elektron/orbital = elektron ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ORBITAL-SUBKULIT

Sekarang angka $2n^2$ dari 7.1 jadi masuk akal. Kulit M ($n = 3$) punya subkulit 3s, 3p, dan 3d, berarti $1 + 3 + 5 = 9 = 3^2$ orbital. Setiap orbital memuat 2 elektron, jadi kulit M memuat $2 \times 9 = 18$ elektron.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Huruf s, p, d, dan f bukan singkatan acak. Pada akhir abad ke-19, para ahli spektroskopi mengelompokkan garis-garis spektrum logam alkali menjadi deret *sharp* (tajam), *principal* (utama), *diffuse* (kabur), dan *fundamental*. Belakangan diketahui setiap deret berasal dari elektron yang melompat dari atau ke subkulit tertentu, dan huruf depannya tetap dipakai sampai sekarang. Gambaran orbital sebagai "awan peluang" lahir pada 1926, ketika **Erwin Schrödinger** menulis persamaan gelombang untuk elektron.

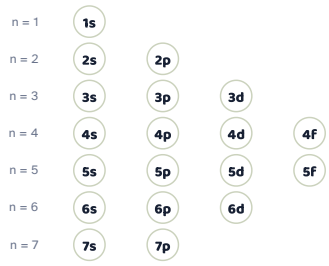
7.3 Aturan check-in: Aufbau, Pauli, dan Hund

Resepsionis Hotel Elektron sangat disiplin. Setiap tamu baru diantar ke kamar menurut tiga aturan. Susunan elektron yang mematuhi ketiganya disebut **konfigurasi elektron keadaan dasar**, yaitu susunan dengan energi serendah mungkin.

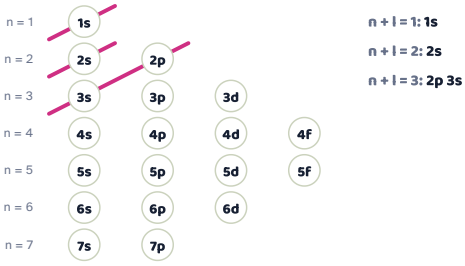
ATURAN · TIGA ATURAN PENGISIAN ELEKTRON

1. **Prinsip Aufbau** (bahasa Jerman: "membangun"): elektron mengisi subkulit dengan energi terendah lebih dahulu. Urutannya: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, **4s, 3d**, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d, 7p.
2. **Larangan Pauli**: tidak ada dua elektron dalam satu atom yang keempat bilangan kuantumnya sama. Akibatnya, satu orbital memuat paling banyak **dua** elektron dengan spin **berlawanan** (↑↓).
3. **Aturan Hund**: pada orbital-orbital yang setara energinya (misalnya tiga orbital 2p), elektron menempati orbital kosong satu per satu dengan spin **searah** dulu, baru kemudian berpasangan.

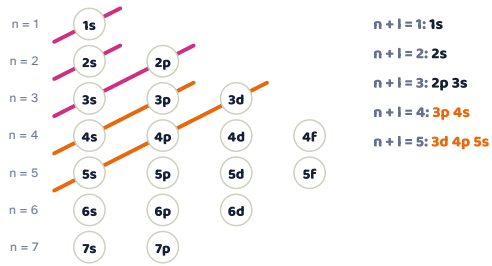
Dari mana urutan Aufbau yang "melompat-lompat" itu? Ada cara mudah: tulis subkulit dalam baris-baris menurut kulitnya, lalu tarik panah diagonal. Ikuti animasinya.



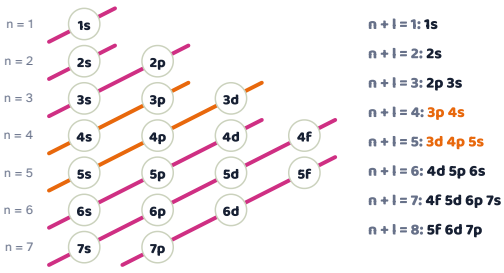
Langkah 1. Setiap baris adalah satu kulit. Kulit ke-n punya n subkulit (sampai f). Kulit yang lebih tinggi dari 4 sebenarnya punya subkulit g dan seterusnya, tetapi tidak pernah terisi pada atom yang dikenal.



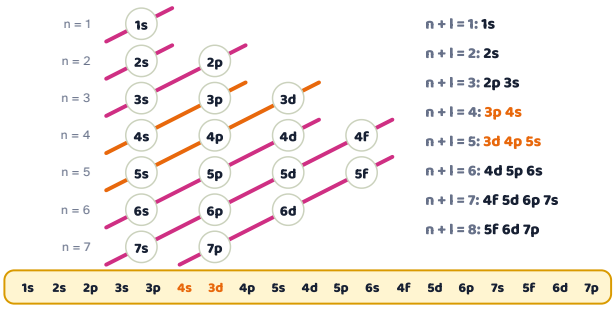
Langkah 2. Panah diagonal pertama melewati 1s, lalu 2s, lalu 2p dan 3s. Subkulit pada satu panah punya nilai $n + l$ yang sama (s: $l = 0$, p: 1, d: 2, f: 3).



Langkah 3. Perhatikan panah oranye: **4s** ($n + l = 4$) diisi **sebelum** 3d ($n + l = 5$). Itulah sebabnya elektron ke-19 kalium masuk ke 4s, bukan ke 3d!



Langkah 4. Panah berikutnya: 4d 5p 6s, lalu 4f 5d 6p 7s, lalu 5f 6d 7p. Pada satu panah, subkulit dengan n lebih kecil diisi lebih dulu.

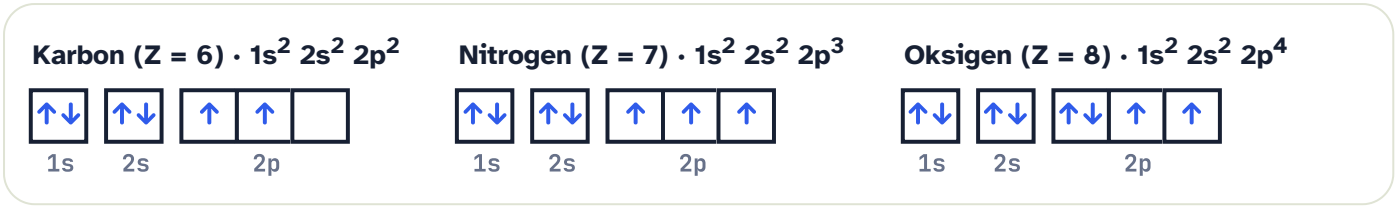


Langkah 5. Hasilnya, urutan Aufbau lengkap. Cukup hafalkan cara menggambar diagonalnya, bukan urutannya!

TRIK KAK TIRTA · ATURAN N + L

"Hitung harga kamarnya dengan $n + l$!" Subkulit dengan $n + l$ lebih kecil diisi dulu. Kalau sama, yang n-nya lebih kecil menang. Contoh: 4s → $4 + 0 = 4$; 3d → $3 + 2 = 5$. Jadi 4s lebih murah. Lalu 3d ($3 + 2 = 5$) melawan 4p ($4 + 1 = 5$): seri, tetapi 3d punya n lebih kecil, jadi 3d dulu. Satu lagi: cara cepat menulis konfigurasi panjang adalah memakai **notasi gas mulia**. Kalium = [Ar] $4s^1$, artinya "susunan argon, lalu tambah $4s^1$".

Konfigurasi elektron ditulis dengan lambang subkulit dan jumlah elektronnya sebagai pangkat. Contoh: natrium (11 elektron) = $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$, atau singkatnya [Ne] $3s^1$. Untuk melihat letak setiap elektron, kita memakai **diagram orbital**: satu kotak = satu orbital, satu panah = satu elektron, arah panah = arah spin.



Lihat nitrogen: tiga elektron 2p tidak berdesakan di satu kamar, tetapi menyebar ke tiga kamar dengan spin searah, seperti penumpang angkot yang memilih bangku kosong dulu. Baru pada oksigen, elektron ke-8 terpaksa berbagi kamar. Elektron yang sendirian di kamarnya disebut **elektron tak berpasangan**.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Diagram $2p^4$ oksigen adalah [↑↓][↑][↑], **bukan** [↑↓][↑↓][ ]. Menurut aturan Hund, kamar kosong harus diisi dulu sebelum elektron berpasangan. Kesalahan ini membuat jumlah elektron tak berpasangan oksigen salah hitung (seharusnya 2, bukan 0).

LAB MINI Hotel Elektron: jadilah resepsionisnya!

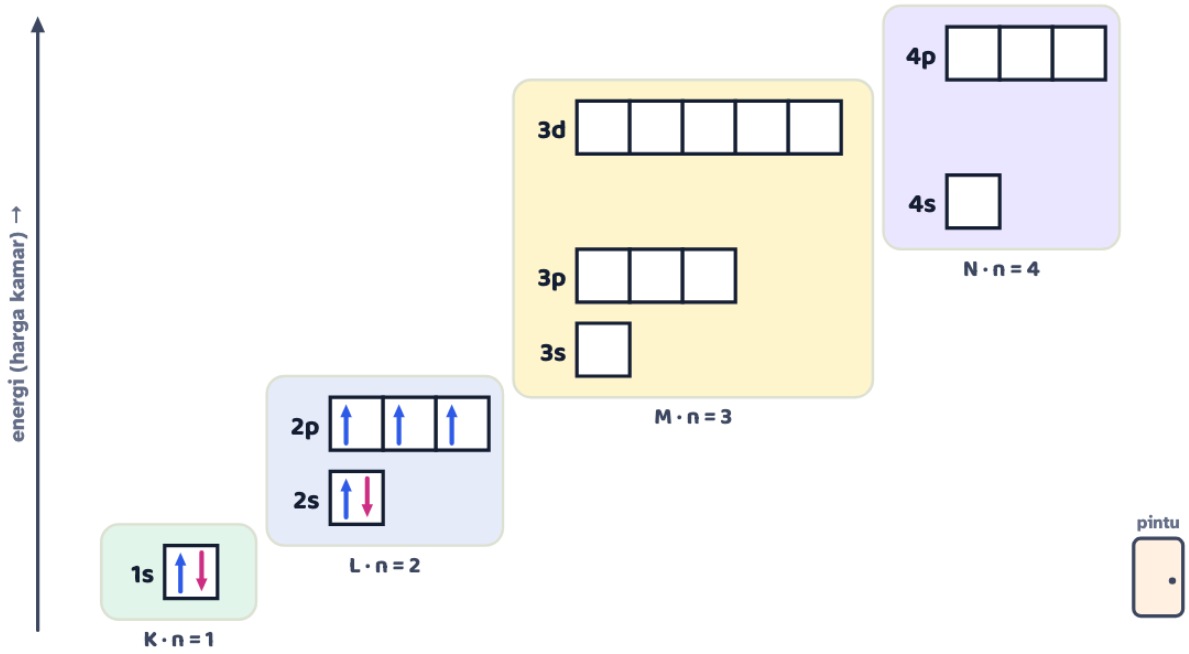
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-7

7
N

$1s^2\ 2s^2\ 2p^3$

[He] $2s^2\ 2p^3$ · K 2 · L 5

✓ Keadaan dasar: Aufbau, Pauli, dan Hund dipatuhi.



Atom/ion	Konfigurasi	Notasi gas mulia	Per kulit
N (nitrogen)	$1s^2\ 2s^2\ 2p^3$	[He] $2s^2\ 2p^3$	K 2 · L 5

Elektron tak berpasangan
3 → paramagnetik

Tekan ➕ **Tamu masuk** berkali-kali dan lihat elektron diantar ke kamar termurah. Ketuk **sisi kiri/kanan sebuah kamar** untuk menaruh atau mengusir elektron sendiri. Coba langgar aturan: taruh dua panah searah di satu kamar (pilih spin "↑ saja"), atau isi 3s sebelum 2p penuh. Apa kata resepsionis? Lanjutkan sampai elektron ke-24 dan ke-29: ada kejutan untuk kromium dan tembaga! Pilih sebuah **inti** (misalnya Fe) lalu tekan ➖ untuk membuat ion.

KERJAKAN BERSAMA **Konfigurasi lengkap besi**

Tuliskan konfigurasi elektron besi (Z = 26), notasi gas mulianya, susunan per kulit, dan jumlah elektron tak berpasangannya.

1. Isi menurut urutan Aufbau sampai 26 elektron: $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^6$. Cek: $2+2+6+2+6+2+6=26$ ✔
2. Delapan belas elektron pertama sama dengan argon, jadi notasi gas mulianya [Ar] $4s^2\ 3d^6$. Boleh juga ditulis menurut nomor kulit: [Ar] $3d^6\ 4s^2$.
3. Per kulit: K = 2, L = 2 + 6 = 8, M = 2 + 6 + 6 = 14, N = 2. Jadi 2, 8, 14, 2 (bukan 2, 8, 8, 8!).
4. Diagram $3d^6$ menurut Hund: lima elektron pertama menyebar [↑][↑][↑][↑][↑], elektron keenam berpasangan: [↑↓][↑][↑][↑][↑].

Besi: [Ar] $4s^2\ 3d^6$, per kulit 2, 8, 14, 2, dengan 4 elektron tak berpasangan. Elektron tak berpasangan inilah salah satu syarat sifat magnet besi yang kita kenal sehari-hari.

7.4 Bilangan kuantum: alamat lengkap setiap elektron

Setiap tamu hotel punya alamat lengkap: lantai berapa, sayap mana, kamar nomor berapa. Elektron juga punya alamat yang terdiri atas empat bilangan, yaitu **bilangan kuantum**. Tiga bilangan pertama muncul dari persamaan Schrödinger, sedangkan yang keempat menyatakan spin elektron.

Bilangan kuantum	Lambang	Nilai yang boleh	Menyatakan	Di Hotel Elektron
utama	n	$1, 2, 3, \ldots$	kulit (ukuran & energi utama orbital)	lantai
azimut	l	$0, 1, \ldots, n-1$	subkulit (bentuk orbital): 0 = s, 1 = p, 2 = d, 3 = f	sayap
magnetik	m_l	$-l, \ldots, 0, \ldots, +l$	orbital tertentu (arah orbital dalam ruang)	nomor kamar
spin	m_s	$+\frac{1}{2}$ atau $-\frac{1}{2}$	arah spin elektron (↑ atau ↓)	arah putaran tamu

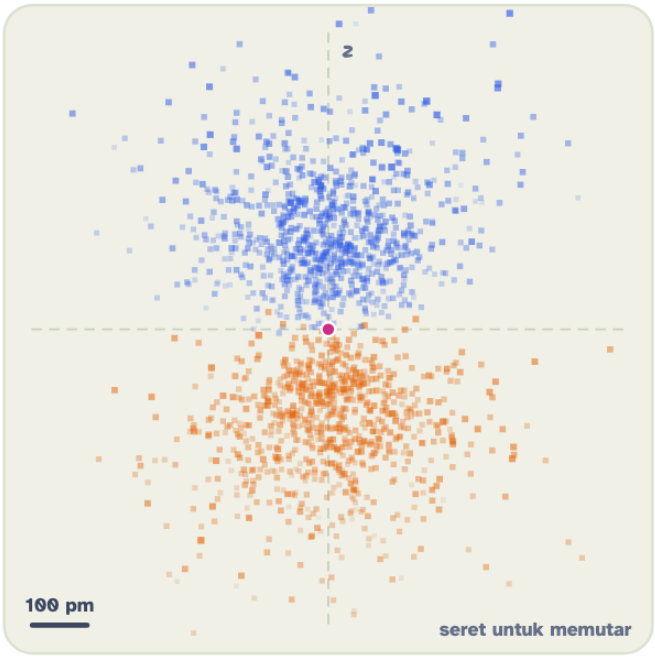
DEFINISI · BILANGAN KUANTUM

Bilangan kuantum adalah empat bilangan (n, l, m_l, m_s) yang menyatakan keadaan sebuah elektron dalam atom: kulitnya, subkulitnya, orbitalnya, dan spinnya. Menurut larangan Pauli, tidak ada dua elektron dalam satu atom yang keempat bilangan kuantumnya sama persis.

Contoh: kulit $n = 2$ boleh punya $l = 0$ (2s) dan $l = 1$ (2p), tetapi **tidak** boleh $l = 2$. Itulah sebabnya tidak ada "2d" atau "1p". Untuk $l = 1$, nilai m_l boleh –1, 0, atau +1: tiga kamar p.

LAB MINI **Awan Orbital: ketik alamat, lihat kamarnya**

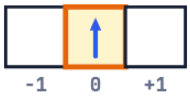
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-7



Kartu alamat elektron

n = 2	kulit L (lantai 2)
l = 1	subkulit p (sayap)
m_l = 0	kamar ke-2 dari 3
m_s = +½	spin ↑

subkulit 2p: 3 kamar



Aturan alamat:

- l = 0, 1, …, n − 1
- m_l = −l, …, 0, …, +l
- m_s = +½ atau −½ (maks. 2 per kamar)

Orbital	Simpul radial (n − l − 1)	Simpul sudut (l)	Jari-jari awan 90% (atom H)
2p (orbital pz)	0	1	422 pm

Elektron terakhir milik (urutan Aufbau): **Z = 6 · C (karbon)**

Geser n, l, dan m_l. Titik-titik adalah **tempat elektron mungkin ditemukan** pada atom hidrogen: makin rapat, makin besar peluangnya. Biru dan oranye menandai fase gelombang (+ dan −). Seret awannya untuk memutar. Coba alamat terlarang seperti $n = 1, l = 1$. Perhatikan juga **simpul**: permukaan tempat peluang elektron nol. Berapa simpul pada 3s?

TAMU DARI MASA LALU · ELEKTRON YANG "BERPUTAR"

Pada 1922, **Otto Stern** dan **Walther Gerlach** menembakkan berkas atom perak melewati magnet yang tidak seragam. Mereka kaget: berkas itu terbelah tepat menjadi **dua**. Pada 1925, **George Uhlenbeck** dan **Samuel Goudsmit** mengusulkan bahwa elektron punya sifat magnet bawaan yang disebut *spin*, dengan dua kemungkinan arah saja. Pada tahun yang sama, **Wolfgang Pauli** merumuskan larangannya (ia meraih Nobel Fisika 1945), dan **Friedrich Hund** menyusun aturan pengisian orbital setara pada pertengahan 1920-an.

Untuk soal "bilangan kuantum elektron terakhir", buku-buku di Indonesia memakai kesepakatan berikut: kotak orbital diberi nilai m_l dari $-l$ (kiri) sampai $+l$ (kanan), dan elektron pertama di setiap kamar ber-spin $m_s = +\frac{1}{2}$ (↑).

AWAS JEBAKAN

Nilai m_s untuk panah ↑ hanyalah **kesepakatan**. Sebagian buku memakai ↑ = $-\frac{1}{2}$, dan sebagian mengisi m_l dari $+l$. Bacalah kesepakatan yang dipakai soal. Yang **bukan** kesepakatan: l selalu kurang dari n, dan m_l selalu di antara $-l$ dan $+l$.

KERJAKAN BERSAMA **Alamat elektron terakhir oksigen**

Tentukan keempat bilangan kuantum elektron terakhir atom oksigen (Z = 8).

1. Konfigurasi: $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$. Elektron terakhir berada di 2p, jadi $n = 2$ dan $l = 1$.
2. Diagram $2p^4$ dengan kotak $m_l = -1, 0, +1$: tiga elektron pertama mengisi ↑ di ketiga kotak, elektron keempat kembali ke kotak $m_l = -1$ sebagai ↓.
3. Jadi elektron terakhir: $m_l = -1$ dan $m_s = -\frac{1}{2}$.

$n = 2,\ l = 1,\ m_l = -1,\ m_s = -\frac{1}{2}$.

COBA SENDIRI **Membaca alamat terbalik**

Elektron terakhir sebuah atom netral memiliki bilangan kuantum $n = 4,\ l = 1,\ m_l = 0,\ m_s = -\frac{1}{2}$. Unsur apakah itu?

1. $n = 4$ dan $l = 1$ berarti elektron terakhir di subkulit 4p.
2. $m_s = -\frac{1}{2}$ berarti elektron itu sudah berpasangan, jadi ketiga kotak sudah terisi ↑ (3 elektron). Kotak $m_l = -1$ mendapat ↓ (elektron ke-4), lalu kotak $m_l = 0$ mendapat ↓ (elektron ke-5).
3. Jadi subkulit terakhir $4p^5$: [Ar] $4s^2\ 3d^{10}\ 4p^5$. Jumlah elektron $= 18 + 2 + 10 + 5 = 35$.

Z = 35, yaitu Br (bromin), halogen cair berwarna cokelat kemerahan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

FUNGSI GELOMBANG, PELUANG, DAN SIMPUL

Persamaan Schrödinger untuk atom hidrogen menghasilkan **fungsi gelombang** ψ_{n,l,m_l}. Fungsi ini sendiri tidak bisa diukur, tetapi kuadratnya, $|\psi|^2$, adalah **rapat peluang** menemukan elektron. Pada atom hidrogen, energinya hanya bergantung pada n: $E_n = -\frac{13{,}6\ \text{eV}}{n^2}$. Pada atom berelektron banyak, elektron saling tolak dan saling "melindungi" dari inti, sehingga energi juga bergantung pada l. Itulah asal urutan 4s sebelum 3d.

Orbital punya **simpul**, yaitu permukaan dengan peluang nol. Jumlah **simpul radial** (kulit bola) $= n - l - 1$, jumlah **simpul sudut** (bidang atau kerucut) $= l$, sehingga total simpul $= n - 1$. Contoh: 3p punya 1 simpul radial dan 1 bidang simpul. Fase + dan – di kedua sisi simpul penting saat orbital bertumpang tindih membentuk ikatan (Bab 11 dan 12).

7.5 Elektron valensi, golongan, pengecualian, dan konfigurasi ion

Kimia sebuah unsur terutama ditentukan oleh elektron di kulit terluar atau subkulit yang sedang terisi: **elektron valensi**. Hebatnya, konfigurasi elektron langsung memberi tahu alamat unsur di tabel periodik.

- **Periode** = nomor kulit terbesar (n terbesar) yang berisi elektron.
- **Blok** = subkulit yang terakhir diisi menurut Aufbau (s, p, d, atau f).
- **Golongan** dihitung dari elektron valensi, seperti pada tabel di bawah.

Konfigurasi terluar	Blok	Golongan (1–18)	Golongan (A/B)	Contoh

$ns^{1–2}$	s	= jumlah elektron ns (1 atau 2)	IA, IIA	Na [Ne] $3s^1$: periode 3, golongan 1 (IA)
$ns^2\ np^{1–6}$	p	= 10 + (elektron ns + np)	IIIA–VIIIA = ns + np	Cl [Ne] $3s^2\ 3p^5$: periode 3, golongan 17 (VIIA)
$ns^{1–2}\ (n–1)d^{1–10}$	d	= elektron ns + (n–1)d	IIIB–VIIIB, IB, IIB	Fe [Ar] $4s^2\ 3d^6$: periode 4, golongan 8 (VIIIB)
$ns^2\ (n–2)f^{1–14}$	f	lantanida & aktinida	—	U [Rn] $5f^3\ 6d^1\ 7s^2$: aktinida

Helium ($1s^2$) adalah pengecualian kecil: secara konfigurasi ia blok s, tetapi diletakkan di golongan 18 karena kulitnya penuh dan sifatnya mirip gas mulia lain.

TABEL PERIODIK HIDUP

Blok s, p, d, f: tabel periodik adalah peta subkulit



Lebar setiap blok sama dengan daya tampung subkulitnya: blok s 2 kolom, p 6 kolom, d 10 kolom, f 14 kolom. Ketuk unsur untuk melihat konfigurasi dan diagram orbitalnya. Cari kromium (Cr) dan tembaga (Cu):

apa yang aneh pada konfigurasinya?

Pengecualian: kromium dan tembaga

Aturan Aufbau meramalkan kromium $4s^2\ 3d^4$ dan tembaga $4s^2\ 3d^9$. Hasil pengukuran (spektroskopi dan sifat magnet) berkata lain:

Unsur	Ramalan Aufbau	Konfigurasi sebenarnya	Alasan
Cr (Z = 24)	[Ar] $4s^2\ 3d^4$	**[Ar] $3d^5\ 4s^1$**	3d setengah penuh: 6 elektron tak berpasangan searah
Cu (Z = 29)	[Ar] $4s^2\ 3d^9$	**[Ar] $3d^{10}\ 4s^1$**	3d penuh

Energi 4s dan 3d sangat berdekatan. Memindahkan satu elektron dari 4s ke 3d hanya "rugi" sedikit, tetapi subkulit d yang **setengah penuh** (d^5) atau **penuh** (d^{10}) memberi keuntungan stabilitas yang lebih besar. Pola yang sama terjadi pada tetangga di bawahnya: molibdenum [Kr] $4d^5\ 5s^1$, perak [Kr] $4d^{10}\ 5s^1$, dan emas [Xe] $4f^{14}\ 5d^{10}\ 6s^1$.

Konfigurasi ion: tamu yang check-out

Anion terbentuk ketika atom menerima elektron: tambahkan elektron menurut Aufbau. Klorin [Ne] $3s^2\ 3p^5$ menjadi Cl^- [Ne] $3s^2\ 3p^6$ = [Ar]. **Kation** terbentuk ketika atom melepas elektron: lepaskan dari kulit **terluar** (n terbesar) dulu. Natrium [Ne] $3s^1$ menjadi Na^+ [Ne].

Ion dan atom yang jumlah elektronnya sama disebut **isoelektronik**. Contoh: O^{2-}, F^-, Ne, Na^+, Mg^{2+}, dan Al^{3+} semuanya punya 10 elektron, $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$. Walaupun elektronnya sama, ukurannya berbeda karena jumlah protonnya berbeda (Bab 8).

Tebak Dulu!

Besi: [Ar] $4s^2$ $3d^6$. Ketika besi berkarat dan membentuk ion Fe^{2+}, dua elektron mana yang dilepas?

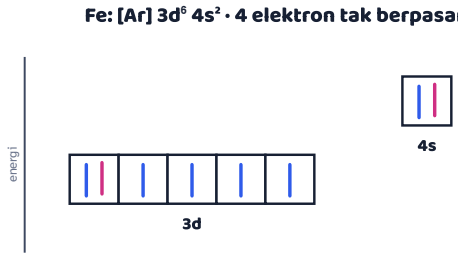
Dua elektron 3d, karena 3d diisi paling akhir sehingga keluar paling dulu.

Dua elektron 4s.

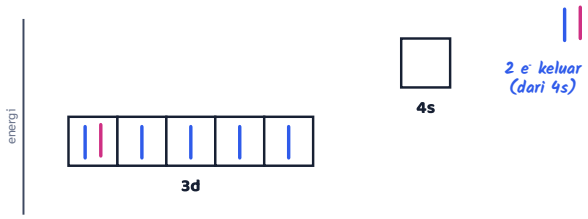
Satu elektron 4s dan satu elektron 3d.

Dua elektron 1s, karena paling dekat dengan inti.

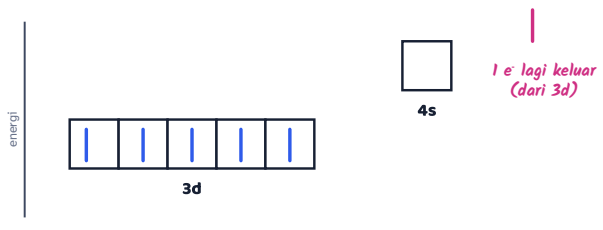
Jawabannya: dua elektron 4s. Masuk duluan tidak berarti keluar belakangan! Elektron 4s berada di kulit ke-4, paling jauh dari inti. Setelah orbital 3d terisi, energi 3d turun di bawah 4s. Jadi Fe^{2+} = [Ar] $3d^6$, bukan [Ar] $4s^2$ $3d^4$.



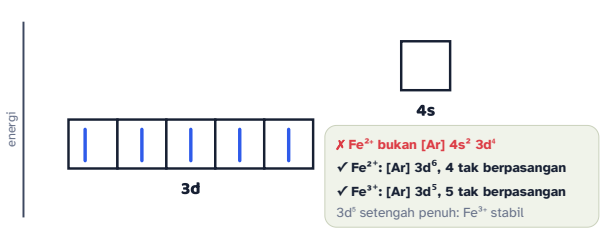
Langkah 1. Atom besi: [Ar] $3d^6$ $4s^2$. Pada atom yang sudah "jadi", orbital 3d berenergi **lebih rendah** daripada 4s, jadi 4s digambar di atas.



Langkah 2. Ionisasi pertama dan kedua: kedua elektron **4s** lepas lebih dulu karena berada di kulit terluar ($n = 4$). Terbentuk Fe^{2+} = [Ar] $3d^6$, ion besi(II) yang berwarna hijau pucat dalam air.



Langkah 3. Ionisasi ketiga: satu elektron 3d yang berpasangan lepas. Terbentuk Fe^{3+} = [Ar] $3d^5$, setengah penuh dengan 5 elektron tak berpasangan. Ion besi(III) memberi warna cokelat kemerahan pada karat dan air sumur yang "berkarat".



Langkah 4. Aturan umum kation logam transisi: lepaskan elektron dari n terbesar dulu (4s sebelum 3d), walaupun 4s diisi lebih dulu saat atom dibangun.

MITOS

"Orbital adalah lintasan melingkar tempat elektron beredar, seperti planet mengelilingi Matahari."

FAKTA

Orbital adalah **daerah peluang**, bukan rel. Posisi dan kecepatan elektron tidak bisa diketahui pasti bersamaan (prinsip Heisenberg). Yang bisa kita gambar hanyalah "awan" tempat elektron mungkin berada.

MITOS

"Kulit terluar semua atom selalu berisi paling banyak 8 elektron, jadi besi pasti 2, 8, 8, 8."

FAKTA

Aturan "maksimal 8" hanya jalan pintas untuk 20 unsur pertama. Besi sebenarnya 2, 8, 14, 2, karena kulit M terisi lagi lewat subkulit 3d.

MITOS

"Karena 4s diisi sebelum 3d, elektron 4s juga dilepas paling akhir."

FAKTA

Terbalik! Pada ion logam transisi, elektron **4s lepas lebih dulu**. Fe^{2+} = [Ar] $3d^6$, Cu^{2+} = [Ar] $3d^9$. Urutan masuk tidak sama dengan urutan keluar.

KIMIA NUSANTARA · NIKEL SULAWESI DAN ELEKTRON D

Indonesia memiliki cadangan nikel terbesar di dunia, terutama di Sulawesi dan Maluku Utara. Atom nikel, **Ni**, berkonfigurasi [Ar] $3d^8$ $4s^2$. Saat menjadi ion Ni^{2+} (melepas dua elektron 4s), tersisa [Ar] $3d^8$ dengan 2 elektron tak berpasangan. Subkulit d yang belum penuh inilah yang membuat senyawa nikel berwarna hijau, bersifat paramagnetik, dan mudah berganti bilangan oksidasi ($Ni^{2+} \rightleftharpoons Ni^{3+}/Ni^{4+}$) di katode baterai kendaraan listrik. Rahasia logam strategis Nusantara tersimpan di kamar-kamar 3d!

COBA SENDIRI **Menebak logam dari ionnya**

Ion X^{2+} memiliki konfigurasi [Ar] $3d^5$. Tentukan (a) nomor atom dan nama X, (b) konfigurasi atom X, (c) letak X di tabel periodik, dan (d) jumlah elektron tak berpasangan pada atom X.

1. X^{2+} punya $18 + 5 = 23$ elektron. Atom netral X punya 2 elektron lebih banyak: 25 elektron, jadi Z = 25 (**Mn**, mangan).
2. Kation logam transisi melepas 4s dulu, jadi kedua elektron yang hilang berasal dari 4s: X = [Ar] $4s^2$ $3d^5$.
3. n terbesar = 4 → periode 4. Subkulit terakhir 3d → blok d. Golongan = 2 + 5 = 7 (VIIB).
4. $3d^5$ menurut Hund: [↑][↑][↑][↑][↑] → 5 elektron tak berpasangan ($4s^2$ berpasangan).

X = mangan (Z = 25), [Ar] $4s^2$ $3d^5$, periode 4 golongan 7, dengan 5 elektron tak berpasangan. Mangan banyak dipakai untuk baja dan baterai kering.

7.6 Bukti dari laboratorium: energi ionisasi berturutan dan sifat magnet

Bagaimana kita tahu bahwa kulit-kulit itu benar-benar ada? Salah satu bukti terkuat datang dari **energi ionisasi**: energi yang dibutuhkan untuk melepas satu mol elektron dari satu mol atom (atau ion) dalam wujud gas. Elektron bisa dilepas satu per satu, sehingga ada energi ionisasi pertama (IE_1), kedua (IE_2), dan seterusnya.

$$\mathrm{Na\,(g)} \longrightarrow \mathrm{Na^+\,(g)} + \mathrm{e^-} \qquad IE_1 = 496\ \mathrm{kJ/mol} \qquad \mathrm{Na^+}$$

Energi ionisasi berturutan selalu naik, karena elektron yang tersisa ditarik oleh muatan positif yang makin besar. Namun kenaikannya tidak rata. Bila elektron berikutnya harus dicabut dari **kulit yang lebih dalam**, energinya melonjak tajam. Lonjakan itulah "jejak kaki" kulit elektron.

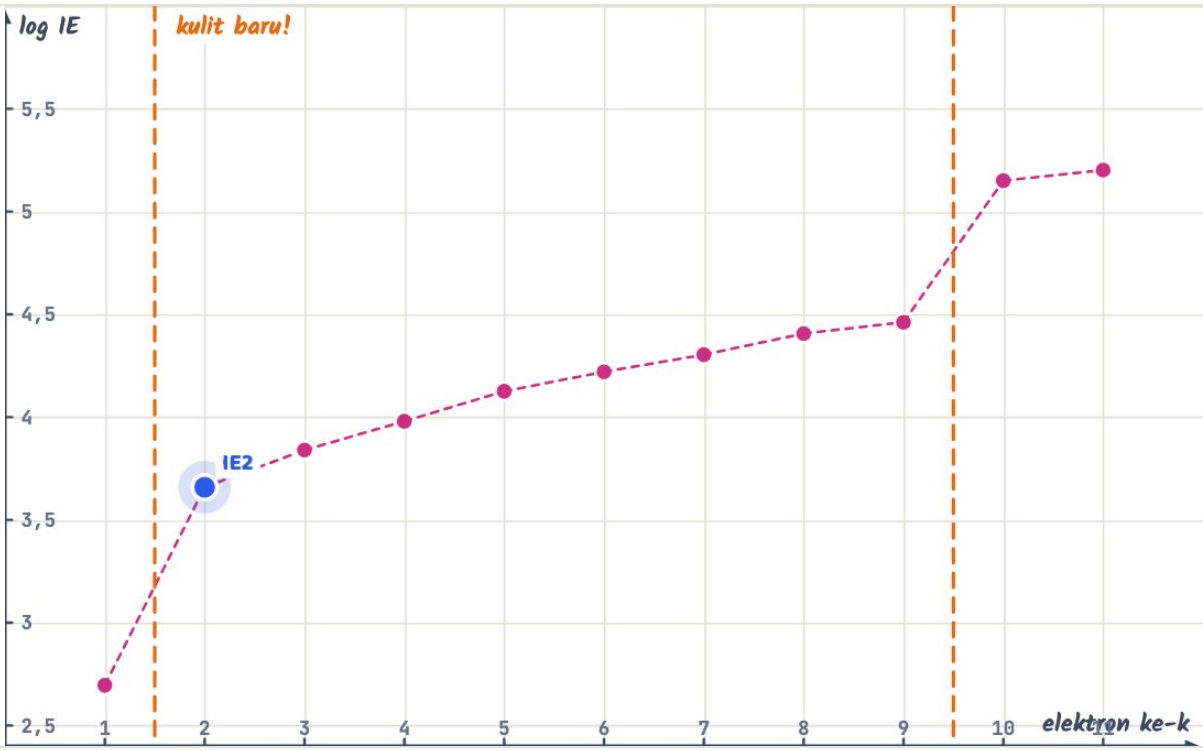
GRAFIK HIDUP

Energi ionisasi berturutan: cari lompatannya!

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-7

$$\log_{10}\left(IE_k/\text{kJ mol}^{-1}\right) \text{ vs } k$$

$$\text{Na (natrium)}: \quad IE_2 = 4.562\ \text{kJ/mol}$$



🚀 **lompatan besar: elektron ke-2 dicabut dari kulit yang lebih dalam!**

unsur	elektron di kulit terluar	IE ke-k (kJ/mol)	rasio IE_k/IE_{k-1}
Na (natrium)	1	4.562	9,2

Pilih unsur dengan penggeser Z, lalu seret titik biru ke elektron ke-k. Sumbu tegak memakai skala logaritma ($\log_{10}$), sehingga setiap naik 1 berarti energinya 10 kali lipat. Garis oranye menandai batas kulit. Untuk natrium, hitung: berapa elektron sebelum lompatan pertama? Berapa elektron di antara lompatan pertama dan kedua? Cocokkan dengan 2, 8, 1! (Data: buku data standar, dibulatkan.)

KERJAKAN BERSAMA **Detektif energi ionisasi**

Energi ionisasi berturutan (kJ/mol) unsur Q periode 3 adalah: 738; 1.451; 7.733; 10.543; 13.630. Tentukan golongan Q dan tuliskan konfigurasinya.

1. Hitung rasio berturutan: 1.451/738 ≈ 2,0; **7.733/1.451 ≈ 5,3**; 10.543/7.733 ≈ 1,4.
2. Lompatan besar terjadi antara IE_2 dan IE_3: elektron ketiga dicabut dari kulit yang lebih dalam. Jadi Q punya **2 elektron valensi**.
3. Periode 3 dengan 2 elektron valensi → golongan 2 (IIA): magnesium, [Ne] $3s^2$.

Q = magnesium (golongan 2), [Ne] $3s^2$. Itulah sebabnya magnesium membentuk ion Mg^{2+} dan tidak pernah Mg^{3+}: mencabut elektron ketiga terlalu mahal.

Elektron tak berpasangan dan magnet

Setiap elektron berperilaku seperti magnet kecil karena spinnya. Dua elektron sekamar (↑↓) saling meniadakan. Zat yang punya **elektron tak berpasangan** bersifat **paramagnetik**: tertarik ke medan magnet. Zat yang semua elektronnya berpasangan bersifat **diamagnetik**: sedikit ditolak medan magnet. Ion Zn^{2+} ([Ar] $3d^{10}$) diamagnetik, sedangkan Fe^{3+} ([Ar] $3d^5$) sangat paramagnetik. Besarnya dapat diperkirakan dari jumlah elektron tak berpasangan.

RUMUS HIDUP

Momen magnet spin-saja

$$\mu = \sqrt{n\,(n+2)}\;\mu_B$$

Makin banyak elektron tak berpasangan, makin kuat atom atau ion itu tertarik magnet.

n Jumlah elektron tak berpasangan

μ Momen magnet BM

MOMEN MAGNET

5,92

BM

Fe^{3+} dan Mn^{2+} ($3d^5$): 5,92 BM

5 elektron tak berpasangan → μ ≈ **5,92** magneton Bohr (BM). Zat ini bersifat **paramagnetik (tertarik magnet)**.

Cek satuan: magneton Bohr, μ_B = 9,27 × 10^{-24} J/T

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MOMEN-SPIN

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA D^5 DAN D^{10} ISTIMEWA, DAN MENGAPA 4S LEPAS DULU?

Energi pertukaran. Elektron-elektron yang spinnya searah di orbital berbeda saling menghindar lebih efektif, sehingga tolakannya lebih kecil. Keuntungan ini (energi pertukaran) sebanding dengan jumlah *pasangan* elektron searah: d^4 punya $\binom{4}{2} = 6$ pasangan, d^5 punya $\binom{5}{2} = 10$. Pada kromium, memindahkan satu elektron 4s ke 3d menghapus tolakan pasangan di 4s dan menambah 4 pasangan searah, sehingga $3d^5\ 4s^1$ lebih stabil.

Urutan isi ≠ urutan energi akhir. Pada kalium dan kalsium, orbital 3d masih "kosong dan jauh", sehingga 4s lebih rendah. Begitu inti bertambah proton dan 3d mulai terisi, elektron 3d tertarik kuat dan energinya turun di bawah 4s. Elektron 4s yang paling luar justru paling mudah dicabut. Spektroskopi foton (PES) mengonfirmasi: pada logam transisi, elektron 4s punya energi ikat terkecil.

Kimia di sekitarmu



Kembang api tahun baru

Panas membuat elektron ion logam "naik" ke kamar yang lebih mahal (keadaan tereksitasi). Saat turun lagi, energinya keluar sebagai cahaya: stronsium merah, natrium kuning, tembaga hijau-biru.



Lampu jalan kuning

Lampu natrium di jalan raya memancarkan cahaya kuning 589 nm, berasal dari elektron yang melompat antara subkulit 3p dan 3s atom natrium.



MRI di rumah sakit

Zat kontras MRI memakai ion gadolinium, Gd^{3+} ($4f^7$), dengan 7 elektron tak berpasangan. Sifat paramagnetiknya yang kuat membuat gambar jaringan lebih jelas.



Kabel listrik tembaga

Tembaga [Ar] $3d^{10}$ $4s^1$ punya satu elektron 4s yang mudah bergerak di antara atom. Karena itu tembaga menjadi penghantar listrik terbaik kedua setelah perak, dan dipakai di hampir semua kabel rumah.



Biru terusi, bening seng

Larutan terusi (Cu^{2+}, $3d^9$) berwarna biru karena subkulit d-nya belum penuh. Larutan seng sulfat (Zn^{2+}, $3d^{10}$) bening: subkulit d yang penuh tidak menyerap cahaya tampak.

Cek Cepat

Berapa elektron maksimum yang dapat menempati subkulit p?

- 2
- 6
- 10
- 14

Konfigurasi elektron tembaga (Z = 29) yang benar adalah ...

- [Ar] $4s^2\ 3d^9$
- [Ar] $4s^2\ 4p^9$
- [Ar] $3d^{10}\ 4p^1$
- [Ar] $3d^{10}\ 4s^1$

Konfigurasi ion Fe^{2+} (Z Fe = 26) adalah ...

- [Ar] $3d^6$
- [Ar] $4s^2\ 3d^4$
- [Ar] $4s^1\ 3d^5$
- [Ar] $4s^2\ 3d^6$

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: kartu Hotel Elektron

Bahan: kardus bekas atau karton, gunting, spidol, penggaris, dan ±40 kancing dua warna (atau kacang hijau dan kacang merah) sebagai elektron ↑ dan ↓.

1. Gambar "papan hotel" di karton: kotak 1s di bagian bawah, lalu 2s, tiga kotak 2p, 3s, tiga kotak 3p, dan 4s, makin ke atas makin mahal.
2. Buat 20 kartu kecil bertuliskan lambang dan nomor atom unsur H sampai Ca.
3. Kocok kartu, ambil satu, lalu isi papan dengan kancing: warna pertama = ↑, warna kedua = ↓. Patuhi Aufbau, Pauli, dan Hund!
4. Tulis konfigurasinya di balik kartu. Periksa dengan mengetuk chip unsur di buku ini, misalnya **Mg**.
5. Setelah semua kartu selesai, kelompokkan kartu yang konfigurasi kulit terluarnya mirip.

Keselamatan: kancing dan kacang adalah benda kecil. Jangan dimasukkan ke mulut, hidung, atau telinga, dan jauhkan dari adik balita karena bisa tersedak. Kacang yang sudah dipakai bermain jangan dimakan. Hati-hati memakai gunting, minta bantuan orang dewasa untuk memotong kardus tebal, dan cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Kartu apa saja yang berkumpul bersama Li? Apa persamaan konfigurasi mereka? Mengapa He dan Be, yang sama-sama berakhir dengan s^2, sifatnya sangat berbeda?

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 7 dalam 3 menit

☑ Kamu sekarang bisa...

- menuliskan **konfigurasi elektron per kulit** (K, L, M, N) dan memakai kapasitas kulit $2n^2$
- menjelaskan **subkulit s, p, d, f** serta bentuk **orbital** sebagai awan peluang, bukan lintasan
- menyusun konfigurasi elektron dan **diagram orbital** dengan aturan **Aufbau**, larangan **Pauli**, dan aturan **Hund**, termasuk pengecualian kromium dan tembaga
- menentukan **empat bilangan kuantum** (n, l, m_l, m_s) sebuah elektron
- menghubungkan **elektron valensi** dengan golongan, periode, dan blok, menulis **konfigurasi ion**, serta membaca **energi ionisasi berturutan** sebagai bukti adanya kulit

🔑 Istilah kunci

kulit elektron · Kulit elektron · elektron valensi · subkulit · orbital · Orbital · konfigurasi elektron keadaan dasar · diagram orbital · elektron tak berpasangan · bilangan kuantum · Bilangan kuantum · isoelektronik · energi ionisasi · paramagnetik · diamagnetik

🧮 Rumus penting

$$N_{\text{maks}} = 2\,n^2$$

Kapasitas kulit elektron. Kulit ke-n menampung paling banyak dua kali kuadrat nomor kulitnya.

$$e_{\text{maks}} = 2\,(2l + 1)$$

Orbital dan elektron dalam satu subkulit. Subkulit dengan bilangan kuantum azimut l punya 2l + 1 orbital; setiap orbital memuat dua elektron.

$$\mu = \sqrt{n\,(n+2)}\;\mu_B$$

Momen magnet spin-saja. Makin banyak elektron tak berpasangan, makin kuat atom atau ion itu tertarik magnet.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Kalium bukan 2, 8, 9!
- Diagram 2p4 oksigen adalah [↑↓][↑][↑], bukan [↑↓][↑↓][ ].
- Nilai m_s untuk panah ↑ hanyalah kesepakatan.

⛰ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=7

Teka-teki untuk Bab 8

Pada 1869, Dmitri Mendeleev menyusun unsur-unsur dalam sebuah tabel dan dengan berani meninggalkan kotak-kotak kosong. Ia bahkan meramal massa, massa jenis, dan rumus oksida unsur yang belum pernah dilihat siapa pun. Padahal elektron baru ditemukan 28 tahun kemudian! Bagaimana ia bisa meramal sifat unsur yang belum ada di tangannya?

▼ Intip petunjuk

Mendeleev memperhatikan bahwa sifat unsur **berulang secara berkala** dan tetangga atas–bawah dalam satu kolom bersifat mirip. Kita sekarang tahu sebabnya: unsur segolongan punya konfigurasi elektron terluar yang sama (Li, Na, K: ns^1). Di bawah silikon ia meramal "eka-silikon" dengan merata-ratakan sifat tetangganya. Pada 1886 unsur itu ditemukan dan dinamai germanium. Simak kisah lengkapnya di Bab 8!

BAB 8 · ATOM & TABEL PERIODIK

08 Tabel Periodik: Peta Ajaib yang Bisa Meramal

Pada 1869, seorang profesor kimia di Rusia sengaja mengosongkan beberapa kotak di tabelnya dan berkata, "Unsur di sini belum ditemukan, tetapi sifatnya sudah bisa kutebak." Ramalannya terbukti. Di bab ini kamu belajar membaca peta yang sama, lalu ikut meramal.

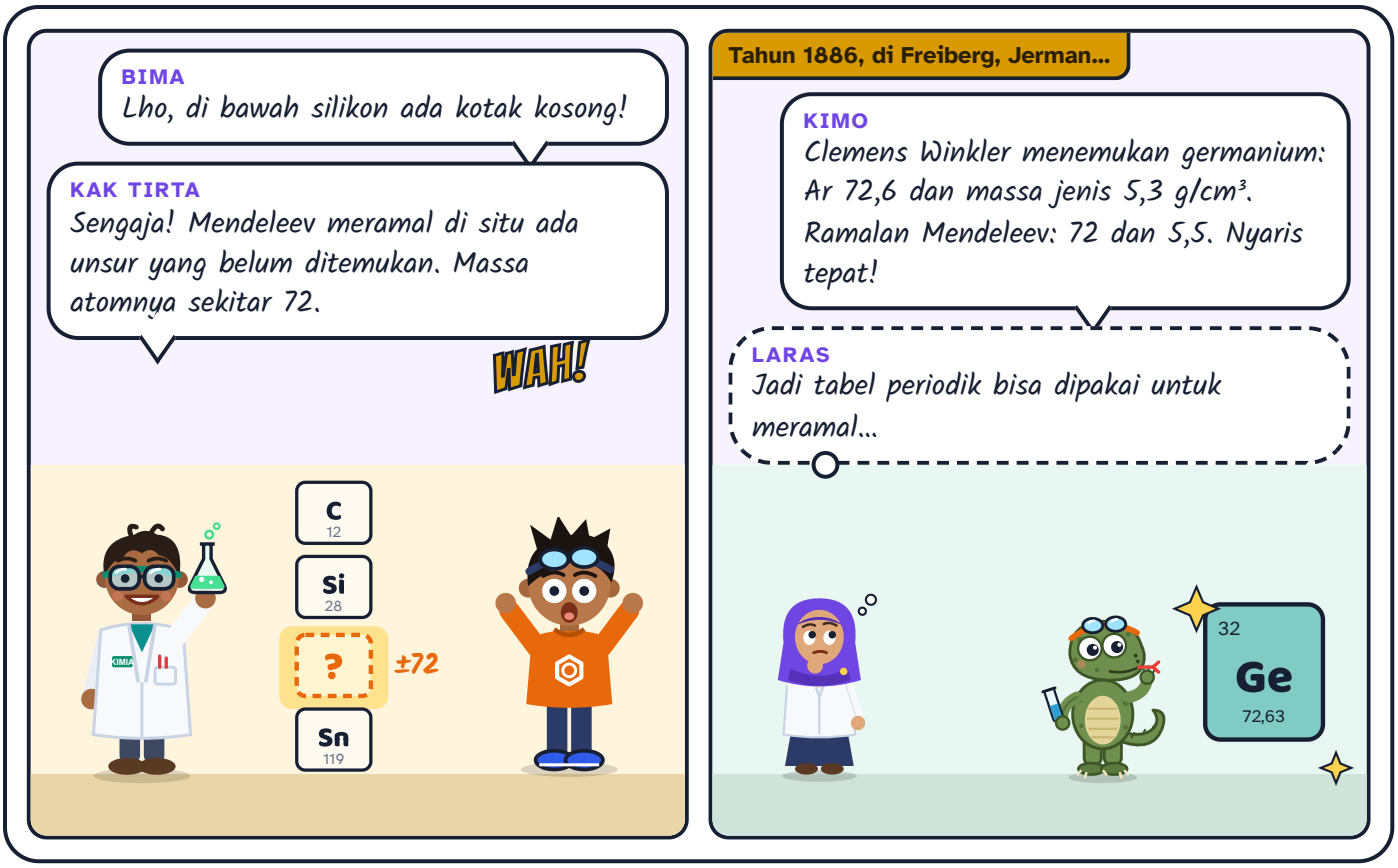
Setelah bab ini, kamu bisa

- menceritakan perjalanan tabel periodik dari **triade Döbereiner**, **oktaf Newlands**, dan **ramalan Mendeleev** sampai **hukum periodik modern** Moseley;
- menentukan **periode, golongan, dan blok** suatu unsur dari konfigurasi elektronnya, serta mengelompokkan logam, nonlogam, dan metaloid;
- menjelaskan tren **jari-jari atom dan ion** memakai **muatan inti efektif** dan **efek perisai**;
- membandingkan **energi ionisasi**, **afinitas elektron**, dan **keelektronegatifan**, termasuk anomali Be–B dan N–O;
- meramalkan sifat dan **reaktivitas** unsur (terutama golongan 1 dan 17) dari letaknya di tabel periodik.

KARTU-KARTU MENDELEEV

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Atom litium punya 3 elektron, sedangkan atom fluorin punya 9 elektron. Keduanya sama-sama punya dua kulit. Atom mana yang lebih besar?

- Fluorin, karena elektronnya tiga kali lebih banyak sehingga butuh tempat lebih luas.
- Litium, jari-jarinya lebih dari dua kali jari-jari fluorin.
- Sama besar, karena jumlah kulitnya sama.
- Tidak bisa dibandingkan, karena litium logam dan fluorin nonlogam.

Jawabannya: litium. Jari-jari kovalen litium ±128 pm, fluorin hanya ±57 pm. Fluorin memang punya lebih banyak elektron, tetapi juga punya 9 proton yang menarik semua elektronnya lebih kuat ke dalam. Subbab 8.3 membongkar rahasia "tarik-menarik" ini.

8.1 Mencari irama para unsur: dari triade sampai nomor atom

Pada pertengahan abad ke-19, kimiawan sudah mengenal sekitar 60 unsur. Ada logam lunak yang mendesis di air (natrium, kalium), gas kuning-hijau yang menyesakkan (klorin), dan cairan merah-cokelat berbau tajam (brom). Daftar itu mirip gudang yang berantakan. Adakah aturan yang menata semuanya?

Bahasa sederhana · Bayangkan kamu merapikan rak sepatu keluarga. Mula-mula kamu mengurutkannya menurut ukuran. Lalu kamu menaruh sepatu yang mirip (sandal, sepatu sekolah, sepatu bola) di lajur yang sama. Para kimiawan melakukan hal yang serupa pada unsur: mengurutkan, lalu mencari yang mirip supaya bisa dikelompokkan. Hasil akhirnya adalah **tabel periodik**.

Langkah pertama datang dari **Johann Wolfgang Döbereiner** (Jerman). Antara 1817 dan 1829 ia melihat bahwa unsur yang sifatnya mirip sering datang bertiga. Ia menyebutnya **triade**. Dalam satu triade, massa atom unsur tengah kira-kira sama dengan rata-rata massa dua unsur lainnya.

Triade	Ar unsur pertama & ketiga	Rata-ratanya	Ar unsur tengah
Li – Na – K	7 dan 39	23	Na = 23
Ca – Sr – Ba	40 dan 137	88,5	Sr = 87,6
Cl – Br – I	35,5 dan 127	81,25	Br = 79,9

Sayangnya, kebanyakan unsur tidak bisa dimasukkan ke triade mana pun. Pada 1864–1865, **John Newlands** (Inggris) mencoba cara lain: mengurutkan semua unsur menurut massa atomnya. Ia melihat bahwa unsur kedelapan mirip unsur pertama, seperti tangga nada *do, re, mi, fa, sol, la, si,* lalu *do* lagi. Ia menamainya **hukum oktaf**. Pola ini cocok untuk unsur ringan sampai kalsium, tetapi kacau sesudahnya. Seorang anggota Chemical Society di London bahkan menyindir dengan bertanya apakah Newlands sudah mencoba mengurutkan unsur menurut abjad. Dua puluh tahun kemudian, Newlands justru menerima medali atas penemuannya.

Pada 1869, **Dmitri Mendeleev** (Rusia) menulis 63 unsur yang dikenal saat itu pada kartu-kartu: lambang, massa atom, rumus oksida, dan sifat lainnya. Ia mengurutkan kartu menurut massa atom yang naik dan memulai baris baru setiap kali sifat mulai berulang. Hampir bersamaan, **Lothar Meyer** (Jerman) menemukan pola serupa dari grafik volume atom. Kejeniusan Mendeleev terletak pada tiga keputusan berani:

1. **Mengosongkan kotak.** Bila unsur berikutnya tidak cocok dengan keluarganya, ia meninggalkan kotak kosong untuk unsur yang belum ditemukan.
2. **Meramal sifat.** Dari tetangga-tetangganya ia meramal sifat unsur yang hilang: *eka-aluminium* (galium, ditemukan 1875), *eka-boron* (skandium, 1879), dan *eka-silikon* (germanium, 1886). Kata *eka* berarti "satu" dalam bahasa Sanskerta: satu tempat di bawah.
3. **Menukar urutan.** Telurium (Ar 127,6) ia taruh sebelum iodin (Ar 126,9), karena sifat iodin jelas mirip klorin dan brom. Baginya, kemiripan sifat lebih penting daripada urutan massa.

Sifat	Ramalan Mendeleev (1871) untuk eka-silikon	Germanium (ditemukan 1886)
Massa atom relatif	72	72,6
Massa jenis	5,5 g/cm^3	5,32 g/cm^3
Warna	abu-abu gelap	putih keabu-abuan

Rumus oksida	EsO_2	GeO_2
Klorida	$EsCl_4$, mendidih di bawah 100 °C, massa jenis 1,9 g/cm³	$GeCl_4$, mendidih pada ±86 °C, massa jenis 1,88 g/cm³

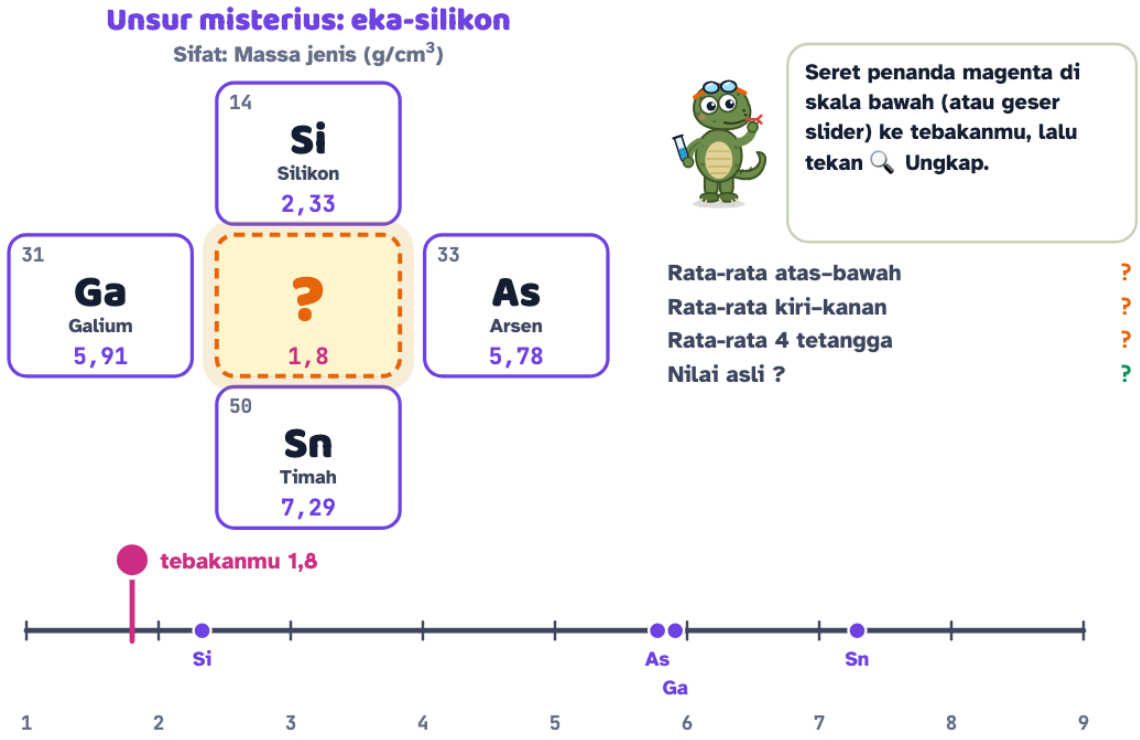
TAMU DARI MASA LALU · KETIKA RAMALAN MENGOREKSI PENGUKURAN

Pada 1875, **Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran** (Prancis) menemukan galium dan mengukur massa jenisnya: 4,7 g/cm³. Mendeleev menulis kepadanya bahwa nilainya seharusnya sekitar 5,9, dan bahwa sampelnya mungkin belum murni. Setelah galium dimurnikan dan diukur ulang, hasilnya 5,9 g/cm³! Seorang ilmuwan yang belum pernah melihat galium ternyata lebih tepat daripada penemunya sendiri. Sejak itu para kimiawan percaya pada tabel periodik.

Sekarang giliranmu menjadi Mendeleev. Di Lab Mini berikut, unsur di tengah disembunyikan. Kamu hanya melihat empat tetangganya.

LAB MINI **Teka-teki Mendeleev: tebak unsur yang hilang**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-8



Tebakanmu	Rata-rata 4 tetangga	Nilai sebenarnya	Selisih	Tebakan jitu (< 10%)
1,8 g/cm³	?	?	–	0 dari 0

Pilih **unsur misterius** dan **sifat** yang mau ditebak. Seret penanda magenta di skala (atau geser slider) ke tebakanmu, lalu tekan 🔍 **Ungkap**. Bingung? Tekan 💡 **Rata-rata tetangga** untuk memakai cara Mendeleev. Coba juga titik leleh galium dan massa jenis brom: kapan cara rata-rata ini gagal, dan mengapa?

KERJAKAN BERSAMA **Menebak massa jenis germanium seperti Mendeleev**

Tetangga germanium di tabel periodik adalah Si di atasnya (2,33 g/cm³), Sn di bawahnya (7,29 g/cm³), Ga di kirinya (5,91 g/cm³), dan As di kanannya (5,78 g/cm³). Perkirakan massa jenis germanium.

1. Rata-rata atas–bawah: $\frac{2{,}33 + 7{,}29}{2} = 4{,}81$ g/cm³.
2. Rata-rata kiri–kanan: $\frac{5{,}91 + 5{,}78}{2} \approx 5{,}85$ g/cm³.
3. Rata-rata keempatnya: $\frac{2{,}33 + 7{,}29 + 5{,}91 + 5{,}78}{4} = \frac{21{,}31}{4} \approx 5{,}33$ g/cm³.

Perkiraan ±5,3 g/cm³. Hasil pengukuran germanium 5,32 g/cm³: selisihnya kurang dari 1%. Sifat unsur memang berubah teratur di sekitar letaknya.

Tabel Mendeleev masih menyimpan teka-teki. Mengapa argon (Ar 39,95) harus diletakkan sebelum kalium (Ar 39,10), dan kobalt (58,93) sebelum nikel (58,69)? Jawabannya datang pada 1913 dari **Henry Moseley** (Inggris). Ia menembakkan elektron berenergi tinggi ke berbagai logam dan mengukur frekuensi sinar-X yang dipancarkan. Ternyata akar frekuensinya naik selangkah demi selangkah, tepat satu langkah per unsur. "Langkah" itu adalah **nomor atom** Z, yaitu jumlah proton di inti.

RUMUS HIDUP

Hukum Moseley: sidik jari sinar-X

$$f = 2{,}47 \times 10^{15}\ \text{Hz} \times (Z - 1)^2$$

Frekuensi sinar-X garis Kα setiap unsur naik teratur sebanding dengan kuadrat (Z − 1), sehingga nomor atom bisa dibaca dari 'cahaya' unsur itu.

- Z Nomor atom
- f Frekuensi garis Kα Hz

FREKUENSI GARIS KA

$1{,}936 \times 10^{18}$

Hz

tembaga: λ ≈ 155 pm (hasil ukur 154 pm)

Unsur dengan Z = **29** memancarkan sinar-X Kα berfrekuensi **$1{,}936 \times 10^{18}$** Hz, panjang gelombang ±**154,817** pm.

Cek satuan: Hz = getaran per detik

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-HUKUM-MOSELEY

HUKUM PERIODIK MODERN

Sifat-sifat unsur merupakan **fungsi periodik dari nomor atomnya**. Bila unsur diurutkan menurut nomor atom yang naik, sifat-sifat yang mirip muncul kembali secara berkala. Tabel periodik modern memuat 118 unsur dalam 7 periode; empat nama terakhir (nihonium, moskovium, tenesin, dan oganeson) diresmikan IUPAC pada 2016.

AWAS JEBAKAN

Mendeleev menyusun unsur menurut massa atom, bukan nomor atom. Nomor atom baru dipahami setelah Moseley (1913). Itulah sebabnya Mendeleev terpaksa "melanggar" urutan massa pada pasangan Te–I, sedangkan tabel modern yang memakai nomor atom tidak membutuhkan pengecualian itu.

TAMU DARI MASA LALU · HENRY MOSELEY

Moseley baru berusia 26 tahun ketika menemukan hukumnya. Dari celah pada deret nomor atom, ia menunjukkan bahwa unsur bernomor 43, 61, 72, dan 75 belum ditemukan. Keempatnya memang baru ditemukan kemudian (1923–1945). Moseley gugur di Gallipoli pada 1915 dalam usia 27 tahun. Banyak ilmuwan yakin ia akan meraih Hadiah Nobel seandainya masih hidup.

8.2 Alamat setiap unsur: golongan, periode, dan blok

Setiap unsur di tabel periodik punya "alamat", seperti rumahmu punya nama jalan dan nomor rumah. Begitu tahu alamatnya, kamu bisa menebak banyak hal tentang unsur itu.

DEFINISI · PERIODE DAN GOLONGAN

Periode adalah lajur mendatar (baris) tabel periodik; ada 7 periode. Nomor periode sama dengan jumlah kulit elektron yang terisi, yaitu bilangan kuantum utama n terbesar. **Golongan** adalah lajur tegak (kolom); ada 18 golongan. Unsur segolongan punya susunan elektron valensi yang sama, sehingga sifat kimianya mirip.

Di Bab 7 kamu sudah bisa menulis konfigurasi elektron. Sekarang konfigurasi itu bisa langsung diterjemahkan menjadi alamat:

- **Periode** = nomor kulit terluar (n terbesar). Natrium $1s^2\,2s^2\,2p^6\,3s^1$ → periode 3.
- **Blok** = subkulit yang terakhir diisi: **blok s** (golongan 1–2 dan helium), **blok p** (golongan 13–18), **blok d** (golongan 3–12, logam transisi), dan **blok f** (lantanida dan aktinida).
- **Golongan**: blok s → jumlah elektron valensi (1 atau 2); blok p → 10 + jumlah elektron ns dan np; blok d → jumlah elektron ns dan $(n-1)d$.

Golongan IUPAC	Golongan lama	Elektron valensi	Nama keluarga	Contoh
1	IA	ns^1	logam alkali (kecuali H)	Li, Na, K
2	IIA	ns^2	logam alkali tanah	Mg, Ca
3–12	IIIB–VIIIB, IB, IIB	$(n-1)d\,ns$	logam transisi	Fe, Ni, Cu, Au
13	IIIA	$ns^2\,np^1$	golongan boron	B, Al, Ga
14	IVA	$ns^2\,np^2$	golongan karbon	C, Si, Sn
15	VA	$ns^2\,np^3$	golongan nitrogen	N, P, As
16	VIA	$ns^2\,np^4$	kalkogen	O, S, Se

17	VIIA	$ns^2\,np^5$	halogen	F, Cl, Br, I
18	VIIIA (atau 0)	$ns^2\,np^6$ (He: $1s^2$)	gas mulia	**He**, **Ne**, **Ar**

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Golongan 13 bukan golongan 3! Banyak buku di Indonesia masih menulis golongan dengan huruf A/B, misalnya aluminium di golongan IIIA. Penomoran IUPAC 1–18 (dipakai IGCSE dan IB) menghitung semua kolom, termasuk 10 kolom logam transisi. Jadi untuk unsur blok p, tambahkan 10: IIIA = 13, VIIA = 17.

CONTOH **Menentukan alamat klorin dan besi**

Tentukan periode, golongan, dan blok untuk klorin ($Z = 17$) dan besi ($Z = 26$).

1. Klorin: $1s^2\,2s^2\,2p^6\,3s^2\,3p^5$ (2, 8, 7). Kulit terluar $n = 3$ → **periode 3**.
2. Elektron terakhir masuk subkulit p → **blok p**. Elektron valensi $3s^2\,3p^5$ = 7, jadi golongan $10 + 7 =$ **17** (VIIA): halogen.
3. Besi: $[\mathrm{Ar}]\,3d^6\,4s^2$. Kulit terluar $n = 4$ → **periode 4**. Elektron terakhir masuk subkulit d → **blok d**.
4. Golongan blok d = elektron $4s + 3d = 2 + 6 = 8$ → **golongan 8** (VIIIB): logam transisi.

Cl: periode 3, golongan 17, blok p (nonlogam). Fe: periode 4, golongan 8, blok d (logam transisi).

ADU CEPAT **Nomor atom → periode**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-8

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Hafalkan nomor atom gas mulia: 2, 10, 18, 36, 54. Gas mulia menutup setiap periode.

ADU CEPAT

Elektron valensi → golongan IUPAC

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-8

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Golongan 1 dan 2: sama dengan elektron valensi. Blok p: tambahkan 10 (3 elektron valensi → golongan 13).

Selain alamat, letak unsur juga memberi tahu jenisnya. Garis "tangga" dari boron sampai astatin memisahkan **logam** (di kiri, sekitar 80% unsur) dan **nonlogam** (di kanan atas).

Sifat	Logam	Nonlogam
Penampilan	mengilap	kusam (kecuali beberapa, mis. iodin)
Hantaran listrik & panas	baik	buruk (kecuali grafit)
Saat dipukul	lentur, bisa ditempa dan ditarik menjadi kawat	rapuh (bila padat)
Wujud pada 25 °C	padat (kecuali raksa)	padat, cair (brom), atau gas
Saat bereaksi	melepas elektron → ion positif	menerima atau berbagi elektron
Oksida	bersifat basa, mis. Na_2O, CaO	bersifat asam, mis. CO_2, SO_2

Di sepanjang tangga itu tinggal **metaloid**: B, Si, Ge, As, Sb, Te. Sifatnya setengah logam, setengah nonlogam. Silikon, misalnya, mengilap seperti logam tetapi rapuh, dan daya hantar listriknya justru naik bila dipanaskan. Itulah bahan semikonduktor di dalam cip HP dan panel surya.

TABEL PERIODIK HIDUP

Peta keluarga unsur

Warnai menurut Kategori

Cari unsur (nama/lambang/nomor)...





Mulai dari **Kategori**: temukan tangga metaloid antara logam dan nonlogam. Ganti ke **Blok s/p/d/f** dan cocokkan dengan konfigurasi elektron. Pilih **Wujud pada suhu tertentu** lalu geser suhunya: pada 25 °C (298 K) hanya dua unsur yang cair. Mana saja? Terakhir, pilih **Tambang Nusantara**.

KIMIA NUSANTARA · TABEL PERIODIK DI PERUT BUMI INDONESIA

Indonesia termasuk penghasil terbesar dunia untuk **nikel** (Sulawesi dan Maluku Utara) dan **timah** (Bangka Belitung). Ada juga emas dan tembaga di Papua dan Sumbawa, bauksit (bijih aluminium) di Kalimantan Barat dan Kepulauan Riau, pasir besi di pantai selatan Jawa, batu bara di Kalimantan dan Sumatra, serta belerang di Kawah Ijen. Perhatikan: hampir semuanya logam, dan banyak yang tinggal di blok d. Gamelan perunggu pun lahir dari dua "warga" tabel ini: tembaga (golongan 11) dan timah (golongan 14).

JEMBATAN KELEDAI KIMO

Golongan 1: **Ha**ri **Li**bur **Na**ik **K**uda, **Ru**bah **C**epat **S**ampai **Fr**ustrasi → H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr.
Golongan 2: **Be**bek **Mg**ang **Ca**ri **Sr**apan **Ba**yam **Ra**bu → Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra.
Golongan 17: **F**ani **Cl**ara **Br**ani **I**kut **At**letik → F, Cl, Br, I, At.
Nomor atom gas mulia 2, 10, 18, 36, 54, 86 adalah "tiang pagar" tiap periode: dari nomor atom saja kamu bisa langsung tahu periodenya.

8.3 Jari-jari atom dan ion: tarikan inti melawan perisai

Atom tidak punya kulit keras seperti bola pingpong. Awan elektronnya makin tipis ke arah luar tanpa batas yang tegas. Jadi, bagaimana mengukur "besar" atom? Kimiawan mengukur jarak antara inti atom-atom yang berikatan atau bersentuhan, lalu membaginya dua. Ada beberapa jenis jari-jari:

- **Jari-jari kovalen**: setengah jarak inti dua atom sejenis yang berikatan kovalen. Panjang ikatan Cl–Cl dalam Cl_2 ±199 pm, jadi jari-jari kovalen klorin ±100 pm.

- **Jari-jari logam**: setengah jarak inti dua atom bertetangga dalam kristal logam.
- **Jari-jari van der Waals**: setengah jarak inti dua atom yang hanya bersentuhan tanpa berikatan. Nilainya lebih besar daripada jari-jari kovalen.
- **Jari-jari ion**: ukuran ion di dalam kristal ion.

Satuannya pikometer: 1 pm = 10^{-12} m. Kecil sekali! Bila atom klorin diperbesar seukuran bola pingpong, bola pingpong yang diperbesar dengan skala yang sama akan berdiameter ±8.000 km, lebih dari separuh diameter Bumi.

Ukuran atom ditentukan oleh tarik-menarik. Inti yang bermuatan positif menarik elektron. Tetapi elektron terluar tidak merasakan seluruh tarikan inti, karena elektron-elektron di kulit dalam menghalangi sebagian tarikan itu. Inilah **efek perisai** (*shielding*). Kak Tirta suka mengibaratkannya begini: penjual martabak (inti) memanggil pembeli di ujung antrean. Makin banyak orang berdiri di depan pembeli itu (elektron kulit dalam), makin lemah suara yang sampai kepadanya. Orang yang berdiri sejajar di sebelahnya (elektron sekulit) hampir tidak menghalangi.

DEFINISI · MUATAN INTI EFEKTIF

Muatan inti efektif (Z_{ef}) adalah muatan positif "bersih" yang dirasakan sebuah elektron:

$$Z_{ef} = Z - S$$

dengan Z nomor atom (jumlah proton) dan S tetapan perisai. Aturan sederhana untuk SMA: $S \approx$ jumlah elektron di kulit dalam, sehingga Z_{ef} elektron valensi unsur golongan utama ≈ jumlah elektron valensinya.

RUMUS HIDUP

Muatan inti efektif (aturan sederhana)

$$Z_{ef} = Z - S$$

Tarikan bersih yang dirasakan elektron terluar sama dengan jumlah proton dikurangi perisai dari elektron di sebelah dalamnya.

Z Nomor atom (jumlah proton) | S Tetapan perisai | Z_{ef} Muatan inti efektif

MUATAN INTI EFEKTIF

1

Na, aturan sederhana: Zef = 1

Elektron terluar merasakan tarikan setara **1** proton, bukan **11** proton. (— berarti mustahil: perisai S harus lebih kecil daripada Z.)

Cek satuan: tanpa satuan (kelipatan muatan satu proton)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MUATAN-INTI-EFEKTIF

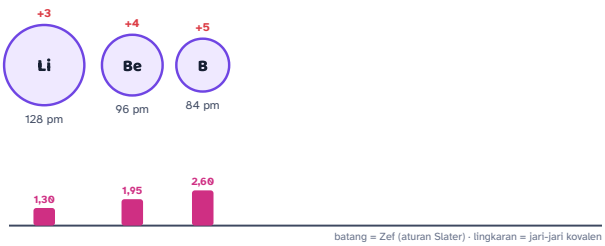
Bahasa sederhana · Bayangkan inti atom sebagai magnet kecil yang menarik butiran besi (elektron). Bila magnetnya makin kuat sementara butirannya tetap di "lantai" yang sama, butiran ditarik makin dekat dan atom menjadi makin kecil. Bila ada lantai baru di luar, atom menjadi lebih besar.

ATURAN · TREN JARI-JARI ATOM

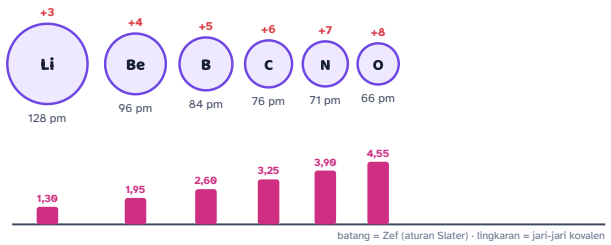
- **Dalam satu golongan, dari atas ke bawah, jari-jari membesar.** Setiap periode menambah satu kulit elektron, sedangkan Z_{ef} elektron terluar hampir tetap.
- **Dalam satu periode, dari kiri ke kanan, jari-jari mengecil.** Proton bertambah satu demi satu, tetapi elektron baru masuk ke kulit yang sama sehingga perisainya hampir tidak bertambah. Z_{ef} naik dan elektron ditarik lebih dekat.



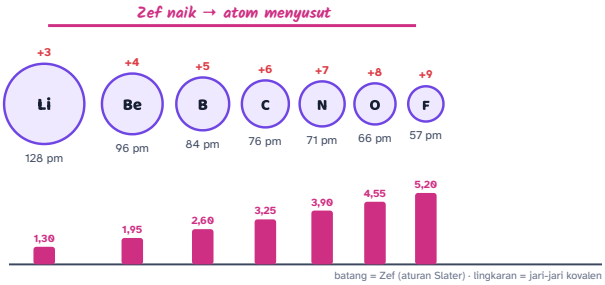
Langkah 1. Litium: 3 proton. Dua elektron di kulit pertama menjadi perisai, sehingga elektron valensinya hanya merasakan $Z_{ef} \approx 1{,}3$ (aturan Slater). Jari-jari kovalennya 128 pm.



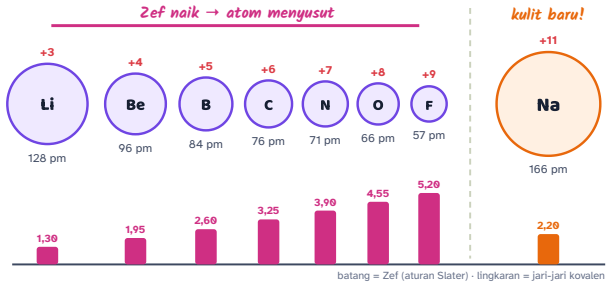
Langkah 2. Berilium dan boron: setiap langkah menambah 1 proton, tetapi elektron baru masuk ke kulit yang sama ($n = 2$). Elektron sekulit hampir tidak saling melindungi, jadi Z_{ef} naik ±0,65 setiap langkah.



Langkah 3. Karbon, nitrogen, oksigen: tarikan makin kuat, awan elektron ditarik makin ke dalam. Atom terus menyusut walaupun elektronnya bertambah!



Langkah 4. Fluorin: 9 proton, $Z_{ef} \approx 5{,}2$. Jari-jarinya hanya 57 pm, kurang dari separuh litium. Inilah jawaban Tebak Dulu di awal bab.



Langkah 5. Natrium ($Z = 11$) memulai kulit baru $n = 3$ yang jauh dari inti dan terperisai 10 elektron. Z_{ef} turun ke ±2,2 dan atomnya melompat menjadi 166 pm.

Jari-jari kovalen (pm), buku data Cordero dkk. (2008), dibulatkan

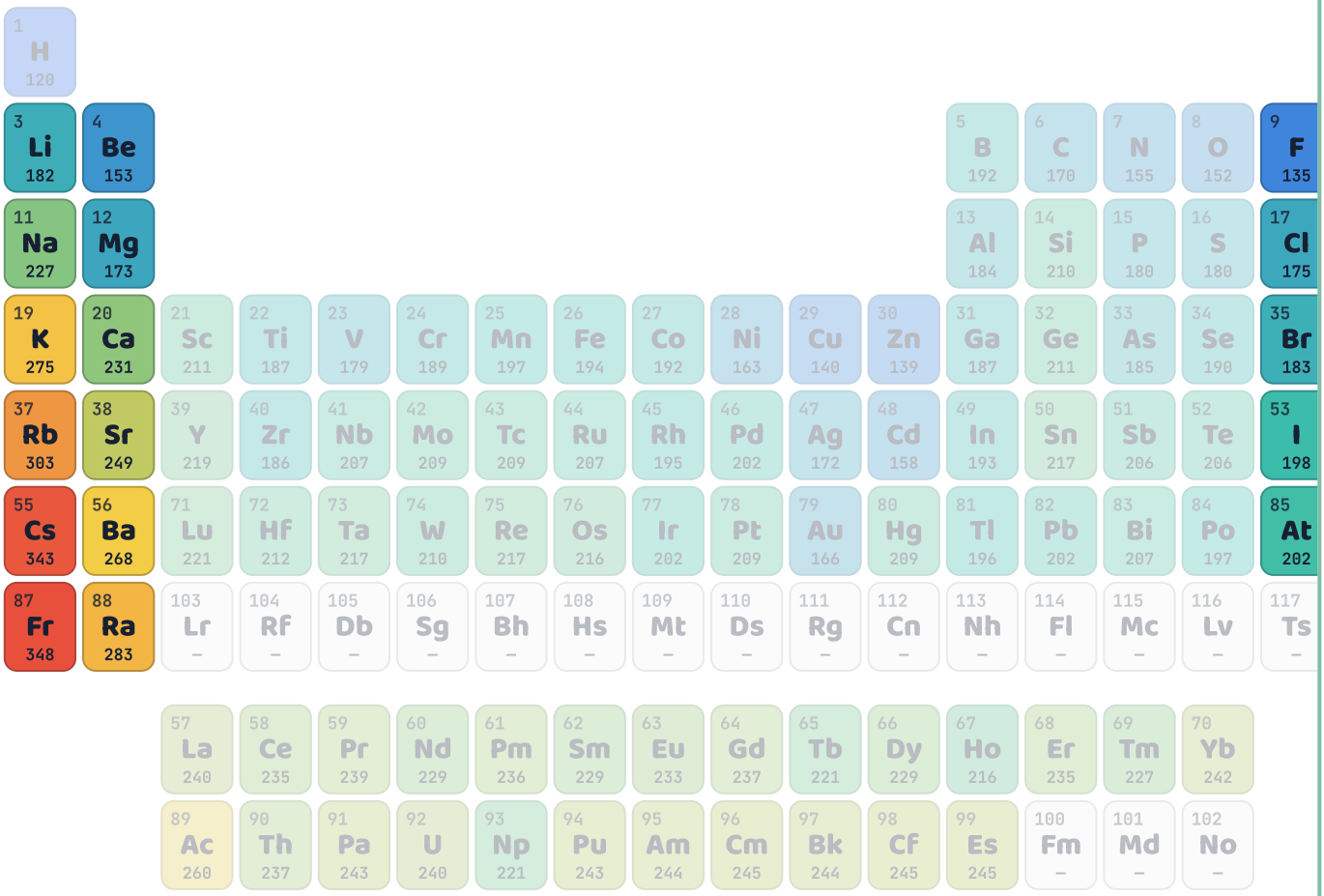
Periode	Gol. 1	Gol. 2	Gol. 13	Gol. 14	Gol. 15	Gol. 16	Gol. 17
2	Li 128	Be 96	B 84	C 76	N 71	O 66	F 57
3	Na 166	Mg 141	Al 121	Si 111	P 107	S 105	Cl 102

Ke bawah golongan, pola membesar sangat jelas. Golongan 1: Li 128 → Na 166 → K 203 → Rb 220 → Cs 244 pm. Golongan 17: F 57 → Cl 102 → Br 120 → I 139 pm (semuanya jari-jari kovalen). Gas mulia hampir tidak membentuk ikatan kovalen, sehingga jari-jari kovalennya biasanya tidak dicantumkan.

TABEL PERIODIK HIDUP

Jari-jari menurut golongan

Warnai menurut Jari-jari atom (van der Waals)



120 pm — 348 pm Jari-jari atom (van der Waals)

Unsur golongan 1, 2, 17, dan 18 disorot. Telusuri setiap golongan dari atas ke bawah: ke arah mana warnanya bergeser dari biru ke merah? Lalu ganti ke **Energi ionisasi pertama**: polanya terbalik! (Angka di sini adalah jari-jari van der Waals; baca catatan di bawah.)

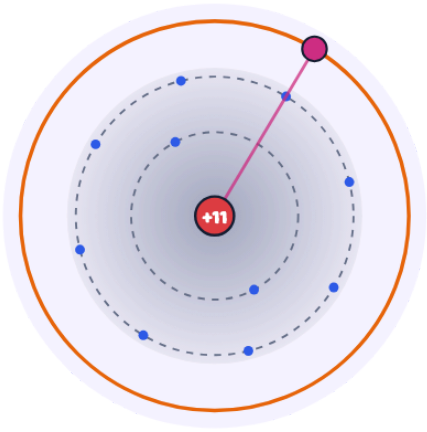
⚠ **AWAS JEBAKAN**

Jenis jari-jari yang berbeda memberi angka yang berbeda. Litium berjari-jari kovalen 128 pm, tetapi jari-jari van der Waals-nya 182 pm. Tabel Periodik Hidup memakai jari-jari van der Waals, yang trennya rapi ke bawah golongan tetapi tidak selalu rapi di sepanjang periode (misalnya B 192 pm lebih besar daripada Be 153 pm). Saat membandingkan unsur, pakai satu jenis jari-jari dari satu sumber data, dan sebutkan jenisnya.

LAB MINI

Tarik-menarik Inti: muatan inti efektif dan perisai

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-8



Natrium (Na) · elektron per kulit: 2, 8, 1

Tarikan inti pada elektron terluar

Proton di inti	+11
Perisai elektron dalam	- 10
Z efektif	**1**
Jarak elektron terluar	190 pm

Kuat tarikan ∝ Zef ÷ r²

Satu elektron sendirian di kulit baru, jauh dari inti dan terhalang perisai tebal. Mudah lepas: EI kecil!

perisai: aturan sederhana

Unsur	Perisai S	Z efektif	Jari-jari terhitung	EI pertama
Natrium (Na)	10	1	190 pm	496 kJ/mol

Mulai dari $Z = 3$ (litium), naikkan Z satu per satu sampai 10. Apa yang terjadi pada Z efektif, tebal tali magenta (kuat tarikan), dan ukuran atom? Lalu lompat ke $Z = 11$. Pilih **Bandingkan → unsur di bawahnya** untuk melihat mengapa atom membesar ke bawah golongan, dan **aturan Slater** untuk perisai yang lebih teliti. Ukuran atom memakai jari-jari terhitung dari model orbital (Clementi dkk., 1967); trennya sama dengan jari-jari kovalen.

Gabungan dua faktor (nomor kulit n dan Z_{ef}) bahkan bisa dipakai untuk memperkirakan ukuran atom. Model sederhana ala Bohr memberi jari-jari yang sebanding dengan n^2 dan berbanding terbalik dengan Z_{ef}.

RUMUS HIDUP

Perkiraan jari-jari atom (model ala Bohr)

$$r \approx 52{,}9\ \text{pm} \times \frac{n^2}{Z_{ef}}$$

Kulit yang lebih tinggi membuat atom membengkak, sedangkan muatan inti efektif yang besar menciutkannya.

- n — Kulit terluar (= nomor periode)
- Z_{ef} — Muatan inti efektif (aturan Slater)
- r — Jari-jari perkiraan pm

JARI-JARI PERKIRAAN

163

pm

≈ litium (jari-jari terhitung 167 pm)

Atom dengan kulit terluar n = **2** dan Zef = **1,3** berjari-jari kira-kira **163** pm.

Cek satuan: pm × (tanpa satuan) = pm ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-JARI-JARI-PERKIRAAN

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ATURAN SLATER: MENGHITUNG PERISAI DENGAN LEBIH TELITI

Aturan sederhana menganggap setiap elektron dalam melindungi penuh dan elektron sekulit tidak melindungi sama sekali. John Slater (1930) memberi aturan yang lebih realistis untuk elektron ns atau np:

- setiap elektron lain dalam kelompok (ns, np) yang sama menyumbang **0,35** (untuk 1s: 0,30);
- setiap elektron di kulit $n-1$ menyumbang **0,85**;
- setiap elektron di kulit $n-2$ atau lebih dalam menyumbang **1,00**.

Natrium (2, 8, 1): $S = 8(0{,}85) + 2(1{,}00) = 8{,}80$, jadi $Z_{ef} = 2{,}20$. Klorin (2, 8, 7): $S = 6(0{,}35) + 8(0{,}85) + 2(1{,}00) = 10{,}90$, jadi $Z_{ef} = 6{,}10$. Kalium (2, 8, 8, 1): $S = 8(0{,}85) + 10(1{,}00) = 16{,}8$, jadi $Z_{ef} = 2{,}20$, sama dengan natrium. Bedanya, elektron valensi kalium berada di kulit keempat yang jauh lebih jauh. Itulah sebabnya kalium lebih besar dan lebih mudah kehilangan elektron.

Bagaimana dengan ion? Ketika atom melepas atau menerima elektron, ukurannya berubah drastis.

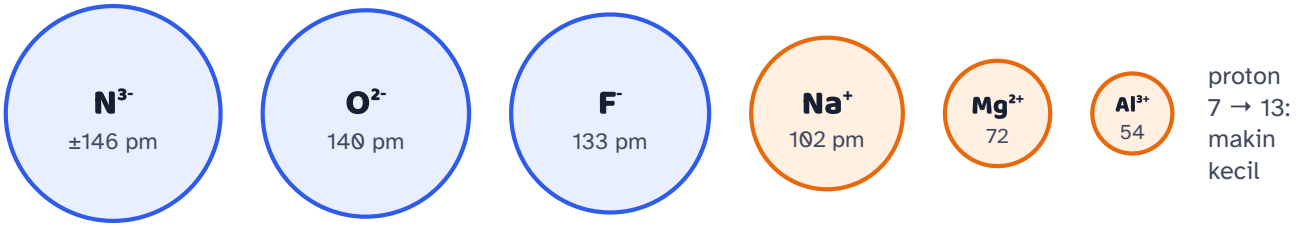
ATURAN · JARI-JARI ION

- **Kation lebih kecil daripada atomnya.** Saat natrium melepas satu elektron menjadi $\mathrm{Na^+}$, seluruh kulit ketiga hilang. Sisa 10 elektron ditarik oleh 11 proton, sehingga ion menyusut dari 166 pm (kovalen) menjadi 102 pm.
- **Anion lebih besar daripada atomnya.** Saat klorin menerima satu elektron menjadi $\mathrm{Cl^-}$, 18 elektron ditarik oleh 17 proton yang sama dan saling tolak lebih kuat. Awan elektron mengembang dari ±100 pm menjadi 181 pm.
- **Spesi isoelektronik** (jumlah elektronnya sama) makin kecil bila jumlah protonnya makin banyak.

Atom → ion: kation menyusut, anion mengembang



Deret isoelektronik: semuanya 10 elektron, seperti neon



Jari-jari ion (Shannon, bilangan koordinasi 6; $\mathrm{N^{3-}}$ bilangan koordinasi 4) dibandingkan dengan jari-jari kovalen atomnya. Skala gambar sama untuk semua lingkaran.

KERJAKAN BERSAMA **Natrium vs klorin: sekulit, beda ukuran**

Natrium (2, 8, 1) dan klorin (2, 8, 7) sama-sama berada di periode 3. Hitung Z_{ef} elektron valensi keduanya dengan aturan sederhana, lalu jelaskan mengapa jari-jari kovalen Na (166 pm) jauh lebih besar daripada Cl (102 pm).

1. Keduanya punya 10 elektron di kulit dalam (2 + 8), jadi $S = 10$.
2. Na: $Z_{ef} = 11 - 10 = 1$. Cl: $Z_{ef} = 17 - 10 = 7$.
3. Elektron valensi keduanya berada di kulit yang sama ($n = 3$), tetapi elektron klorin ditarik dengan muatan bersih tujuh kali lebih besar.

Z_{ef} Na = 1, Cl = 7. Tarikan yang jauh lebih kuat menciutkan awan elektron klorin, sehingga atom Cl lebih kecil. (Aturan Slater memberi 2,20 dan 6,10: angkanya berbeda, tetapi kesimpulannya sama.)

8.4 Energi ionisasi dan afinitas elektron

Saat bereaksi, banyak atom harus melepas elektron. Seberapa sulit melepasnya? Ukurannya adalah energi ionisasi.

DEFINISI · ENERGI IONISASI PERTAMA

Energi ionisasi pertama (EI_1) adalah energi minimum untuk melepas satu elektron terluar dari setiap atom dalam satu mol atom berwujud gas:

$$\mathrm{X(g)} \longrightarrow \mathrm{X^+(g)} + \mathrm{e^-} \qquad \Delta H = \mathrm{EI_1} > 0$$

Satuannya kJ/mol. Tabel data fisika sering memakai elektronvolt per atom: 1 eV/atom = 96,485 kJ/mol.

Bahasa sederhana · Energi ionisasi itu seperti "harga" untuk mencabut satu elektron dari atom. Atom yang memegang elektronnya erat-erat (seperti fluorin dan neon) memasang harga mahal. Atom yang elektron terluarnya longgar (seperti natrium dan kalium) memasang harga murah, sehingga mudah bereaksi.

Tebak Dulu!

Dari nitrogen ($Z = 7$) ke oksigen ($Z = 8$), jumlah proton bertambah satu dan atomnya mengecil. Bagaimana energi ionisasi pertamanya?

Naik, karena muatan inti oksigen lebih besar.

Naik dua kali lipat, karena oksigen sangat elektronegatif.

Turun sedikit, dari 1.402 menjadi 1.314 kJ/mol.

Tidak berubah, karena keduanya di periode yang sama.

Jawabannya: turun sedikit. Elektron 2p keempat pada oksigen harus berbagi orbital dengan elektron lain. Dua elektron dalam satu orbital saling tolak, sehingga salah satunya lebih mudah dilepas. Anomali kecil ini (dan pasangannya, Be → B) membuat grafik energi ionisasi berbentuk gigi gergaji. Lihat grafiknya di bawah dan penjelasan lengkapnya di subbab 8.6.

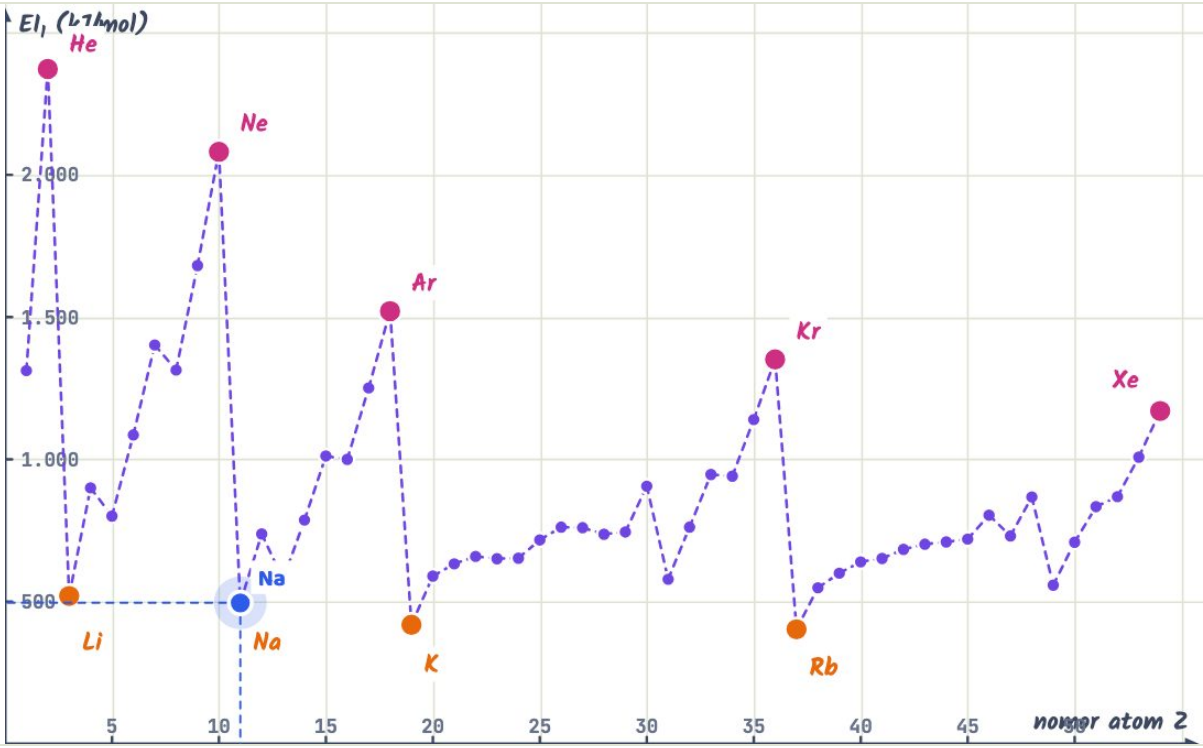
GRAFIK HIDUP

Gigi gergaji energi ionisasi pertama (Z = 1–54)

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-8

$$\mathrm{EI}_1 : \ \mathrm{X(g)} \longrightarrow \mathrm{X^+(g)} + \mathrm{e^-}$$

$$Z = 11\ (\mathrm{Na}) : \quad \mathrm{EI}_1 = 496\ \mathrm{kJ/mol}$$



lembah: logam alkali, satu elektron di kulit baru

unsur	EI_1	selisih dengan unsur sebelumnya
Na (Z = 11)	496 kJ/mol	-1.585 kJ/mol

Seret titik biru sepanjang nomor atom. Puncak magenta adalah gas mulia, lembah jingga adalah logam alkali. Perhatikan juga "gigi" kecil yang turun dari Be ke B dan dari N ke O; tag di atas grafik menjelaskannya.

ATURAN · TREN ENERGI IONISASI PERTAMA

- **Dalam satu periode, dari kiri ke kanan, EI umumnya naik**, karena Z_{ef} naik dan atom mengecil.
- **Dalam satu golongan, dari atas ke bawah, EI turun**, karena elektron terluar makin jauh dari inti dan makin terperisai.
- Ada dua "gigi" kecil di setiap periode: dari golongan 2 ke 13 dan dari golongan 15 ke 16 (subbab 8.6).

Atom juga bisa kehilangan elektron kedua, ketiga, dan seterusnya. **Energi ionisasi berturutan** selalu naik, dan melonjak tajam begitu elektron mulai diambil dari kulit dalam (ingat Bab 7). Magnesium: 738 → 1.451 → **7.733** kJ/mol. Lonjakan setelah elektron kedua menunjukkan bahwa magnesium punya 2 elektron valensi, sehingga membentuk ion Mg^{2+}, bukan Mg^{3+}.

Kebalikan melepas elektron adalah menerima elektron.

DEFINISI · AFINITAS ELEKTRON

Afinitas elektron pertama adalah perubahan energi ketika satu mol atom berwujud gas masing-masing menerima satu elektron:

$$\mathrm{X(g)} + \mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{X^-(g)}$$

Untuk kebanyakan nonlogam, energi dilepaskan sehingga ΔH bernilai negatif. Makin negatif nilainya, makin "senang" atom itu menerima elektron.

Unsur	F	Cl	Br	I	O	S
Afinitas elektron pertama (kJ/mol)	−328	**−349**	−325	−295	−141	−200

Afinitas elektron umumnya makin negatif ke kanan dan makin kurang negatif ke bawah. Tetapi juaranya klorin, bukan fluorin! Atom fluorin sangat kecil, sehingga elektron yang datang berdesakan dengan tujuh elektron lain di kulit kedua yang sempit dan mengalami tolakan besar. Hal yang sama membuat afinitas elektron oksigen kurang negatif daripada belerang.

AWAS JEBAKAN

Afinitas elektron klorin boleh ditulis −349 kJ/mol atau +3,6 eV; keduanya benar, hanya berbeda konvensi tanda. Buku SMA, IB, dan Cambridge menuliskannya sebagai perubahan entalpi (negatif bila energi dilepaskan), sedangkan banyak tabel data fisika, termasuk mode Afinitas elektron di Tabel Periodik Hidup, menuliskan energi yang dilepaskan sebagai angka positif. Selalu baca definisinya dulu. Gas mulia, Be, Mg, dan N tidak membentuk anion yang stabil, sehingga afinitas elektronnya positif atau hampir nol.

COBA SENDIRI **Membaca gigi gergaji periode 3**

Energi ionisasi pertama (kJ/mol) unsur periode 3 berturut-turut: Na 496, Mg 738, Al 578, Si 787, P 1.012, S 1.000, Cl 1.251, Ar 1.521. Tentukan dua pasangan yang melawan tren umum, lalu jelaskan masing-masing dengan konfigurasi elektron.

1. Tren umum: EI naik dari Na ke Ar karena Z_{ef} naik. Pasangan yang turun: **Mg → Al** (738 → 578) dan **P → S** (1.012 → 1.000).

2. Mg $[\mathrm{Ne}]\,3s^2$, Al $[\mathrm{Ne}]\,3s^2\,3p^1$: elektron yang dilepas dari Al berada di subkulit 3p yang energinya lebih tinggi dan sebagian terperisai oleh pasangan 3s.

3. P $[\mathrm{Ne}]\,3s^2\,3p^3$ (tiga elektron 3p tidak berpasangan), S $[\mathrm{Ne}]\,3s^2\,3p^4$: satu orbital 3p pada S berisi dua elektron yang saling tolak, sehingga salah satunya lebih mudah lepas.

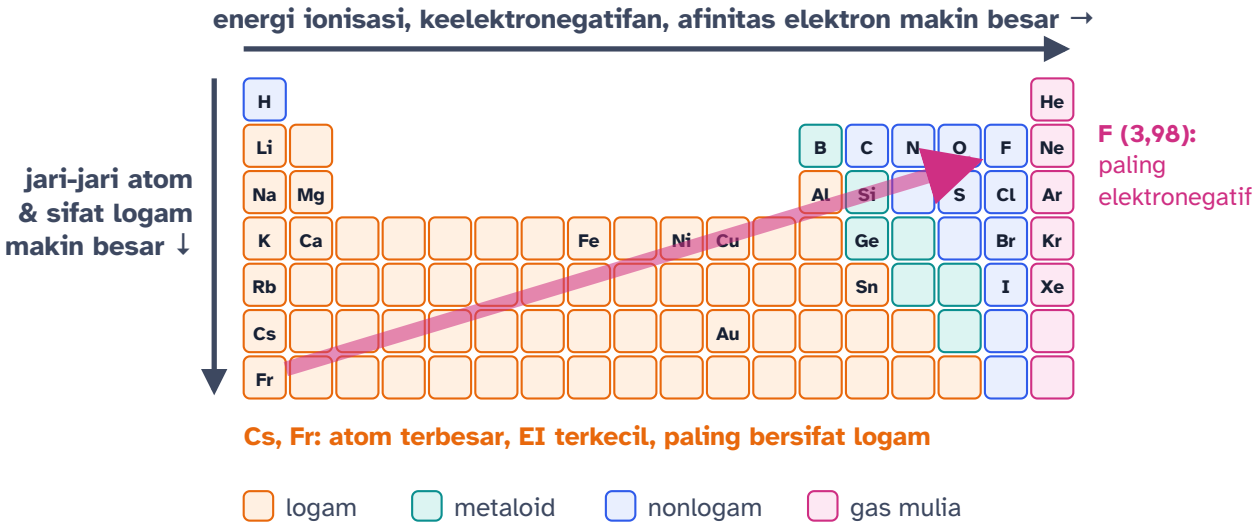
Anomalinya Mg → Al (elektron 3p lebih mudah dilepas daripada 3s) dan P → S (tolakan pasangan elektron di 3p). Pola yang sama persis muncul di periode 2: Be → B dan N → O.

8.5 Keelektronegatifan, sifat logam, dan reaktivitas golongan

Energi ionisasi dan afinitas elektron diukur pada atom tunggal yang melayang di fase gas. Di dunia nyata, atom biasanya berikatan dan "berebut" elektron dengan atom lain. Untuk itu dipakai besaran ketiga.

DEFINISI · KEELEKTRONEGATIFAN

Keelektronegatifan adalah kemampuan sebuah atom dalam ikatan kimia untuk menarik pasangan elektron ikatan ke arah dirinya. Skala yang paling umum dibuat Linus Pauling (1932) dan tidak bersatuan: fluorin paling elektronegatif (3,98), disusul oksigen (3,44) dan klorin (3,16); sesium (0,79) termasuk yang paling rendah.



Peta tren dalam satu gambar (lantanida dan aktinida tidak digambar). Panah magenta dari Fr ke F menunjukkan arah tarikan inti yang makin kuat terhadap elektron.

TRIK KAK TIRTA

Ingat dua sudut saja. **Kiri-bawah** (Cs, Fr) adalah atom yang "gendut dan dermawan": jari-jari terbesar, EI terkecil, keelektronegatifan terendah, paling bersifat logam. **Kanan-atas** (F, kecuali gas mulia) adalah atom yang "mungil dan pelit": jari-jari kecil, EI besar, paling elektronegatif. Semua tren lain tinggal mengikuti arah panah dari Fr ke F. Jari-jari dan sifat logam berjalan berlawanan arah dengan tiga besaran lainnya.

TABEL PERIODIK HIDUP

Tren sifat periodik unsur golongan utama

Warnai menurut Keelektronegatifan (Pauling)

1 H 2,2																	2 He
3 Li 0,98	4 Be 1,57											5 B 2,04	6 C 2,55	7 N 3,04	8 O 3,44	9 F 3,98	10 Ne
11 Na 0,93	12 Mg 1,31											13 Al 1,61	14 Si 1,9	15 P 2,19	16 S 2,58	17 Cl 3,16	18 Ar
19 K 0,82	20 Ca 1	21 Sc 1,36	22 Ti 1,54	23 V 1,63	24 Cr 1,66	25 Mn 1,55	26 Fe 1,83	27 Co 1,88	28 Ni 1,91	29 Cu 1,9	30 Zn 1,65	31 Ga 1,81	32 Ge 2,01	33 As 2,18	34 Se 2,55	35 Br 2,96	36 Kr
37 Rb 0,82	38 Sr 0,95	39 Y 1,22	40 Zr 1,33	41 Nb 1,6	42 Mo 2,16	43 Tc 1,9	44 Ru 2,2	45 Rh 2,28	46 Pd 2,2	47 Ag 1,93	48 Cd 1,69	49 In 1,78	50 Sn 1,96	51 Sb 2,05	52 Te 2,1	53 I 2,66	54 Xe
55 Cs 0,79	56 Ba 0,89	71 Lu 1,27	72 Hf 1,3	73 Ta 1,5	74 W 2,36	75 Re 1,9	76 Os 2,2	77 Ir 2,2	78 Pt 2,28	79 Au 2,54	80 Hg 2	81 Tl 1,62	82 Pb 2,33	83 Bi 2,02	84 Po 2	85 At 2,2	86 Rn



Mulai dari **Keelektronegatifan**: di mana warna paling merah? Mengapa kotak He, Ne, dan Ar abu-abu? Ganti ke **Energi ionisasi pertama** dan **Afinitas elektron**, lalu bandingkan dengan peta tren di atas. Titik leleh tidak mengikuti satu arah sederhana: carilah unsur blok p dengan titik leleh tertinggi.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Keelektronegatifan tidak sama dengan afinitas elektron. Afinitas elektron diukur pada atom tunggal berwujud gas dan bersatuan energi. Keelektronegatifan menggambarkan tarikan atom terhadap elektron yang sedang dipakai bersama dalam ikatan dan tidak bersatuan.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

SKALA MULLIKEN: KEELEKTRONEGATIFAN DARI DUA BESARAN YANG TERUKUR

Robert Mulliken (1934) mengusulkan keelektronegatifan sebagai rata-rata energi ionisasi dan afinitas elektron (energi yang dilepaskan): $\chi_M \propto \frac{1}{2}(\mathrm{EI}_1 + |\mathrm{AE}|)$. Masuk akal: atom yang sulit melepas elektron *dan* senang menerima elektron pasti kuat menarik elektron ikatan. Untuk klorin, $\frac{1}{2}(1.251 + 349) = 800$ kJ/mol; untuk natrium, $\frac{1}{2}(496 + 53) \approx 275$ kJ/mol. Setelah disesuaikan satuannya, skala Mulliken sejalan dengan skala Pauling.

Sifat logam adalah kecenderungan atom melepas elektron membentuk ion positif. Makin kecil EI, makin kuat sifat logamnya. Jadi sifat logam bertambah ke bawah dan ke kiri. Di periode 3: Na, Mg, dan Al logam; Si metaloid; P, S, dan Cl nonlogam. Di golongan 14: C nonlogam, Si dan Ge metaloid, Sn dan Pb logam.

Logam alkali bereaksi dengan air membentuk basa kuat dan gas hidrogen:

$$2\,\mathrm{Na\,(s)} + 2\,\mathrm{H_2O\,(l)} \longrightarrow 2\,\mathrm{NaOH\,(aq)} + \mathrm{H_2\,(g)}$$

Logam	Pengamatan saat dimasukkan ke air	EI_1 (kJ/mol)
Litium	mengapung, bergelembung pelan dan tenang	520

Natrium	meleleh menjadi bola perak, meluncur di permukaan air sambil mendesis	496
Kalium	langsung menyala ungu muda (lila) dan meluncur cepat	419
Rubidium, sesium	meledak hebat begitu menyentuh air	403; 376

Ke bawah golongan 1, elektron valensi makin jauh dari inti dan makin terperisai, sehingga makin mudah lepas (EI turun). Bereaksi dengan air pada dasarnya berarti "membuang" elektron itu, jadi **reaktivitas logam alkali naik dari atas ke bawah**.

⚠ **KESELAMATAN**

Logam alkali hanya boleh didemonstrasikan oleh guru, dalam potongan sebesar butir beras, di balik layar pelindung. Natrium dan kalium disimpan di dalam minyak parafin karena bereaksi dengan uap air dan oksigen udara. Jangan pernah mencobanya di rumah: gas hidrogen yang terbentuk mudah menyala dan larutan basanya korosif.



Mudah menyala



Korosif

Tebak Dulu!

Logam alkali makin reaktif dari atas ke bawah. Bagaimana dengan halogen (F, Cl, Br, I)?

- Sama: makin ke bawah makin reaktif, karena satu golongan pasti punya pola yang sama.
- Kebalikannya: makin ke bawah makin kurang reaktif.
- Semua halogen sama reaktifnya karena sama-sama punya 7 elektron valensi.
- Tidak ada pola sama sekali.

Jawabannya: makin ke bawah makin kurang reaktif. Halogen bereaksi dengan *menerima* elektron, bukan melepasnya. Atom yang kecil (F) menarik elektron tambahan paling kuat karena elektron itu bisa mendekat ke inti. Makin ke bawah, atom membesar dan tarikannya melemah. Arah tren reaktivitas bergantung pada cara unsur bereaksi!

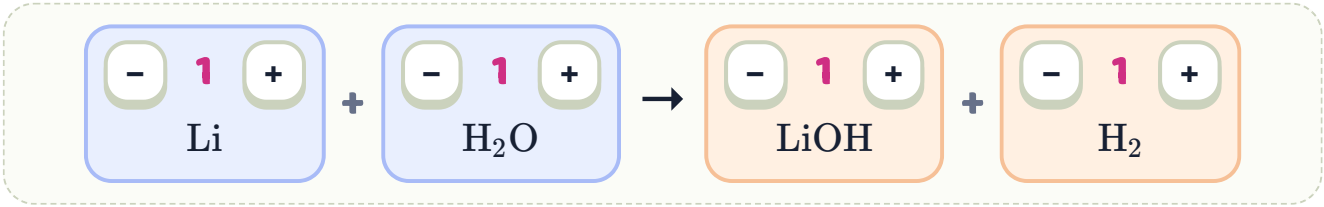
Halogen	Wujud dan warna (25 °C)	Keelektronegatifan	Reaktivitas
Fluorin, F_2	gas kuning pucat	3,98	paling reaktif
Klorin, Cl_2	gas kuning-hijau	3,16	makin lemah ↓
Brom, Br_2	cairan merah-cokelat	2,96	
Iodin, I_2	padatan hitam keabu-abuan, uapnya ungu	2,66	paling lemah

Buktinya adalah **reaksi pendesakan**: halogen yang lebih reaktif mengusir halogen yang kurang reaktif dari larutan garamnya (semua zat berikut dalam larutan air).

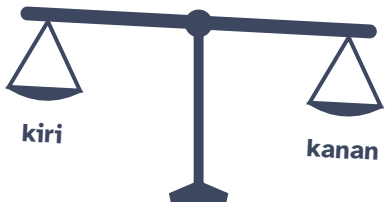
- $Cl_2 + 2\,KBr \longrightarrow 2\,KCl + Br_2$: larutan tak berwarna menjadi jingga.
- $Cl_2 + 2\,KI \longrightarrow 2\,KCl + I_2$: larutan menjadi cokelat.
- $Br_2 + 2\,KI \longrightarrow 2\,KBr + I_2$: larutan menjadi cokelat.
- Sebaliknya, iodin tidak dapat mendesak ion bromida atau klorida.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi keluarga golongan 1, 2, dan 17



Unsur	Kiri	Kanan	
Li	1 ●	1 ●	✓
H	2 ○○	3 ○○○	✗
O	1 ●	1 ●	✓



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

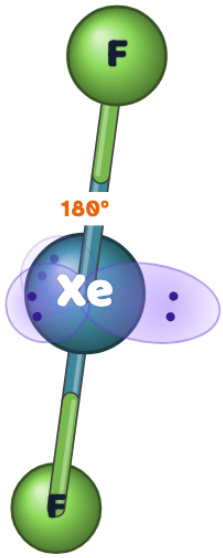
Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Persamaan pertama dan kedua mirip sekali, karena Li dan K segolongan. Setelah menyetarakan persamaan ketiga, coba tebak rumus hasil reaksi kalium dengan brom tanpa menghitung.

Bagaimana dengan gas mulia di golongan 18? Kulit terluarnya penuh, EI-nya tertinggi di setiap periode, dan atomnya hampir tidak berminat menerima elektron. Karena itu gas mulia lama dianggap tidak bisa bereaksi sama sekali. Tetapi pada 1962, **Neil Bartlett** berhasil membuat senyawa xenon pertama, disusul $\mathrm{XeF_2}$, $\mathrm{XeF_4}$, dan $\mathrm{XeF_6}$. Atom xenon cukup besar sehingga EI-nya relatif rendah (1.170 kJ/mol), dan fluorin yang sangat elektronegatif mampu menarik elektronnya untuk berikatan.

MOLEKUL 3D

Gas mulia yang mau bereaksi: senyawa xenon



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Xenon difluorida $\mathrm{XeF_2}$

Mr ≈ 169,29

AX2E3 · linear

Tiga pasangan elektron bebas di ekuator, dua F di sumbu → linear. Bukti gas mulia bisa bereaksi!

Putar molekulnya. Xenon dikelilingi atom fluorin dan masih menyimpan pasangan elektron bebas (tiga pada $\mathrm{XeF_2}$, dua pada $\mathrm{XeF_4}$). Ketuk tiga atom untuk mengukur sudut F–Xe–F. Bentuk molekul seperti ini dibahas di Bab 12.

MITOS

"Atom dengan lebih banyak elektron selalu lebih besar."

FAKTA

Fluorin (9 elektron) jauh lebih kecil daripada litium (3 elektron). Sepanjang periode, proton bertambah dan elektron masuk ke kulit yang sama, sehingga tarikan inti makin kuat dan atom menyusut.

MITOS

"Unsur segolongan sifatnya persis sama."

FAKTA

Mirip, bukan sama. Litium bereaksi tenang dengan air, sedangkan sesium meledak. Dalam satu golongan, sifat berubah bertahap mengikuti jari-jari dan energi ionisasi.

MITOS

"Gas mulia sama sekali tidak bisa bereaksi."

FAKTA

Sejak 1962 kimiawan membuat senyawa xenon, misalnya $\mathrm{XeF_2}$ dan $\mathrm{XeF_4}$, juga beberapa senyawa kripton. Helium dan neon memang praktis tidak membentuk senyawa yang stabil.

MITOS

"Tabel periodik sudah selesai."

FAKTA

Periode 7 lengkap sejak 2016 (118 unsur), tetapi laboratorium di beberapa negara masih berburu unsur 119 dan 120 untuk membuka periode 8.

COBA SENDIRI **Meramal sifat sesium**

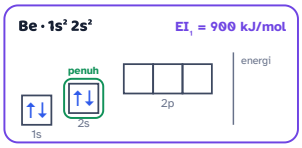
Data golongan 1: Li (titik leleh 181 °C; EI_1 520 kJ/mol), Na (98 °C; 496), K (63 °C; 419), Rb (39 °C; 403). Ramalkan untuk sesium (Cs), unsur di bawah rubidium: (a) titik lelehnya, (b) EI_1-nya, (c) rumus kloridanya, (d) reaksinya dengan air.

1. (a) Titik leleh turun setiap periode, makin lama makin sedikit (−83, −35, −24 °C). Tebakan wajar untuk Cs: sekitar 25–30 °C.
2. (b) EI_1 turun karena atom makin besar: sedikit di bawah 403, misalnya ±380 kJ/mol.
3. (c) Golongan 1 membentuk ion $\mathrm{M^+}$, jadi kloridanya CsCl.
4. (d) Elektron valensinya paling mudah lepas, jadi reaksinya dengan air paling hebat (eksplosif): $\mathrm{2\,Cs + 2\,H_2O \longrightarrow 2\,CsOH + H_2}$.

Data sebenarnya: Cs meleleh pada 28,4 °C (bisa mencair di siang hari yang terik!), EI_1 376 kJ/mol, membentuk CsCl, dan meledak di air. Ramalan dari pola golongan ternyata sangat dekat.

8.6 Lanjut: anomali, hubungan diagonal, dan kontraksi lantanida

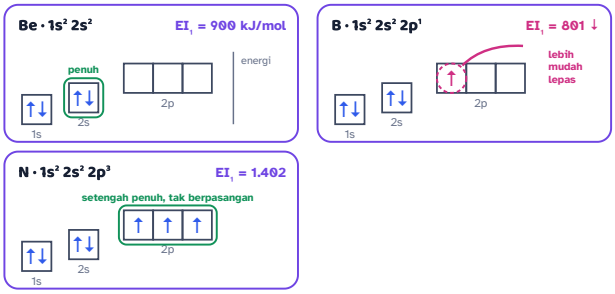
Pola periodik tidak berupa garis mulus. "Penyimpangan" kecil justru menjadi bukti terkuat bahwa subkulit dan orbital (Bab 7) memang ada. Mari kita bongkar dua gigi kecil pada grafik energi ionisasi.



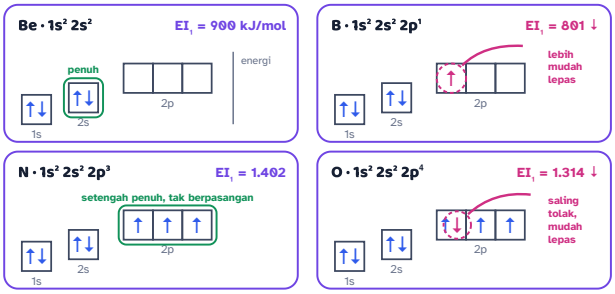
Langkah 1. Berilium: $1s^2\,2s^2$. Elektron yang dilepas berasal dari subkulit 2s yang sudah penuh dan cukup dekat ke inti. EI_1 = 900 kJ/mol.



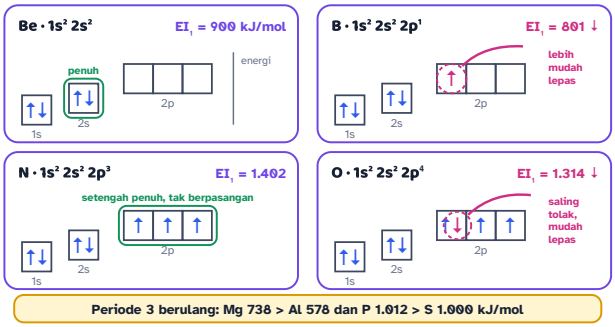
Langkah 2. Boron: elektron kelima masuk ke 2p, yang energinya lebih tinggi dan sebagian terperisai oleh pasangan 2s. Elektron itu lebih mudah dilepas: EI_1 turun menjadi 801 kJ/mol walaupun protonnya bertambah.



Langkah 3. Nitrogen: tiga elektron 2p menempati tiga orbital, sendiri-sendiri (aturan Hund). Tidak ada tolakan pasangan di subkulit 2p: EI_1 = 1.402 kJ/mol.



Langkah 4. Oksigen: elektron 2p keempat harus berbagi orbital. Dua elektron dalam satu orbital saling tolak, sehingga salah satunya lebih mudah lepas: EI_1 turun menjadi 1.314 kJ/mol.



Langkah 5. Kedua "gigi" itu muncul lagi di periode 3 (Mg → Al dan P → S). Bukti bahwa subkulit dan orbital benar-benar ada!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUBUNGAN DIAGONAL: LITIUM LEBIH MIRIP MAGNESIUM

Beberapa unsur periode 2 lebih mirip tetangga diagonalnya di periode 3 daripada saudara segolongannya sendiri. Litium, misalnya, mirip magnesium: keduanya bereaksi langsung dengan nitrogen udara ($6\,\mathrm{Li} + \mathrm{N_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{Li_3N}$; $3\,\mathrm{Mg} + \mathrm{N_2} \longrightarrow \mathrm{Mg_3N_2}$), karbonatnya terurai bila dipanaskan ($\mathrm{Li_2CO_3} \longrightarrow \mathrm{Li_2O} + \mathrm{CO_2}$), dan fluoridanya sukar larut. Pasangan serupa: **berilium–aluminium** (oksida dan hidroksidanya amfoter) serta **boron–silikon** (metaloid yang oksidanya bersifat asam).

Penyebabnya: bergeser ke kanan membuat atom dan ion mengecil, sedangkan turun satu periode membuatnya membesar. Bergerak diagonal, kedua efek hampir saling meniadakan. Ion $\mathrm{Li^+}$ (76 pm) dan $\mathrm{Mg^{2+}}$ (72 pm) berukuran hampir sama, sama-sama kecil, dan kuat menarik awan elektron anion di dekatnya. Keelektronegatifan Be–Al (1,57 dan 1,61) serta B–Si (2,04 dan 1,90) pun hampir sama.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KONTRAKSI LANTANIDA: MENGAPA HAFNIUM "KEMBARAN" ZIRKONIUM

Dari zirkonium (periode 5) ke hafnium (periode 6), kita berharap atom membesar karena bertambah satu kulit. Kenyataannya ukuran keduanya hampir sama: jari-jari ion $\mathrm{Zr^{4+}}$ 72 pm dan $\mathrm{Hf^{4+}}$ 71 pm. Penyebabnya, di antara La dan Hf terselip 14 unsur lantanida yang mengisi subkulit 4f. Elektron f memberi perisai yang buruk, sehingga Z_{ef} naik banyak dan menyusutkan atom-atom sesudahnya. Gejala ini disebut **kontraksi lantanida**.

Akibatnya, Zr dan Hf selalu ditemukan bersama dan sangat sulit dipisahkan. Hafnium baru ditemukan pada 1923, tersembunyi di dalam bijih zirkonium. Kontraksi lantanida (ditambah efek relativistik pada elektron yang bergerak sangat cepat di dekat inti yang besar) juga membuat atom emas hampir sama besar dengan perak, warnanya kuning, dan raksa berwujud cair pada suhu kamar.

Kimia di sekitarmu

Nikel untuk baterai

Nikel dari Sulawesi dan Maluku Utara (golongan 10) diolah menjadi bahan katoda baterai kendaraan listrik, bersama kobalt dan mangan, tetangganya di blok d.

Timah Bangka

Timah (golongan 14, sekeluarga dengan karbon dan silikon) dipakai sebagai solder pada papan elektronik HP dan pelapis kaleng makanan.

Garam beryodium

Iodin (halogen, golongan 17) ditambahkan ke garam konsumsi dalam bentuk kalium iodat untuk mencegah gondok.

Klorin di air PDAM

Klorin yang sangat elektronegatif mudah merebut elektron (mengoksidasi) bagian penting sel kuman. Karena itu PDAM memakai klorin atau kaporit sebagai disinfektan.

Lampu reklame

Gas mulia neon menyala merah-jingga saat dialiri listrik. Argon mengisi bohlam pijar agar filamen wolfram tidak terbakar.

Panel surya

Silikon, metaloid yang dimurnikan dari pasir kuarsa, menjadi semikonduktor di panel surya PLTS dan cip HP.

Cek Cepat

Unsur dengan konfigurasi elektron 2, 8, 2 terletak di ...

- periode 3, golongan 2
- periode 2, golongan 8
- periode 2, golongan 2
- periode 3, golongan 8

Manakah atom yang paling kecil?

- Na
- Mg
- Cl
- K

Atom manakah yang paling mudah melepas elektron (energi ionisasi pertamanya paling kecil)?

F

He

Li

Cs

Kunci Cek Cepat: 1. A · 2. C · 3. D

Tantangan Rumah: tabel periodik keluarga dapur

Bahan: sendok baja tahan karat, kertas aluminium foil, panci atau wajan aluminium, paku besi, koin, potongan kabel tembaga bekas (tidak tersambung listrik), arang, isi pensil (grafit), kotak korek api (jangan dinyalakan), garam, gula, kertas besar, dan spidol.

1. Kumpulkan benda-benda di atas dan tuliskan unsur utama penyusunnya, misalnya aluminium foil → Al, kabel → Cu, arang dan isi pensil → C. Kepala korek api mengandung belerang (S), sedangkan bidang gesek kotaknya mengandung fosforus merah (P).
2. Amati kilapnya, lalu ketuk perlahan dengan sendok: logam berdenting, arang terdengar "tuk" dan mudah patah.
3. Coba tekuk aluminium foil dan isi pensil: mana yang lentur dan mana yang rapuh?
4. Gambar kerangka tabel periodik di kertas besar. Tempelkan atau tulis setiap benda di kotak unsurnya, beri warna berbeda untuk logam dan nonlogam.
5. Garam dan gula jangan ditempel di satu kotak: keduanya senyawa, bukan unsur. Tulis unsur penyusunnya (garam: Na dan Cl; gula: C, H, O) dan beri panah ke kotak masing-masing.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Jangan menyalakan korek api, jangan memakai kabel yang masih tersambung ke listrik, dan jangan membongkar baterai. Hati-hati dengan ujung paku dan kabel yang tajam. Jangan mencicipi apa pun, dan cuci tangan setelah memegang arang, koin, dan isi pensil.

Pertanyaan: Di bagian tabel mana sebagian besar benda dapurmu berkumpul? Mengapa peralatan masak hampir selalu dibuat dari unsur di sebelah kiri garis tangga?

RINGKASAN KILAT **Bab 8 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menceritakan perjalanan tabel periodik dari **triade Döbereiner**, **oktaf Newlands**, dan **ramalan Mendeleev** sampai **hukum periodik modern** Moseley

- menentukan **periode, golongan, dan blok** suatu unsur dari konfigurasi elektronnya, serta mengelompokkan logam, nonlogam, dan metaloid
- menjelaskan tren **jari-jari atom dan ion** memakai **muatan inti efektif** dan **efek perisai**
- membandingkan **energi ionisasi**, **afinitas elektron**, dan **keelektronegatifan**, termasuk anomali Be–B dan N–O
- meramalkan sifat dan **reaktivitas** unsur (terutama golongan 1 dan 17) dari letaknya di tabel periodik

🔑 Istilah kunci

triade · hukum oktaf · nomor atom · Periode · Golongan · blok s · blok p · blok d · blok f · logam · nonlogam · metaloid · Jari-jari kovalen · efek perisai · Muatan inti efektif · Energi ionisasi pertama

🧮 Rumus penting

$$f = 2{,}47 \times 10^{15}\ \text{Hz} \times (Z-1)^2$$

Hukum Moseley: sidik jari sinar-X. Frekuensi sinar-X garis Kα setiap unsur naik teratur sebanding dengan kuadrat (Z – 1), sehingga nomor atom bisa dibaca dari 'cahaya' unsur itu.

$$Z_{ef} = Z - S$$

Muatan inti efektif (aturan sederhana). Tarikan bersih yang dirasakan elektron terluar sama dengan jumlah proton dikurangi perisai dari elektron di sebelah dalamnya.

$$r \approx 52{,}9\ \text{pm} \times \frac{n^2}{Z_{ef}}$$

Perkiraan jari-jari atom (model ala Bohr). Kulit yang lebih tinggi membuat atom membengkak, sedangkan muatan inti efektif yang besar menciutkannya.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Mendeleev menyusun unsur menurut massa atom, bukan nomor atom.
- Golongan 13 bukan golongan 3!
- Jenis jari-jari yang berbeda memberi angka yang berbeda.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=8

Teka-teki untuk Bab 9

Indonesia memiliki salah satu cadangan nikel terbesar di dunia, dan nikel kini diburu untuk baterai kendaraan listrik. Natrium jauh lebih murah dan mudah melepas elektron. Mengapa nikel, bukan logam natrium, yang dipakai di dalam baterai?

▼ **Intip petunjuk**

Ingat tabel reaksi logam alkali dengan air: logam natrium terlalu reaktif untuk dipakai begitu saja, dan hanya punya satu bilangan oksidasi (+1). Nikel adalah logam transisi blok d yang bisa berpindah-pindah bilangan oksidasi (+2, +3, +4) dengan aman di dalam katoda. Menariknya, kini juga dikembangkan baterai ion natrium, tetapi di sana natrium hadir sebagai ion, bukan logam. Bab 9 mengajakmu berkeliling ke tambang-tambang unsur Nusantara.

BAB 9 · ATOM & TABEL PERIODIK

09 Kimia Unsur di Nusantara: Tabel Periodik di Bawah Kaki Kita

Api biru menari di Kawah Ijen, pasir hitam Bangka berubah menjadi timah mengilap, dan tanah merah Sulawesi menyimpan nikel untuk baterai mobil listrik. Mengapa natrium mendesis di air, klorin mengusir iodin, dan aluminium harus "disetrum" agar lepas dari batuannya?

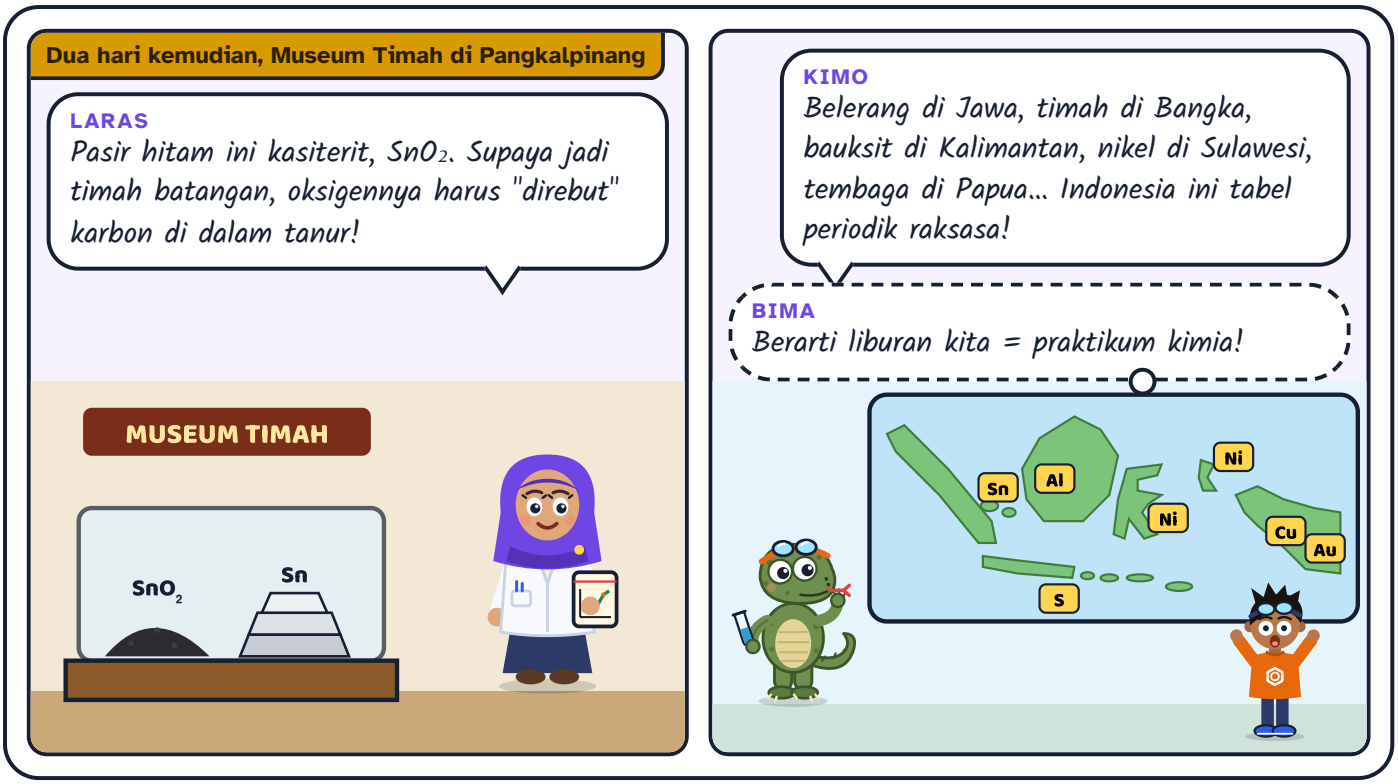
Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan sifat dan **kecenderungan reaktivitas** logam alkali, alkali tanah, halogen, dan gas mulia, lalu menulis persamaan reaksinya;
- meramalkan **reaksi pendesakan** halogen dan logam memakai deret keaktifan (deret volta);
- menjelaskan perubahan sifat unsur dan **oksida periode 3** dari basa, amfoter, sampai asam;
- mengenali ciri **logam transisi** (ion berwarna, bilangan oksidasi beragam, katalis) dan dasar **senyawa kompleks**;
- menjelaskan **pengolahan logam** (besi, aluminium, nikel, timah) dan menghitung kadar serta massa logam dari bijih Nusantara.

DARMAWISATA KE TABEL PERIODIK

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Sepotong natrium sebesar kacang hijau dijatuhkan ke dalam baskom berisi air. Apa yang terjadi?

- Natrium tenggelam ke dasar, lalu larut perlahan seperti garam.
- Natrium tenggelam, lalu meledak di dasar baskom.
- Natrium mengapung, meleleh menjadi bola perak, dan berlari-lari sambil mendesis.
- Tidak terjadi apa-apa, karena logam tidak bereaksi dengan air.

Jawabannya: mengapung, meleleh, dan berlari-lari. Massa jenis natrium hanya 0,97 g/cm^3, lebih kecil daripada air, jadi ia mengapung. Reaksinya dengan air melepaskan panas yang cukup untuk melelehkan natrium (titik leleh 98 °C) menjadi bola perak. Gas hidrogen yang menyembur dari bawahnya mendorong bola itu ke sana kemari. Logam ternyata tidak selalu keras dan berat!

9.1 Logam alkali dan alkali tanah: logam yang bisa diiris pisau

Kalau mendengar kata "logam", kamu mungkin membayangkan paku, panci, atau pagar besi: keras, berat, dan tenggelam di air. Golongan 1 tabel periodik mematahkan semua bayangan itu. Li, Na, dan K cukup lunak untuk diiris pisau dapur, mengapung di air, dan bereaksi dengannya sampai mendesis, bahkan menyala.

Bahasa sederhana · Bayangkan atom yang "tidak betah" menyimpan barang. Atom natrium punya satu elektron di kulit terluarnya, dan ia ingin sekali memberikannya kepada siapa saja. Begitu bertemu air, elektron itu langsung diserahkan. Hasilnya gas hidrogen yang berbuih dan air yang berubah menjadi basa, licin seperti air sabun. Karena terlalu "royal", logam ini disimpan di dalam minyak supaya tidak bertemu udara dan air.

DEFINISI · LOGAM ALKALI

Logam alkali adalah unsur golongan 1 selain hidrogen: litium, natrium, kalium, rubidium (Rb), sesium (Cs), dan fransium. Setiap atomnya punya **satu elektron valensi** (ns^1) yang mudah dilepas sehingga membentuk ion $\mathrm{M^+}$. Nama "alkali" berasal dari bahasa Arab *al-qaly*, yaitu abu tumbuhan yang larutannya bersifat basa.

Logam	Ar	Titik leleh (°C)	Massa jenis (g/cm³)	Energi ionisasi pertama (kJ/mol)	Dengan air
Litium	6,9	181	0,53	520	mengapung, mendesis tenang, tidak meleleh
Natrium	23,0	98	0,97	496	meleleh jadi bola perak, berlari-lari, mendesis keras
Kalium	39,1	63	0,86	419	meleleh, menyala ungu muda (lila), meletup kecil
Rubidium	85,5	39	1,53	403	tenggelam, bereaksi hebat
Sesium	132,9	28	1,93	376	tenggelam, meledak seketika

Perhatikan polanya dari atas ke bawah: titik leleh **turun** (sesium meleleh di telapak tangan pada hari panas), energi ionisasi **turun**, dan reaksi dengan air makin **hebat**. Semua logam alkali bereaksi dengan air menurut pola yang sama:

$$2\,\mathrm{M(s)} + 2\,\mathrm{H_2O(l)} \longrightarrow 2\,\mathrm{MOH(aq)} + \mathrm{H_2(g)} \qquad (\mathrm{M} =$$

- **Makroskopik:** logam berbuih dan mendesis, makin mengecil, dan air yang ditetesi fenolftalein berubah merah muda.
- **Submikroskopik:** setiap atom Na menyerahkan satu elektron kepada molekul air. Terbentuk ion $\mathrm{Na^+}$, ion $\mathrm{OH^-}$, dan molekul $\mathrm{H_2}$.
- **Simbolik:**

$$2\,\mathrm{Na(s)} + 2\,\mathrm{H_2O(l)} \longrightarrow 2\,\mathrm{NaOH(aq)} + \mathrm{H_2(g)}$$

Larutan $NaOH$ bersifat basa kuat, itulah sebabnya fenolftalein menjadi merah muda.

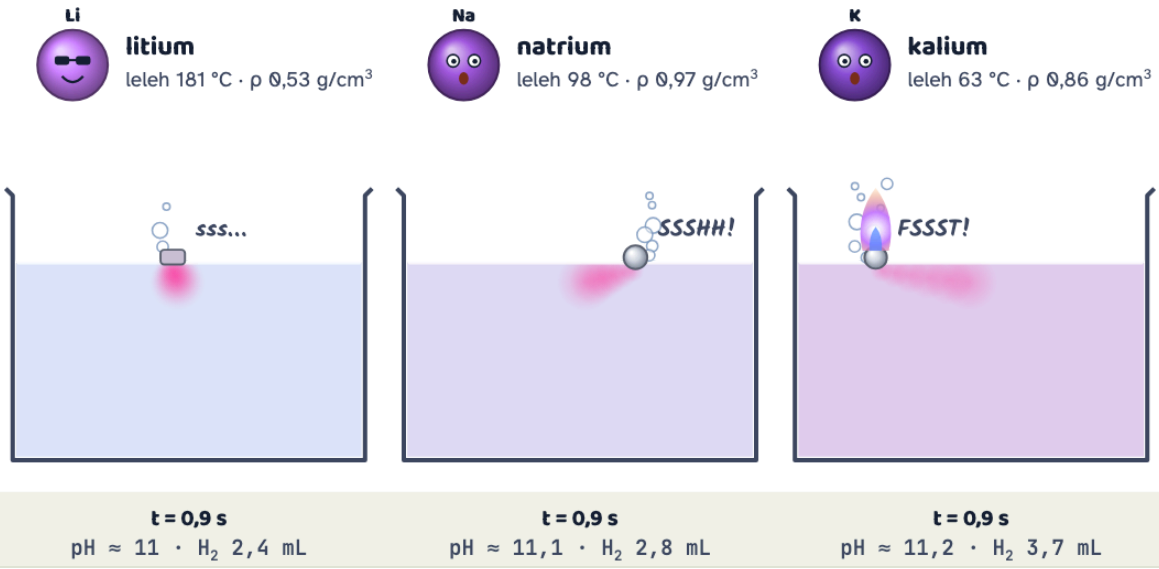
TRIK KAK TIRTA · ELEKTRON LAYANGAN

Elektron terluar itu seperti layangan. Makin panjang benangnya (makin jauh dari inti) dan makin banyak "penghalang" di antaranya (kulit elektron dalam yang melindungi), makin mudah layangan putus ditiup angin. Atom kalium punya empat kulit, natrium tiga, litium dua. Jadi elektron kalium paling mudah "putus", dan kalium paling reaktif di antara ketiganya.

LAB MINI **Lomba logam alkali: siapa paling ganas di air?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-9

$$2M(s) + 2H_2O(l) \rightarrow 2MOH(aq) + H_2(g)$$



t = 0,9 s	t = 0,9 s	t = 0,9 s
pH ≈ 11 · H_2 2,4 mL	pH ≈ 11,1 · H_2 2,8 mL	pH ≈ 11,2 · H_2 3,7 mL

H_2 dari Li	H_2 dari Na	H_2 dari K
2,4 mL	2,8 mL	3,7 mL

Keadaan

Bereaksi: perhatikan gelembung, gerak, dan warna air

Tebak dulu urutan habisnya, lalu tekan ▶. Amati: logam mana yang tetap padat? Mana yang menyala? Ubah massanya menjadi 200 mg. Baca juga volume H_2: dengan massa yang sama, mengapa litium yang paling lambat justru menghasilkan gas **paling banyak**? (Petunjuk: hitung molnya!)

⚠️ **KESELAMATAN**

Logam alkali hanya boleh diperagakan oleh guru, tidak pernah dicoba sendiri di rumah. Guru memakai potongan sebesar butir beras, baskom kaca lebar berisi banyak air, pelindung bening di antara baskom dan penonton, serta kacamata pelindung. Natrium yang menyentuh kulit lembap bereaksi dengan keringat dan menimbulkan luka bakar basa. Logam alkali disimpan di dalam minyak parafin, dan kebakarannya dipadamkan dengan pasir kering, **bukan** air.



Melepas gas mudah menyala bila kena air



Korosif (membentuk basa kuat)

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada Oktober 1807, **Humphry Davy** dari Inggris mengalirkan listrik dari baterai raksasa ke lelehan kalium hidroksida. Di katode muncul butiran logam mengilap yang langsung terbakar dengan nyala ungu. Menurut catatan sepupunya, Davy sampai menari kegirangan di laboratoriumnya. Beberapa hari kemudian ia mengulanginya dengan natrium hidroksida dan mendapatkan natrium. Logam alkali terlalu reaktif untuk dibebaskan dengan cara lain pada zamannya.

Golongan 2: sepupu yang lebih kalem

Logam alkali tanah, yaitu **Be**, **Mg**, **Ca**, **Sr**, **Ba**, dan Ra, punya **dua elektron valensi** (ns^2) dan membentuk ion M^{2+}. Melepas dua elektron butuh energi lebih besar, jadi mereka lebih keras, titik lelehnya lebih tinggi, dan reaksinya lebih kalem daripada tetangganya di golongan 1. Kecenderungannya sama: makin ke bawah, makin reaktif.

- Magnesium hampir tidak bereaksi dengan air dingin, tetapi bereaksi dengan uap air panas sambil berpijar putih: $\mathrm{Mg\,(s) + H_2O\,(g) \longrightarrow MgO\,(s) + H_2\,(g)}$.
- Kalsium bereaksi tenang dengan air dingin; larutannya keruh karena kalsium hidroksida sukar larut:

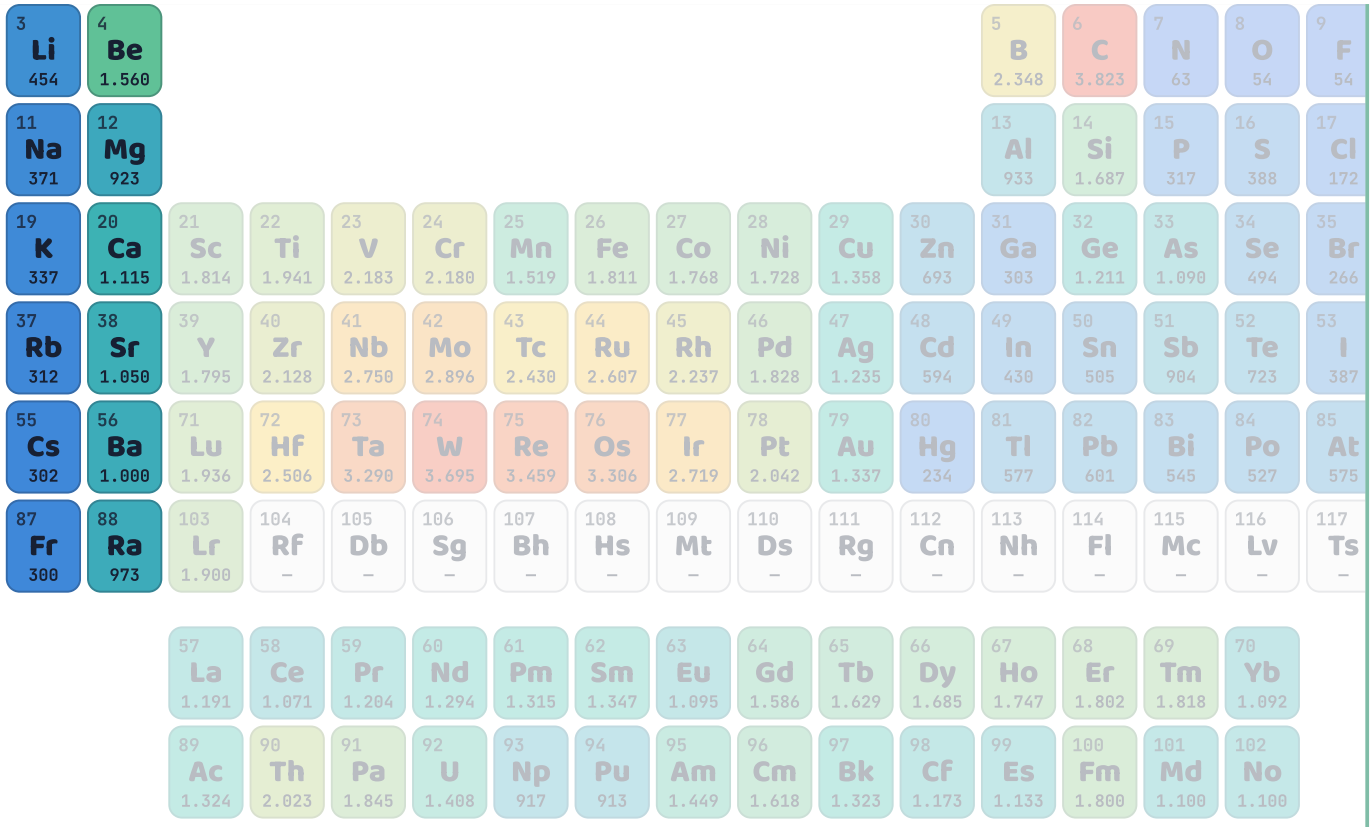
$$\mathrm{Ca\,(s) + 2\,H_2O\,(l) \longrightarrow Ca(OH)_2\,(aq) + H_2\,(g)}$$

- Magnesium terbakar dengan cahaya putih yang menyilaukan: $\mathrm{2\,Mg\,(s) + O_2\,(g) \longrightarrow 2\,MgO\,(s)}$. Itulah bahan "bintang putih" kembang api.

TABEL PERIODIK HIDUP **Tren golongan 1 dan 2: titik leleh, massa jenis, energi ionisasi**

Warnai menurut Titik leleh

1 H 14



Ganti pewarnaan ke **titik leleh**, **massa jenis**, lalu **energi ionisasi**. Ke arah mana warna golongan 1 berubah dari atas ke bawah? Bandingkan Na dengan tetangganya, Mg: mana yang energi ionisasinya lebih kecil? Ketuk unsur untuk membuka kartunya.

ID

KIMIA NUSANTARA · TOBONG GAMPING, KAPUR SIRIH, DAN GARAM MADURA

Di daerah karst seperti Gunungkidul, batu kapur ($\mathrm{CaCO_3}$) dibakar dalam **tobong gamping** sampai terurai menjadi kapur tohor: $\mathrm{CaCO_3\,(s) \xrightarrow{\Delta} CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$. Kapur tohor yang disiram air mendesis panas, bahkan bisa mendidihkan airnya: $\mathrm{CaO\,(s) + H_2O\,(l) \longrightarrow Ca(OH)_2\,(s)}$, $\Delta H \approx -65$ kJ/mol. Hasilnya **kapur padam**, yang dijual sebagai kapur sirih untuk bahan bangunan, teman makan sirih, dan perendam singkong agar keripiknya renyah.

Gips ($\mathrm{CaSO_4 \cdot 2\,H_2O}$) dipakai untuk plafon dan pembalut patah tulang. Sementara itu, para petambak di Madura menguapkan air laut di bawah terik matahari untuk memanen garam dapur (NaCl), senyawa natrium yang paling akrab di dapur kita.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

LITIUM: PALING "INGIN" BEREAKSI, TETAPI PALING LAMBAT

Potensial reduksi standar litium ($E^\circ = -3{,}04$ V) paling negatif di golongan 1, lebih negatif daripada kalium ($-2{,}93$ V). Secara **termodinamika**, litium paling kuat mendorong reaksi dengan air. Penyebabnya, ion Li^+ sangat kecil sehingga dikelilingi molekul air dengan sangat erat dan melepaskan energi hidrasi yang besar.

Namun secara **kinetika**, litium paling lambat. Titik lelehnya tinggi (181 °C) sehingga ia tidak meleleh menjadi bola yang selalu memperbarui permukaannya, dan energi untuk mengatomkan serta mengionkannya lebih besar. Pelajaran pentingnya: "seberapa besar dorongan reaksi" (ΔG, Bab 20) berbeda dengan "seberapa cepat reaksi berjalan" (laju, Bab 21).

9.2 Halogen: keluarga pembentuk garam yang rakus elektron

Di sisi kanan tabel periodik, golongan 17 berisi F, Cl, Br, I, dan astatin yang radioaktif. Namanya, **halogen**, berarti "pembentuk garam" (bahasa Yunani *hals* = garam). Setiap atomnya punya tujuh elektron valensi dan hanya butuh satu elektron lagi untuk menyerupai gas mulia. Karena itu halogen menjadi ion X^- saat bertemu logam, dan di alam bebas atomnya berpasangan sebagai molekul dwiatom X_2.

Bahasa sederhana · Halogen adalah kebalikan logam alkali. Kalau natrium suka memberi elektron, klorin suka menerima. Itulah sebabnya natrium dan klorin cepat sekali "berjodoh" menjadi garam dapur. Semakin ke bawah golongan, warna halogen makin gelap: klorin kuning kehijauan, bromin cokelat kemerahan, dan iodin ungu kehitaman.

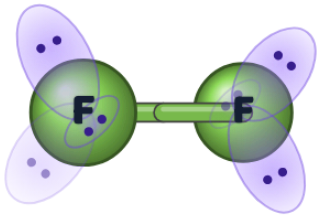
Halogen	Wujud (25 °C)	Warna	Titik didih (°C)	Panjang ikatan X–X (pm)	E° $\mathrm{X}_2/\mathrm{X}^-$ (V)
Fluorin, F_2	gas	kuning pucat	−188	142	+2,87
Klorin, Cl_2	gas	kuning kehijauan	−34	199	+1,36
Bromin, Br_2	cair	merah-cokelat (uap jingga)	59	228	+1,07
Iodin, I_2	padat	hitam keunguan, uap ungu	184	267	+0,54

Dari atas ke bawah, molekul halogen makin besar sehingga gaya London di antara molekulnya makin kuat (Bab 13): titik didih naik dan wujudnya berubah dari gas, cair, sampai padat. Sebaliknya, **daya oksidasinya turun**. Atom yang besar menarik elektron tambahan dengan lemah, karena elektron itu masuk ke kulit yang jauh dari inti dan terlindung banyak elektron dalam.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Arah tren reaktivitas golongan 1 dan golongan 17 berlawanan. Logam alkali makin reaktif ke bawah karena **melepas** elektron makin mudah bila elektronnya jauh dari inti. Halogen makin **kurang** reaktif ke bawah karena **menangkap** elektron makin sulit bila inti jauh. Jadi kalium lebih reaktif daripada natrium, tetapi fluorin lebih reaktif daripada klorin.

MOLEKUL 3D **Ukur sendiri panjang ikatan halogen**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Fluorin F_2 Mr ≈ 38

Gas kuning pucat, oksidator paling kuat. Ikatan F–F pendek tetapi justru lemah karena pasangan elektron bebasnya saling tolak.

Ketuk kedua atom untuk mengukur panjang ikatannya. Bandingkan F_2, Cl_2, Br_2, dan I_2: bagaimana ukuran atom berubah? Nyalakan pasangan elektron bebas: setiap atom halogen punya tiga pasang. Ganti ke model isi ruang untuk melihat molekul iodin yang "gemuk".

Reaksi pendesakan halogen

Karena daya oksidasinya berbeda, halogen yang lebih kuat dapat **merebut elektron** dari ion halida yang lebih lemah. Tuang air klorin ke larutan kalium bromida yang bening, maka larutan berubah jingga karena bromin terbentuk:

$$Cl_2\,(aq) + 2\,KBr\,(aq) \longrightarrow 2\,KCl\,(aq) + Br_2\,(aq) \quad \text{atau}$$

ATURAN · PENDESAKAN HALOGEN

Halogen yang letaknya **lebih atas** di golongan 17 dapat mendesak (mengoksidasi) ion halida yang letaknya **lebih bawah**, tetapi tidak sebaliknya. Urutan daya oksidasi: $F_2 > Cl_2 > Br_2 > I_2$.

Ditambahkan ke →	KCl (bening)	KBr (bening)	KI (bening)
air klorin	—	jingga: Br_2 terbentuk ✓	cokelat: I_2 terbentuk ✓
air bromin	tetap jingga pucat ✗	—	cokelat: I_2 terbentuk ✓
larutan iodin	tetap cokelat ✗	tetap cokelat ✗	—

Untuk memastikan iodin yang terbentuk, teteskan larutan kanji (amilum): warnanya menjadi biru tua. Kimiawan juga sering mengocok campuran dengan pelarut nonpolar seperti heksana. Bromin larut di lapisan atas dengan warna jingga, sedangkan iodin berwarna ungu.

TRIK KAK TIRTA · KAKAK BOLEH MENGUSIR ADIK

Bayangkan halogen sebagai kakak-beradik yang berbaris dari atas: F si sulung, lalu Cl, Br, dan I si bungsu. "Kakak boleh mengusir adik dari kamarnya, adik tidak bisa mengusir kakak." Klorin mengusir bromida dan iodida, bromin hanya bisa mengusir iodida, dan iodin tidak bisa mengusir siapa pun.

KIMIA NUSANTARA · KLORIN DI PDAM DAN GARAM BERYODIUM

Air PDAM diberi sedikit klorin (gas Cl_2 atau kaporit, $Ca(OCl)_2$). Di dalam air terbentuk asam hipoklorit yang membunuh kuman: $Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HCl + HOCl$. Sisa klorin yang sampai ke keran umumnya dijaga sangat kecil, sekitar 0,2–0,5 mg/L. Bau tajam di kolam renang sebenarnya terutama berasal dari **kloramin**, hasil reaksi klorin dengan senyawa nitrogen dari keringat dan urin.

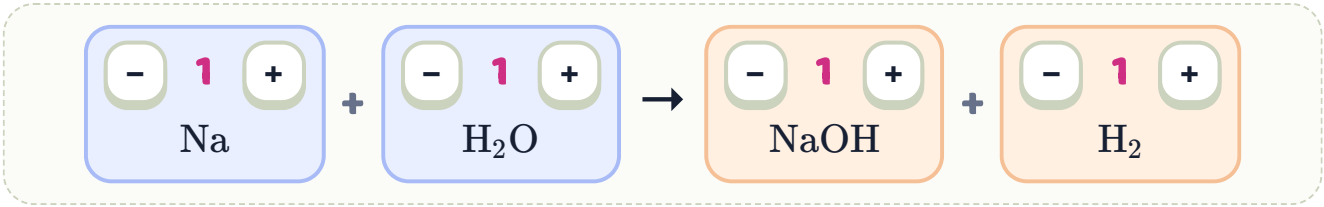
Kekurangan iodin menyebabkan gondok dan gangguan pertumbuhan otak anak. Karena itu garam konsumsi di Indonesia wajib diberi iodium, biasanya dalam bentuk **kalium iodat** (KIO_3), dengan kadar minimal sekitar 30 mg per kg garam. Kalium iodat dipilih karena lebih stabil daripada kalium iodida di udara tropis yang panas dan lembap.

TAMU DARI MASA LALU

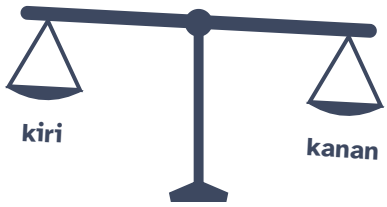
Pada 1811, **Bernard Courtois** di Prancis membuat sendawa untuk mesiu dari abu rumput laut. Saat ia menuang asam sulfat ke sisa abunya, membubunglah uap ungu yang mengembun menjadi kristal hitam mengilap. Unsur baru itu dinamai iodin, dari bahasa Yunani *iodes* yang berarti ungu. Indonesia kini termasuk penghasil rumput laut terbesar di dunia, bahan yang dulu melahirkan iodin.

Fluorin, si sulung yang paling ganas, justru melindungi gigimu. Pasta gigi berfluorida mengubah sebagian hidroksiapatit email gigi menjadi fluorapatit yang lebih tahan asam. Untuk membedakan ion halida di laboratorium, tambahkan larutan perak nitrat yang diasamkan: $AgCl$ mengendap putih, $AgBr$ krem, dan AgI kuning (lebih lengkap di Bab 39).

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi logam aktif dan halogen**



Unsur	Kiri	Kanan	
Na	1	1	✓
H	2	3	✗
O	1	1	✓



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 9 null

Mulailah dari atom yang muncul di paling sedikit zat. Pada reaksi natrium dengan air, setarakan H paling akhir. Pada $\mathrm{Br_2} + \mathrm{I^-}$, periksa juga muatannya di kedua ruas!

9.3 Gas mulia: bangsawan yang (hampir) tak mau bergaul

Golongan 18 berisi **He**, **Ne**, **Ar**, **Kr**, **Xe**, dan **Rn**. Kulit terluarnya sudah penuh (helium $1s^2$, yang lain ns^2np^6), energi ionisasinya sangat tinggi, dan mereka hampir tidak tertarik menerima elektron. Karena itu gas mulia ada sebagai **atom tunggal** yang tidak berwarna, tidak berbau, dan sangat sulit bereaksi. Gaya tarik antaratomnya sangat lemah, jadi titik didihnya amat rendah. Helium baru mencair pada –269 °C, hanya 4 derajat di atas nol mutlak.

Bahasa sederhana · Gas mulia seperti bangsawan yang sudah punya segalanya. Kulit elektronnya penuh, jadi ia tidak perlu meminjam atau memberi elektron kepada atom lain. Justru karena "malas" bereaksi, gas mulia berguna: ia melindungi benda panas dari oksigen, mengisi balon dengan aman, dan menyala berwarna-warni di dalam lampu.

Gas mulia	Kegunaan	Sifat yang dimanfaatkan
Helium	balon dan kapal udara, pendingin magnet mesin MRI, campuran gas selam dalam	sangat ringan, tidak terbakar, titik didih terendah

Neon	lampu papan iklan merah-jingga	memancarkan cahaya merah-jingga saat dilalui listrik
Argon	gas pelindung las (las argon), pengisi bola lampu pijar, jendela kaca ganda	tidak bereaksi dengan logam panas; murah (0,93% udara)
Kripton	lampu kilat foto, lampu landasan pacu	cahaya putih yang sangat terang
Xenon	lampu sorot kendaraan, pendorong ion satelit, obat bius	atom berat yang mudah diionkan
Radon	(tidak dimanfaatkan; justru diwaspadai)	radioaktif, hasil peluruhan uranium di batuan



TAMU DARI MASA LALU

Lord Rayleigh heran: nitrogen yang ia ambil dari udara selalu sedikit lebih berat (±1,257 g/L) daripada nitrogen dari amonia (±1,251 g/L). Bersama **William Ramsay**, pada 1894 ia menemukan penyebabnya: udara mengandung ±1% gas yang "tidak mau berbuat apa-apa". Mereka menamainya argon, dari bahasa Yunani *argos* yang berarti malas. Ramsay kemudian memisahkan neon, kripton, dan xenon dari udara cair, lalu meraih Nobel Kimia 1904.

MITOS

"Gas mulia sama sekali tidak bisa bereaksi."

FAKTA

Sejak 1962 kimiawan membuat XeF_2, XeF_4, dan XeO_3. Atom xenon yang besar melepas elektron jauh lebih mudah daripada helium. Helium dan neon memang belum pernah membentuk senyawa netral yang stabil.

MITOS

"Lampu neon di rumah berisi gas neon."

FAKTA

Lampu tabung putih berisi argon dan sedikit uap raksa. Sinar ultraungunya diubah lapisan fosfor di dinding tabung menjadi cahaya putih. Gas neon asli menyala merah-jingga, seperti di papan iklan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

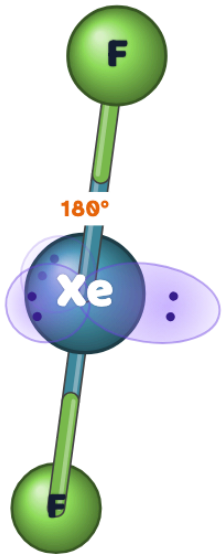
BAGAIMANA XENON "DIPAKSA" BEREAKSI

Pada 1962, **Neil Bartlett** menemukan bahwa platina heksafluorida, $\mathrm{PtF_6}$, cukup kuat untuk merebut elektron dari molekul oksigen: $\mathrm{O_2 + PtF_6 \longrightarrow [O_2]^+[PtF_6]^-}$. Ia lalu membandingkan energi ionisasi: $\mathrm{O_2}$ 1.165 kJ/mol, sedangkan xenon 1.170 kJ/mol, hampir sama! Bartlett mencampur xenon dengan $\mathrm{PtF_6}$ dan memperoleh padatan jingga-kuning, senyawa gas mulia pertama.

Tak lama kemudian, xenon dan fluorin yang dipanaskan menghasilkan $\mathrm{XeF_2}$, $\mathrm{XeF_4}$, dan $\mathrm{XeF_6}$. Bentuk molekulnya diramalkan dengan tepat oleh teori VSEPR (Bab 12): $\mathrm{XeF_2}$ linear karena tiga pasangan elektron bebasnya berada di bidang ekuator, dan $\mathrm{XeF_4}$ segi empat datar.

MOLEKUL 3D

Senyawa gas mulia: xenon pun bisa berikatan



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Xenon difluorida $\mathrm{XeF_2}$ Mr ≈ 169,29 AX2E3 · linear

Tiga pasangan elektron bebas di ekuator, dua F di sumbu → linear. Bukti gas mulia bisa bereaksi!

Nyalakan pasangan elektron bebas pada atom Xe. Hitung jumlah domain elektronnya: $\mathrm{XeF_2}$ punya 5, $\mathrm{XeF_4}$ punya 6, $\mathrm{XeO_3}$ punya 4. Ukur sudut F–Xe–F dengan mengetuk tiga atom.

9.4 Menyusuri periode 3: dari natrium ke argon

Sekarang kita berjalan mendatar sepanjang periode 3: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar. Dalam delapan langkah saja, sifat unsurnya berubah total, dari logam lunak yang mengilap sampai gas yang tidak mau bereaksi. Perubahan paling mencolok terlihat pada **oksida**-nya.

Bahasa sederhana · Dari kiri ke kanan periode 3, unsurnya berubah dari logam menjadi nonlogam. Oksida logam di kiri, kalau dicampur air, menghasilkan larutan basa yang licin. Oksida nonlogam di kanan menghasilkan larutan asam yang masam. Aluminium di tengah bersikap "dua muka": bisa bereaksi dengan asam maupun basa.

Unsur	Struktur	Titik leleh (°C)	Oksida tertinggi	Ikatan oksida	Sifat oksida	pH bila dicampur air
Na	kisi logam	98	Na_2O	ion	basa kuat	±14
Mg	kisi logam	650	MgO	ion	basa	±10
Al	kisi logam	660	Al_2O_3	ion (sebagian kovalen)	**amfoter**	7 (tidak larut)
Si	kovalen raksasa	1.414	SiO_2	kovalen raksasa	asam lemah	7 (tidak larut)
P	molekul P_4	44	P_4O_{10}	kovalen	asam	±2
S	molekul S_8	115	SO_3 (juga SO_2)	kovalen	asam kuat	±1
Cl	molekul Cl_2	−101	Cl_2O_7	kovalen	asam sangat kuat	±0,5
Ar	atom tunggal	−189	—	—	—	—

Titik leleh naik dari Na sampai Si (makin banyak elektron yang dipakai bersama, sampai jaringan kovalen raksasa silikon), lalu anjlok pada fosfor, belerang, dan klorin yang berupa molekul kecil. Reaksi oksida dengan air:

- $Na_2O\,(s) + H_2O\,(l) \longrightarrow 2\,NaOH\,(aq)$ dan $MgO\,(s) + H_2O\,(l) \longrightarrow Mg(OH)_2\,(s)$ (sedikit larut): larutan basa.
- $P_4O_{10}\,(s) + 6\,H_2O\,(l) \longrightarrow 4\,H_3PO_4\,(aq)$, $SO_3\,(g) + H_2O\,(l) \longrightarrow H_2SO_4\,(aq)$, dan $Cl_2O_7\,(l) + H_2O\,(l) \longrightarrow 2\,HClO_4\,(aq)$: larutan asam.
- SiO_2 tidak larut dalam air, tetapi bereaksi dengan basa kuat panas:

$$SiO_2\,(s) + 2\,NaOH\,(aq) \longrightarrow Na_2SiO_3\,(aq) + H_2O\,(l)$$

Jadi ia oksida asam.

ATURAN · SIFAT OKSIDA SEPANJANG PERIODE

Dari kiri ke kanan periode 3, oksida berubah dari **oksida basa** (ionik, Na dan Mg), ke **oksida amfoter** (Al_2O_3), lalu **oksida asam** (kovalen, Si sampai Cl). **Oksida amfoter** bereaksi dengan asam *dan* dengan basa:

$$Al_2O_3\,(s) + 6\,HCl\,(aq) \longrightarrow 2\,AlCl_3\,(aq) + 3\,H_2O\,(l)$$

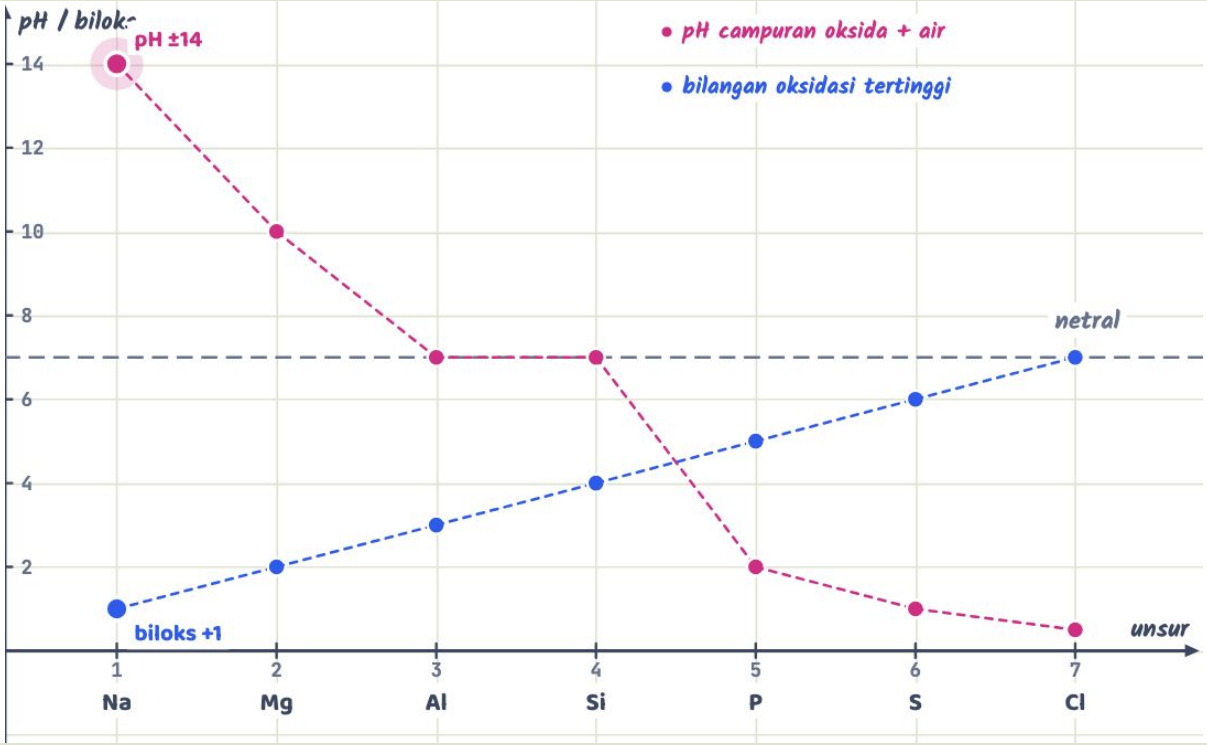
$$Al_2O_3\,(s) + 2\,NaOH\,(aq) + 3\,H_2O\,(l) \longrightarrow 2\,Na[Al(OH)_4]\,(aq)$$

GRAFIK HIDUP

Oksida periode 3: biloks naik, pH turun

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-9

$$Na_2O\ MgO\ Al_2O_3\ SiO_2\ P_4O_{10}\ SO_3\ Cl_2O_7$$



Na_2O: ionik → NaOH, basa kuat

pH (±)	biloks tertinggi
14	1

Seret titik merah muda dari Na ke Cl. Biloks tertinggi naik tepat satu langkah setiap unsur (sama dengan jumlah elektron valensinya), sementara pH turun dari basa ke asam. Di unsur mana garis pH memotong garis netral?

ID

KIMIA NUSANTARA · API BIRU IJEN DAN HUJAN ASAM

Gas vulkanik panas di Kawah Ijen membawa uap belerang. Saat menyentuh udara, belerang itu terbakar dengan nyala biru yang hanya tampak di malam hari: $S(g) + O_2(g) \longrightarrow SO_2(g)$. Sebagian uap mengembun menjadi cairan merah yang membeku menjadi bongkahan kuning. Para penambang memikul 70–90 kg belerang sekali jalan, menembus asap SO_2 yang menyesakkan. Danau kawahnya termasuk danau paling asam di dunia, dengan pH mendekati 0.

Belerang dioksida dari gunung api dan pembakaran batu bara dapat teroksidasi di udara menjadi SO_3, lalu larut dalam air hujan: $2\,SO_2 + O_2 \longrightarrow 2\,SO_3$, $SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$. Inilah **hujan asam** yang merusak daun, patung batu kapur, dan logam.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA OKSIDA BERUBAH DARI BASA KE ASAM?

Kuncinya adalah selisih keelektronegatifan dengan oksigen (3,44). Natrium (0,93) dan magnesium (1,31) berselisih besar, jadi oksidanya ionik dan berisi ion O^{2-}. Ion oksida adalah basa yang sangat kuat: $O^{2-} + H_2O \longrightarrow 2\,OH^-$. Ke arah kanan, selisihnya mengecil sehingga ikatan menjadi kovalen. Unsur nonlogam yang biloksnya tinggi menarik elektron dari ikatan O–H, sehingga molekul air yang terikat mudah melepas H^+, dan terbentuklah asam okso.

Klorida periode 3 menunjukkan pola serupa. $NaCl$ larut dengan pH 7. $AlCl_3$ membentuk ion $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ yang asam (pH ±3). Silikon tetraklorida bereaksi hebat dengan air dan berasap: $SiCl_4 + 2\,H_2O \longrightarrow SiO_2 + 4\,HCl$. Fosforus pentaklorida juga terhidrolisis: $PCl_5 + 4\,H_2O \longrightarrow H_3PO_4 + 5\,HCl$.

9.5 Logam transisi dan deret keaktifan

Di tengah tabel periodik, di antara golongan 2 dan 13, berjajar **logam transisi** (blok d). Mereka adalah "pekerja keras" peradaban: **Fe** untuk jembatan dan rangka gedung, **Cu** untuk kabel listrik, **Ni** untuk baja tahan karat dan baterai, **Zn** untuk atap seng. Umumnya mereka keras, kuat, titik lelehnya tinggi (besi 1.538 °C), rapat, dan penghantar listrik yang baik.

CIRI KHAS LOGAM TRANSISI

1. **Bilangan oksidasi beragam.** Besi membentuk Fe^{2+} dan Fe^{3+}; tembaga Cu^+ dan Cu^{2+}; mangan dari +2 sampai +7 (dalam MnO_4^-). Energi orbital 4s dan 3d berdekatan, jadi jumlah elektron yang dilepas bisa berbeda-beda.
2. **Ion dan senyawanya berwarna**, karena subkulit d yang terisi sebagian dapat menyerap cahaya tampak (lihat 9.7).
3. **Katalis yang andal**, karena dapat berganti bilangan oksidasi dan menyediakan permukaan tempat molekul menempel.
4. **Membentuk ion kompleks** dengan molekul atau ion yang punya pasangan elektron bebas (9.7).

Ion dalam air	Konfigurasi d	Warna	Di sekitar kita
Cu^{2+}	$3d^9$	biru	terusi (tembaga(II) sulfat) untuk kolam dan pertanian
Fe^{2+}	$3d^6$	hijau pucat	tablet tambah darah (besi(II) sulfat)
Fe^{3+}	$3d^5$	kuning-cokelat	air sumur yang menguning setelah didiamkan

Ni^{2+}	$3d^8$	hijau	larutan untuk melapisi logam dengan nikel
Co^{2+}	$3d^7$	merah muda	butiran silika gel penunjuk lembap (biru → merah muda)
$\mathrm{MnO_4}^-$	$3d^0$ (Mn +7)	ungu (dari perpindahan muatan O → Mn, bukan lompatan d–d)	kalium permanganat ("PK") untuk antiseptik
Zn^{2+}	$3d^{10}$	tak berwarna	salep seng oksida, bedak bayi

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Saat logam transisi menjadi ion, elektron 4s dilepas **lebih dulu**, baru elektron 3d. Besi $[\mathrm{Ar}]\,3d^6 4s^2$ menjadi Fe^{2+} $[\mathrm{Ar}]\,3d^6$, bukan $[\mathrm{Ar}]\,3d^4 4s^2$. Melepas satu elektron 3d lagi menghasilkan Fe^{3+} $[\mathrm{Ar}]\,3d^5$ yang setengah penuh dan cukup stabil. Itulah sebabnya besi(II) di air sumur mudah teroksidasi menjadi besi(III) yang kuning-cokelat.

Logam transisi juga menggerakkan industri Indonesia sebagai **katalis**: serbuk besi di pabrik pupuk amonia, nikel untuk mengeraskan minyak sawit menjadi mentega putih dan margarin (hidrogenasi), vanadium(V) oksida untuk membuat asam sulfat, serta platina, paladium, dan rodium di dalam knalpot kendaraan untuk mengubah gas CO dan NO yang beracun.

Siapa mendesak siapa? Deret keaktifan logam

Tebak Dulu!

Paku besi yang bersih dicelupkan ke larutan terusi (tembaga(II) sulfat) yang biru. Sepuluh menit kemudian…

- Paku tetap mengilap dan larutan tetap biru, karena besi tidak bereaksi dengan garam.
- Paku terlapisi zat cokelat kemerahan, dan warna biru larutan perlahan memudar.
- Paku larut habis dan larutan menjadi merah darah.
- Larutan menjadi bening karena tembaganya menguap.

Jawabannya: paku berlapis tembaga, biru memudar. Besi lebih reaktif daripada tembaga. Atom Fe menyerahkan elektronnya kepada ion $\mathrm{Cu^{2+}}$, sehingga tembaga mengendap di permukaan paku dan besi larut sebagai $\mathrm{Fe^{2+}}$ yang hijau pucat: $\mathrm{Fe + Cu^{2+} \longrightarrow Fe^{2+} + Cu}$. Inilah **reaksi pendesakan logam**.

Logam dapat diurutkan menurut kemudahannya melepas elektron. Urutan ini disebut **deret keaktifan**. Di buku kimia Indonesia, urutan berdasarkan potensial elektrode standar (E°, Bab 30) disebut **deret volta**:

$$\mathrm{Li\ K\ Ba\ Ca\ Na\ Mg\ Al\ Mn\ (H_2O)\ Zn\ Cr\ Fe\ Cd\ Co\ Ni}$$

E° (V) di bawah setiap logam · H = pembanding



makin ke kiri: makin mudah melepas elektron, makin reaktif

Logam di sebelah kiri hidrogen dapat mendesak gas hidrogen dari asam encer; logam di sebelah kanan hidrogen tidak bisa.

ATURAN · PENDESAKAN LOGAM

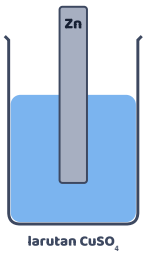
Logam yang letaknya **lebih kiri** di deret keaktifan dapat mendesak ion logam yang letaknya **lebih kanan** dari larutan garamnya. Logam di kiri H dapat mendesak $\mathrm{H_2}$ dari asam encer, misalnya

$$\mathrm{Zn\,(s) + 2\,HCl\,(aq) \longrightarrow ZnCl_2\,(aq) + H_2\,(g)}$$

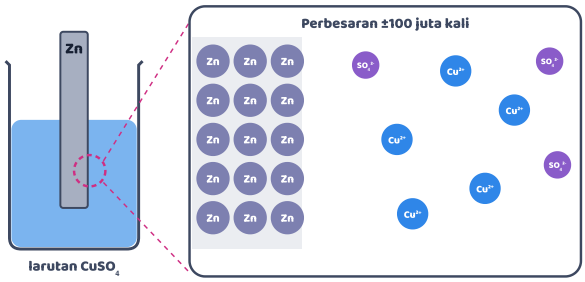
Secara kuantitatif, reaksi berlangsung spontan bila $E^\circ_{\text{sel}} = E^\circ_{\text{ion yang direduksi}} - E^\circ_{\text{logam yang dioksidasi}} > 0$.

TRIK KAK TIRTA · JEMBATAN KELEDAI

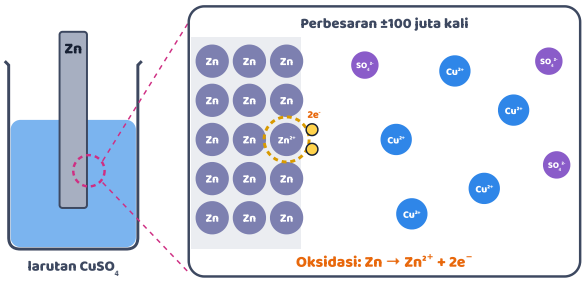
Urutan K Ca Na Mg Al Zn Fe Ni Sn Pb H Cu Ag Au bisa dihafal dengan kalimat: **"Kakak Cari Nanas Manis, Alamak Zonk! Ferry Nikmati Sate Pedas, Habis Cuci Agar Aman."** Satu catatan: soal gaya IGCSE sering menaruh Na di atas Ca karena natrium bereaksi lebih hebat dengan air, sedangkan deret volta (berdasarkan E°) menaruh Ca sedikit di atas Na. Keduanya benar untuk ukuran yang berbeda; ikuti urutan yang dipakai soal.



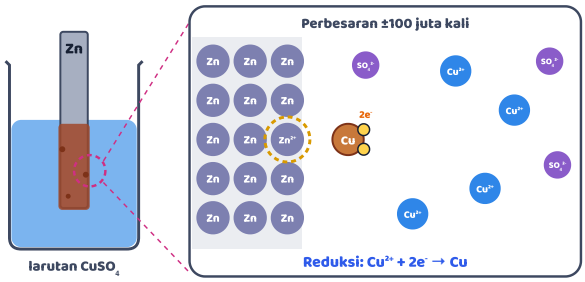
Langkah 1. Sekeping seng (Zn) dicelupkan ke dalam larutan tembaga(II) sulfat yang biru. Apa yang terjadi pada tingkat partikel?



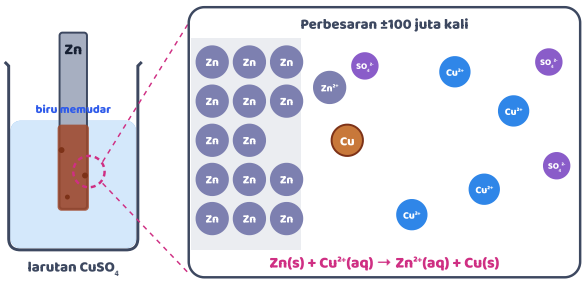
Langkah 2. Perbesar permukaan seng: atom-atom Zn tersusun rapat. Di larutan berenang ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ (biru) dan ion $\mathrm{SO_4^{2-}}$ (ungu).



Langkah 3. Seng lebih reaktif, jadi atom Zn di permukaan melepas dua elektron dan menjadi ion: $\mathrm{Zn} \quad \mathrm{Zn^{2+} + 2\,e^-}$ (**oksidasi**).



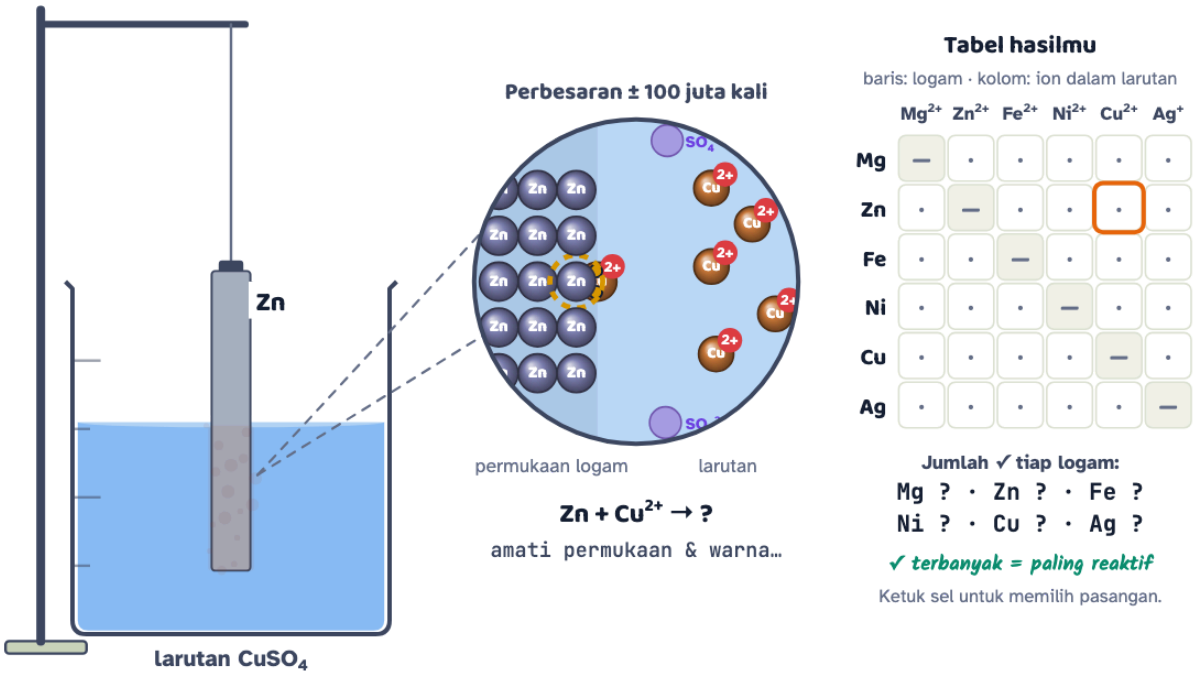
Langkah 4. Ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ di dekat permukaan menangkap dua elektron itu dan menjadi atom tembaga yang menempel: $\mathrm{Cu^{2+} + 2\,e^-} \quad \mathrm{Cu}$ (**reduksi**). Lapisan cokelat kemerahan mulai tampak.



Langkah 5. Ion $\mathrm{Zn^{2+}}$ yang tak berwarna larut ke dalam air, ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ berkurang sehingga biru memudar, dan $\mathrm{SO_4^{2-}}$ tidak berubah (**ion penonton**). Persamaan ionnya: $\mathrm{Zn\,(s) + Cu^{2+}\,(aq) \quad Zn^{2+}\,(aq) + Cu\,(s)}$.

LAB MINI Laboratorium pendesakan: susun sendiri deret keaktifan

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-9



Terjadi pendesakan?	Persamaan ion	E°sel	Pasangan diuji
tebak dulu, lalu uji!	…	–	0 / 30

Pilih logam dan larutan, **tebak dulu**, lalu seret logam ke larutan (atau tekan ▶). Perhatikan endapan, perubahan warna, dan perpindahan elektron di lingkaran perbesaran. Uji sebanyak mungkin dari 30 pasangan; ketuk sel tabel untuk memilih pasangan. Logam dengan ✓ terbanyak adalah yang paling reaktif. Coba juga kawat tembaga di larutan perak nitrat: tumbuhlah "pohon perak"!

KERJAKAN BERSAMA **Meramalkan pendesakan**

Ramalkan apakah reaksi terjadi, lalu tulis persamaan ionnya bila terjadi: (a) seng dalam larutan tembaga(II) sulfat; (b) tembaga dalam larutan seng sulfat; (c) besi dalam larutan perak nitrat. Gunakan E°: Zn −0,76 V; Fe −0,44 V; Cu +0,34 V; Ag +0,80 V.

1. (a) Zn di kiri Cu, jadi Zn mendesak Cu^{2+}: $Zn + Cu^{2+} \longrightarrow Zn^{2+} + Cu$, $E^\circ_{sel} = 0{,}34 - (-0{,}76) = +1{,}10$ V.
2. (b) Cu di kanan Zn, jadi tidak terjadi reaksi: $E^\circ_{sel} = -0{,}76 - 0{,}34 = -1{,}10$ V (negatif).
3. (c) Fe di kiri Ag. Setiap Fe melepas 2 elektron, setiap Ag^+ menerima 1, jadi butuh 2 ion perak: $Fe + 2\,Ag^+ \longrightarrow Fe^{2+} + 2\,Ag$, $E^\circ_{sel} = 0{,}80 - (-0{,}44) = +1{,}24$ V.

(a) dan (c) bereaksi, (b) tidak. Perhatikan bahwa E° tidak dikalikan 2 walaupun koefisien Ag^+ dua: potensial adalah sifat "per elektron".

MITOS

"Semua logam keras dan tenggelam di air."

FAKTA

Natrium bisa diiris pisau dan mengapung (0,97 g/cm³). Litium (0,53 g/cm³) bahkan lebih ringan daripada minyak goreng! Ikatan logam golongan 1 lemah karena setiap atom hanya menyumbang satu elektron ke "lautan elektron".

MITOS

"Karat adalah besi yang kotor."

FAKTA

Karat adalah zat baru, besi(III) oksida terhidrasi: $4\,Fe + 3\,O_2 + 2x\,H_2O \longrightarrow 2\,Fe_2O_3 \cdot x\,H_2O$. Perlu oksigen *dan* air; garam di udara pantai mempercepatnya. Karat rapuh dan mengelupas, sehingga besi di bawahnya terus termakan.

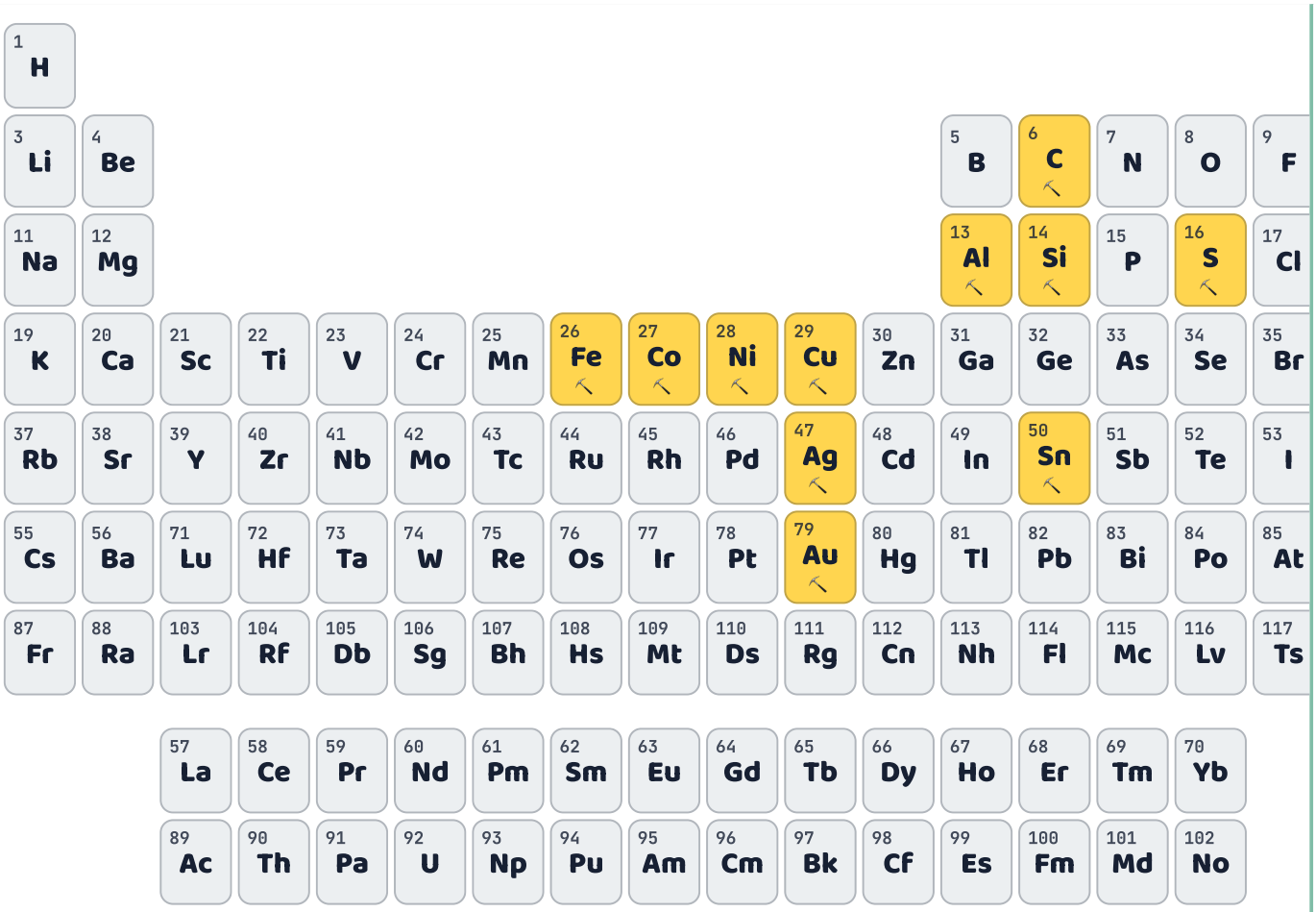
9.6 Dari batuan menjadi logam: pengolahan logam di Nusantara

Logam jarang ditemukan dalam keadaan murni. Karena reaktif, kebanyakan logam terikat sebagai oksida, sulfida, atau karbonat di dalam batuan. Batuan yang cukup kaya logam sehingga menguntungkan untuk ditambang disebut **bijih**. Hanya logam yang sangat tidak reaktif, seperti Au, yang bisa ditemukan dalam keadaan murni; itulah emas yang didulang di sungai.

TABEL PERIODIK HIDUP **Peta tambang Nusantara di tabel periodik**

Warnai menurut Tambang Nusantara

Cari unsur (nama/lambang/nomor)...



Unsur berwarna kuning ditambang atau diolah di Indonesia. Ketuk setiap unsur kuning untuk membaca kartunya dan lokasi tambangnya. Ganti pewarnaan ke **tahun ditemukan**: unsur mana yang sudah dikenal sejak zaman kuno? Hubungkan dengan deret keaktifan: mengapa logam yang paling lama dikenal manusia justru yang kurang reaktif?

Cara memisahkan logam dari bijihnya bergantung pada **reaktivitas** logam itu. Makin reaktif logamnya, makin erat ia "memeluk" oksigen, dan makin besar energi yang dibutuhkan untuk melepaskannya.

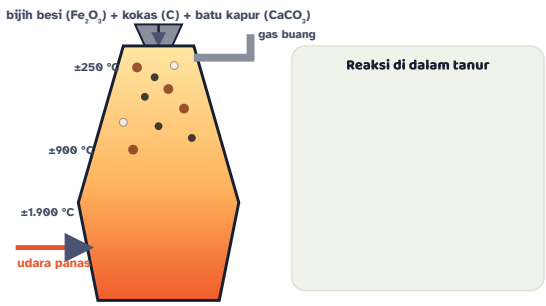
Logam	Mineral bijih	Daerah di Indonesia	Cara pengolahan
Aluminium	bauksit, $\mathrm{Al_2O_3 \cdot x\,H_2O}$	Kalimantan Barat, Kepulauan Riau	dimurnikan jadi alumina, lalu **elektrolisis lelehan** (Hall–Héroult) di Kuala Tanjung
Nikel	laterit (limonit dan saprolit)	Sorowako, Pomalaa, Morowali (Sulawesi); Halmahera dan Pulau Obi (Maluku Utara)	peleburan dengan karbon menjadi feronikel/nikel matte; pelindian asam bertekanan tinggi (HPAL) untuk bahan baterai

Besi	hematit Fe_2O_3, magnetit Fe_3O_4 (pasir besi)	pantai selatan Jawa dan daerah lain	**reduksi** dengan karbon monoksida di tanur tinggi
Timah	kasiterit SnO_2	Bangka Belitung, Kepulauan Riau	dipekatkan, lalu **direduksi dengan karbon** di tanur peleburan
Tembaga, emas	kalkopirit $CuFeS_2$, emas murni	Grasberg (Papua), Batu Hijau (Sumbawa)	flotasi menjadi konsentrat, peleburan, lalu pemurnian elektrolisis
Belerang	belerang alam S	Kawah Ijen (Jawa Timur)	dikumpulkan langsung dari uap gunung api yang membeku

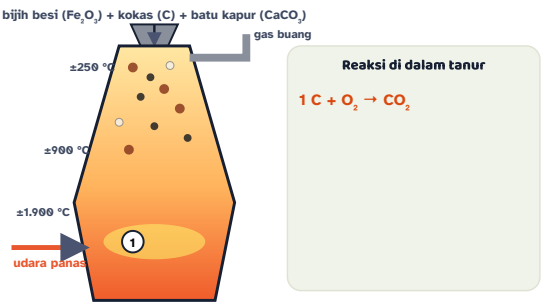
ATURAN · MEMILIH CARA PENGOLAHAN

- Logam **di atas karbon** dalam deret keaktifan (K, Na, Ca, Mg, Al) diperoleh dengan **elektrolisis** senyawa leburnya.
- Logam **di bawah karbon** (Zn, Fe, Ni, Sn, Pb) diperoleh dengan **reduksi** oksidanya memakai karbon atau karbon monoksida.
- Logam yang sangat tidak reaktif (Ag, Au, kadang Cu) ditemukan murni atau mudah dibebaskan, lalu dimurnikan.

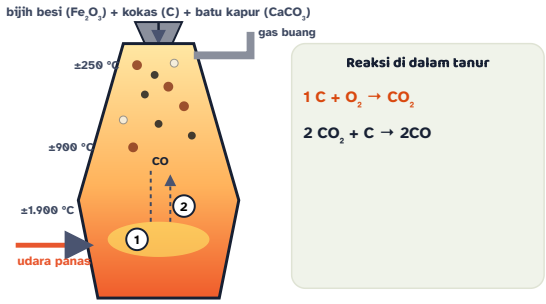
Tanur tinggi: dapur raksasa pembuat besi



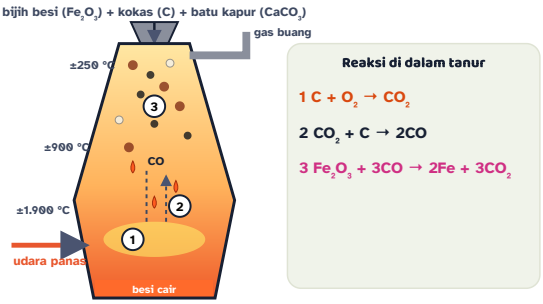
Langkah 1. Bijih besi (hematit), kokas (karbon dari batu bara), dan batu kapur dimasukkan dari puncak tanur setinggi gedung belasan lantai. Udara panas ditiupkan dari bawah.



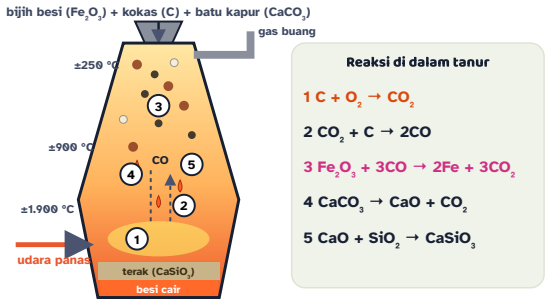
Langkah 2. Kokas terbakar di dekat lubang udara: $C + O_2 \longrightarrow CO_2$. Reaksi ini sangat eksoterm sehingga bagian bawah tanur mencapai ±1.900 °C.



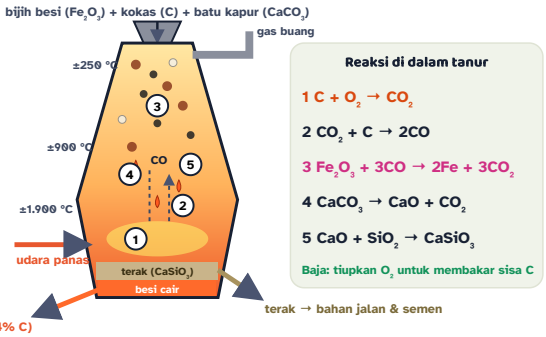
Langkah 3. Karbon dioksida naik dan bereaksi dengan kokas panas: $CO_2 + C \longrightarrow 2\,CO$. Gas **karbon monoksida** inilah reduktor utamanya.



Langkah 4. CO merebut oksigen dari bijih besi: $Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$. Besi (biloks +3 → 0) **tereduksi**, CO (C: +2 → +4) teroksidasi. Besi cair menetes ke dasar tanur.



Langkah 5. Batu kapur terurai, $CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$, lalu kapur tohor mengikat pasir pengotor: $CaO + SiO_2 \longrightarrow CaSiO_3$. Cairan **terak** ini lebih ringan sehingga mengapung di atas besi cair.



Langkah 6. Besi cair dan terak dikeluarkan dari lubang yang berbeda. Besi kasar (±4% karbon) masih rapuh; dengan meniupkan oksigen untuk membakar sebagian karbonnya, besi diubah menjadi **baja**. Ditambah kromium dan nikel, jadilah baja tahan karat.

CONTOH **Kadar besi dalam hematit**

Hitung kadar (persen massa) besi dalam hematit murni, Fe_2O_3, lalu hitung massa besi yang dapat diperoleh dari 500 ton hematit murni. (Ar Fe = 56, O = 16)

1. $M_r\,Fe_2O_3 = 2(56) + 3(16) = 160.$
2. Kadar Fe $= \dfrac{2 \times 56}{160} \times 100\% = 70\%.$
3. Massa Fe $= 70\% \times 500$ ton $= 350$ ton.

Kadar besi 70%; 500 ton hematit murni berisi 350 ton besi. Bijih nyata bercampur pasir dan tanah, jadi kadarnya lebih rendah.

RUMUS HIDUP **Kadar logam dalam mineral bijih**

$$\%\,\text{logam} = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Dari rumus mineralnya, kita tahu berapa bagian massanya yang benar-benar logam.

k Jumlah atom logam per rumus

A_r Ar logam

M_r Mr mineral

$\%\,\text{logam}$ Kadar logam %



⛏ **hematit Fe_2O_3**

Setiap 1 ton mineral murni berisi **700** kg logam.

Cek satuan: tanpa satuan: (g/mol) ÷ (g/mol) × 100%

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KADAR-LOGAM-BIJIH

RUMUS HIDUP

Massa logam dari bijih (dengan rendemen)

$$m_{\text{logam}} = m_{\text{bijih}} \times \frac{w}{100} \times \frac{\eta}{100}$$

Logam yang didapat sama dengan massa bijih dikali kadar logamnya, lalu dikali rendemen (persen keberhasilan) prosesnya.

- m_{bijih} Massa bijih `ton`
- w Kadar logam dalam bijih `%`
- η Rendemen proses `%`
- m_{logam} Logam yang diperoleh `ton`

LOGAM YANG DIPEROLEH

16,2

ton

bijih kadar rendah seperti laterit nikel: butuh pengolahan besar-besaran

1.000 ton bijih berkadar **1,8**% dengan rendemen **90**% menghasilkan **16,2** ton logam. Sisanya, **983,8** ton, menjadi terak atau tailing.

Cek satuan: ton × (%/100) × (%/100) = ton ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MASSA-LOGAM-BIJIH

ADU CEPAT

Bijih → logam

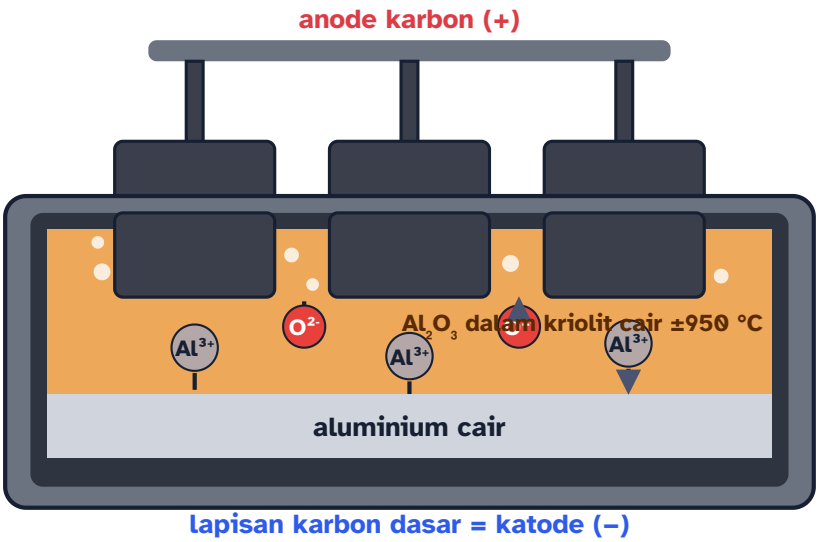
ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-9

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

m = massa bijih × kadar/100 × rendemen/100. Contoh: 1000 t × 2% × 90% = 18 t.

Aluminium dari Kuala Tanjung: logam yang harus "disetrum"

Aluminium terlalu reaktif untuk direduksi karbon: ia memeluk oksigen lebih erat daripada karbon. Bauksit dari Kalimantan Barat lebih dulu dimurnikan menjadi alumina (Al_2O_3) putih. Alumina meleleh pada 2.072 °C, terlalu panas untuk dikerjakan, jadi ia dilarutkan dalam **kriolit** cair (Na_3AlF_6) pada ±950 °C, lalu dielektrolisis.



Setengah reaksi

Katode (−), reduksi:

$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al(l)$

Anode (+), oksidasi:

$2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$

Oksigen membakar anode:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$

anode habis, diganti berkala

Sel Hall–Héroult. Ion Al^{3+} menuju katode di dasar, ion O^{2-} menuju anode karbon di atas. Reaksi totalnya $2\,Al_2O_3 \quad 4\,Al + 3\,O_2$, atau dengan anode yang terbakar, $2\,Al_2O_3 + 3\,C \quad 4\,Al + 3\,CO_2$.

Jumlah aluminium yang terbentuk sebanding dengan muatan listrik yang dialirkan. Setiap ion Al^{3+} butuh 3 elektron, dan satu mol elektron membawa muatan 96.485 coulomb (tetapan Faraday; hitungan lengkapnya di Bab 31).

RUMUS HIDUP

Aluminium dari satu sel elektrolisis

$$m_{\mathrm{Al}} = \frac{I \times t \times 27}{3 \times 96\,485} \times \frac{\eta}{100}$$

Makin besar arus dan makin lama waktunya, makin banyak elektron yang mengubah ion aluminium menjadi logam; tiga elektron untuk setiap atom Al.

- I Arus listrik kA
- t Waktu jam
- η Efisiensi arus %
- m_{Al} Massa aluminium kg

MASSA ALUMINIUM

1.531

kg

⚡ **lebih dari satu ton dari satu sel!**

Satu sel **200** kA selama **24** jam menghasilkan **1.531** kg aluminium, cukup untuk **±102.084,262** kaleng minuman (±15 g per kaleng).

Cek satuan: A × s = C; C ÷ (C/mol e⁻) ÷ 3 × (g/mol) = g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MASSA-AL-ELEKTROLISIS

KIMIA NUSANTARA · INALUM DI KUALA TANJUNG

Peleburan aluminium pertama di Indonesia, Inalum, berdiri di Kuala Tanjung, Sumatra Utara, dan mulai berproduksi pada awal 1980-an. Listriknya datang dari pembangkit listrik tenaga air di Sungai Asahan, yang airnya mengalir dari Danau Toba. Lokasi ini dipilih karena elektrolisis aluminium sangat rakus listrik: sekitar 13–15 kWh untuk setiap kilogram aluminium, setara pemakaian listrik sebuah rumah selama beberapa hari. Itulah sebabnya **mendaur ulang** kaleng aluminium sangat berharga: melelehkan aluminium bekas hanya butuh sekitar 5% energi pembuatan aluminium baru.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1886, dua pemuda berusia awal dua puluhan, **Charles Martin Hall** di Amerika Serikat dan **Paul Héroult** di Prancis, menemukan cara yang sama secara terpisah: melarutkan alumina dalam kriolit cair lalu mengelektrolisisnya. Kebetulannya berlanjut: keduanya lahir pada 1863 dan wafat pada 1914. Sebelum penemuan itu, aluminium lebih mahal daripada emas. Kaisar Napoleon III konon menjamu tamu paling terhormatnya dengan sendok aluminium, sementara tamu biasa cukup memakai sendok emas!

Nikel dan timah: dari tanah merah dan pasir hitam

Bijih nikel Sulawesi dan Maluku Utara berupa **laterit**, tanah merah hasil pelapukan batuan selama jutaan tahun di iklim tropis. Kadar nikelnya hanya ±1–2,5%, jadi jutaan ton tanah harus diolah. Ada dua jalur utama:

- **Jalur panas (pirometalurgi).** Bijih dikeringkan, dipanaskan bersama karbon di tanur putar, lalu dilebur di tanur listrik. Nikel oksida direduksi: $2\,\mathrm{NiO} + \mathrm{C} \longrightarrow 2\,\mathrm{Ni} + \mathrm{CO_2}$. Hasilnya feronikel atau "nickel pig iron" untuk baja tahan karat, atau nikel matte (dengan tambahan belerang) seperti di Sorowako.
- **Jalur basah (hidrometalurgi, HPAL).** Bijih limonit dilarutkan dalam asam sulfat pada suhu ±250 °C dan tekanan tinggi: $\mathrm{NiO} + \mathrm{H_2SO_4} \longrightarrow \mathrm{NiSO_4} + \mathrm{H_2O}$. Nikel dan kobalt diendapkan sebagai hidroksida campuran, lalu dimurnikan menjadi bahan baku baterai. Pabrik seperti ini berdiri antara lain di Morowali dan Pulau Obi.

KIMIA NUSANTARA · DARI TANAH MERAH KE BATERAI MOBIL LISTRIK

Indonesia memiliki cadangan nikel terbesar di dunia dan kini menjadi produsen nikel terbesar di dunia. Ingat teka-teki Bab 8: mengapa nikel, bukan natrium, yang dipakai di baterai? Di baterai litium-ion, ion $\mathrm{Li^+}$ bolak-balik membawa muatan, sedangkan katodenya (misalnya litium nikel mangan kobalt oksida) harus mampu **menyimpan dan melepas elektron berkali-kali**. Nikel adalah logam transisi yang bisa berganti bilangan oksidasi (+2, +3, +4) tanpa merusak strukturnya. Natrium hanya punya satu bilangan oksidasi (+1) dan logamnya bereaksi hebat dengan air.

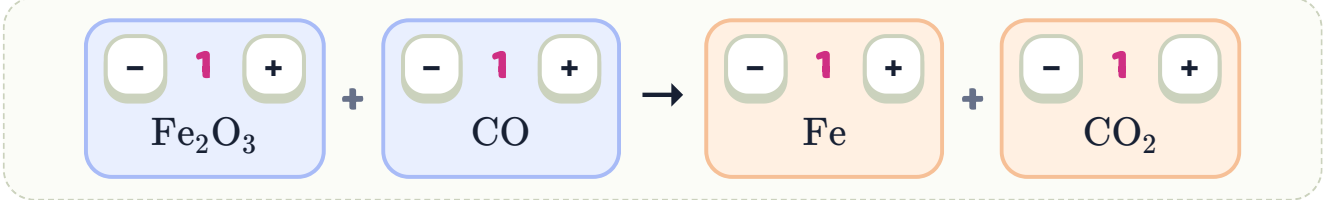
Tambang dan smelter membawa lapangan kerja, tetapi juga tantangan: hutan yang dibuka, tailing (limbah halus sisa olahan) yang harus disimpan dengan aman, dan emisi pembangkit batu bara penggerak smelter. Kimia hijau (Bab 38) mencari cara yang lebih bersih.

Timah Bangka Belitung ditambang dari pasir yang mengandung **kasiterit** ($\mathrm{SnO_2}$), mineral hitam yang sangat berat (massa jenis ±7 g/cm³). Karena berat, kasiterit dipisahkan dari pasir ringan dengan aliran air, cara yang sama seperti mendulang emas. Konsentratnya dilebur dengan karbon pada ±1.200 °C:

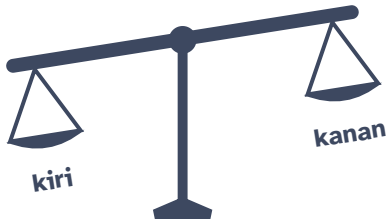
$$\mathrm{SnO_2\,(s)} + 2\,\mathrm{C\,(s)} \xrightarrow{\Delta} \mathrm{Sn\,(l)} + 2\,\mathrm{CO\,(g)}$$

Timah dipakai untuk solder elektronik, pelapis kaleng (besi berlapis timah), dan paduan **perunggu** (tembaga + timah) untuk gamelan. Lubang bekas tambang timah yang tergenang air, yang oleh warga Bangka disebut *kolong*, kini sebagian dimanfaatkan untuk kolam ikan dan wisata setelah dipulihkan.

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi pengolahan logam**



Unsur	Kiri	Kanan	
Fe	2	1	✗
O	4	2	✗
C	1	1	✓



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 9 null

Pada reaksi reduksi, setarakan logamnya dulu, lalu oksigen. Persamaan anode $O^{2-} + C$ harus setara massa **dan** muatan. Persamaan terakhir adalah ringkasan peleburan kalkopirit dari Grasberg: berapa molekul SO_2 yang keluar untuk setiap 2 atom tembaga?

COBA SENDIRI

Dari laterit Sulawesi ke baterai

Sebuah pabrik HPAL mengolah 1.000 ton bijih limonit berkadar nikel 1,8% dengan rendemen 90%. Semua nikel diubah menjadi nikel(II) sulfat heksahidrat, $NiSO_4 \cdot 6\,H_2O$, bahan baku katode baterai. (a) Berapa ton nikel yang diperoleh? (b) Berapa ton $NiSO_4 \cdot 6\,H_2O$ yang dapat dibuat? (Ar Ni = 58,7; S = 32; O = 16; H = 1)

1. (a) Massa Ni $= 1000 \times \dfrac{1{,}8}{100} \times \dfrac{90}{100} = 16{,}2$ ton.
2. $M_r\,NiSO_4 \cdot 6\,H_2O = 58{,}7 + 32 + 4(16) + 6(18) = 262{,}7$.
3. Setiap 1 mol Ni menjadi 1 mol $NiSO_4 \cdot 6\,H_2O$, jadi perbandingan massanya $262{,}7 : 58{,}7$.
4. (b) Massa garam $= 16{,}2 \times \dfrac{262{,}7}{58{,}7} = 72{,}5$ ton.

(a) 16,2 ton nikel; (b) ±72,5 ton nikel sulfat heksahidrat. Dari 1.000 ton tanah merah, hanya sekitar 1,6% yang menjadi nikel. Sisanya harus dikelola sebagai tailing.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA KARBON BISA MEREDUKSI BESI TETAPI TIDAK ALUMINIUM?

Reduksi oksida logam dengan karbon spontan bila energi bebas Gibbs totalnya negatif. Pembentukan $\mathrm{Al_2O_3}$ melepaskan energi yang sangat besar ($\Delta_f G^\circ \approx -1582$ kJ/mol, atau ±–527 kJ per mol O), jauh lebih negatif daripada $\mathrm{Fe_2O_3}$ (±–742 kJ/mol, atau ±–247 kJ per mol O). Karbon pada suhu tungku biasa tidak sanggup "membayar" sebesar itu.

Diagram Ellingham menggambarkan ΔG° pembentukan oksida terhadap suhu. Garis $2\,\mathrm{C} + \mathrm{O_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{CO}$ justru **menurun** saat suhu naik (jumlah mol gas bertambah, $\Delta S > 0$), sehingga pada suhu tinggi karbon dapat mereduksi lebih banyak oksida. Itulah sebabnya tanur bekerja sangat panas. Untuk aluminium, garis karbon baru memotongnya di atas ±2.000 °C, terlalu mahal dan sulit, sehingga elektrolisis lebih masuk akal.

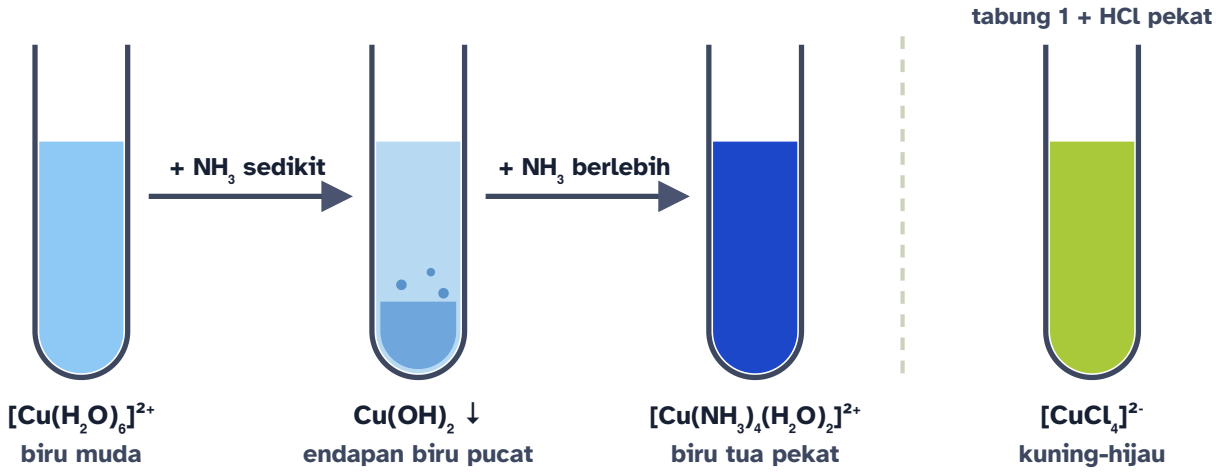
9.7 Lanjut: senyawa kompleks dan warna ion tembaga

Mengapa larutan terusi biru, padahal ion tembaga sendiri tidak "dicat"? Di dalam air, ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ tidak pernah sendirian. Enam molekul air menempel padanya, masing-masing menyumbangkan satu pasangan elektron bebas dari atom O. Gabungan itu, $[\mathrm{Cu(H_2O)_6}]^{2+}$, adalah sebuah **ion kompleks**, dan dialah yang berwarna biru.

Bahasa sederhana · Bayangkan ion tembaga sebagai magnet kecil di tengah, dikelilingi enam "tamu" (molekul air) yang menempel karena masing-masing membawa sepasang elektron. Kalau tamunya diganti, misalnya dengan amonia atau ion klorida, warna larutannya ikut berubah. Pergantian tamu itu bisa kamu lihat dengan mata!

DEFINISI · ION KOMPLEKS

Ion kompleks terdiri atas ion logam pusat yang dikelilingi **ligan**, yaitu molekul atau ion yang punya pasangan elektron bebas ($\mathrm{H_2O}$, $\mathrm{NH_3}$, $\mathrm{Cl^-}$, $\mathrm{OH^-}$, $\mathrm{CN^-}$). Setiap ligan menyumbangkan sepasang elektron membentuk **ikatan kovalen koordinasi**. Jumlah ikatan ke ion pusat disebut **bilangan koordinasi**: 2 (linear), 4 (tetrahedral atau segi empat datar), atau 6 (oktahedral).



Empat warna, satu ion tembaga(II). Yang berubah hanyalah ligan di sekelilingnya.

- Sedikit amonia membuat larutan basa, sehingga mengendap tembaga(II) hidroksida: $\mathrm{Cu^{2+}\,(aq) + 2\,OH^-\,(aq) \longrightarrow Cu(OH)_2\,(s)}$.

- Amonia berlebih melarutkan endapan itu dan mengganti empat ligan air:

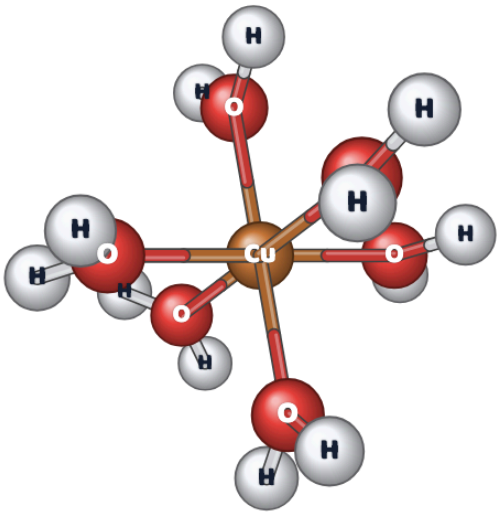
$$[Cu(H_2O)_6]^{2+} + 4\,NH_3 \rightleftharpoons [Cu(NH_3)_4(H_2O)_2]^{2+} + 4\,H_2O$$

  (biru tua).
- Asam klorida pekat mengganti semua ligan air dengan ion klorida yang lebih besar, sehingga bilangan koordinasi turun menjadi 4:

$$[Cu(H_2O)_6]^{2+} + 4\,Cl^- \rightleftharpoons [CuCl_4]^{2-} + 6\,H_2O$$

  . Muatan kompleks berubah dari 2+ menjadi 2–.

MOLEKUL 3D **Ion kompleks tembaga dan perak dalam 3D**



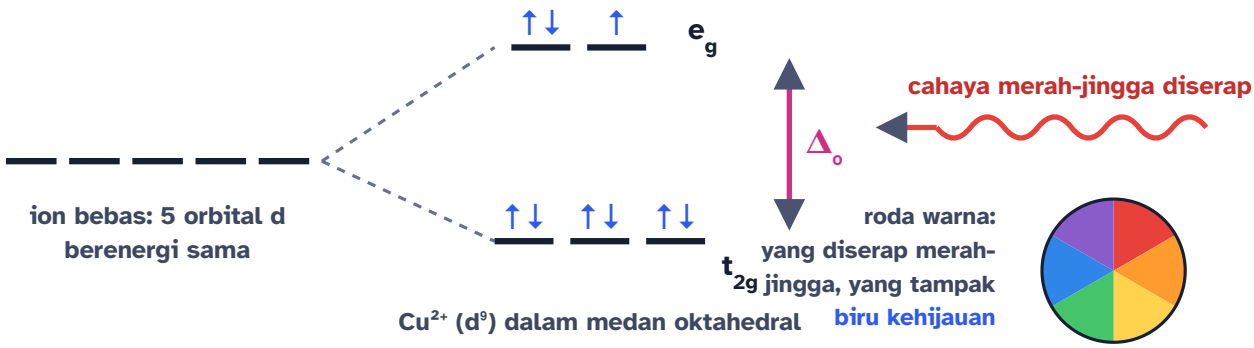
Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Ion heksaakuatembaga(II) $[Cu(H_2O)_6]^{2+}$ **Mr ≈ 171,64**

Oktahedral, bilangan koordinasi 6. Dua ikatan Cu–O aksial (±238 pm) lebih panjang daripada empat ikatan ekuatorial (±197 pm): efek Jahn–Teller yang khas untuk Cu^{2+} (d^9).

Ketuk Cu lalu dua atom ligan untuk mengukur sudut: 90° pada oktahedral, ±102–125° pada $[CuCl_4]^{2-}$, dan 180° pada $[Ag(NH_3)_2]^+$. Ketuk Cu dan O untuk membandingkan panjang ikatan aksial dan ekuatorial pada ion heksaakua.

Dari mana warnanya? Pada ion bebas, kelima orbital 3d berenergi sama. Saat enam ligan mendekat dari arah sumbu x, y, dan z, dua orbital d yang mengarah tepat ke ligan (kelompok e_g) terdorong naik energinya, sedangkan tiga lainnya (t_{2g}) turun. Selisihnya disebut **pembelahan medan kristal**, Δ_o. Elektron d dapat melompat dari t_{2g} ke e_g dengan menyerap cahaya yang energinya tepat Δ_o. Mata kita melihat warna **komplemen** dari warna yang diserap.



Ion Cu^{2+} (d^9) dalam air menyerap cahaya merah dan inframerah dekat (puncak ±800 nm), sehingga larutannya tampak biru. Ion Zn^{2+} (d^{10}) dan Sc^{3+} (d^0) tidak berwarna karena tidak ada lompatan d–d yang mungkin.

RUMUS HIDUP **Pembelahan medan kristal dari warna yang diserap**

$$\Delta_o = \frac{N_A\, h\, c}{\lambda}$$

Makin pendek panjang gelombang cahaya yang diserap, makin besar celah energi antara orbital d bawah dan atas.

λ Panjang gelombang yang diserap `nm`

Δ_o Pembelahan medan kristal `kJ/mol`

PEMBELAHAN MEDAN KRISTAL

149,5

kJ/mol

menyerap merah & inframerah dekat → tampak biru muda, seperti terusi

Kompleks yang menyerap cahaya **800** nm punya $\Delta_o \approx$ **149,5** kJ/mol dan tampak berwarna komplemennya.

Cek satuan: (1/mol)(J s)(m/s) ÷ m = J/mol → ÷ 1000 = kJ/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-CELAH-MEDAN-KRISTAL

Ligan yang berbeda membelah orbital d dengan kekuatan berbeda. Urutan kekuatannya disebut **deret spektrokimia**: $\mathrm{I^- < Br^- < Cl^- < F^- < OH^- < H_2O < NH_3 < CN^-}$. Mengganti air dengan amonia memperbesar Δ_o, sehingga cahaya yang diserap bergeser ke panjang gelombang lebih pendek (±600 nm) dan warnanya berubah dari biru muda menjadi biru tua keunguan.

Senyawa kompleks ada di mana-mana dalam tubuh dan kehidupan: **hemoglobin** mengangkut oksigen dengan ion $\mathrm{Fe^{2+}}$ di tengah cincin heme, **klorofil** daun menangkap cahaya dengan ion $\mathrm{Mg^{2+}}$ di pusatnya, dan vitamin B12 berisi kobalt. Obat kanker **sisplatin**, $\mathrm{[Pt(NH_3)_2Cl_2]}$, berbentuk segi empat datar, sedangkan EDTA "mencengkeram" ion timbal dalam pengobatan keracunan logam berat.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MEDAN KUAT, MEDAN LEMAH, DAN SIFAT MAGNET

Pada ion d^4 sampai d^7, elektron punya dua pilihan. Bila Δ_o kecil (ligan medan lemah seperti $\mathrm{H_2O}$), elektron lebih suka menyebar ke orbital e_g daripada berpasangan: **spin tinggi**. Bila Δ_o besar (ligan medan kuat seperti $\mathrm{CN^-}$), elektron memenuhi t_{2g} dulu: **spin rendah**.

Contoh $\mathrm{Fe^{2+}}$ (d^6): $\mathrm{[Fe(H_2O)_6]^{2+}}$ spin tinggi $t_{2g}^4 e_g^2$ dengan 4 elektron tak berpasangan, sehingga bersifat **paramagnetik** (ditarik magnet). $\mathrm{[Fe(CN)_6]^{4-}}$ spin rendah t_{2g}^6 tanpa elektron tak berpasangan, sehingga **diamagnetik**. Momen magnet "spin saja", $\mu = \sqrt{n(n+2)}$ magneton Bohr, memberi 4,90 untuk n = 4 dan 0 untuk n = 0.

Kimia di sekitarmu

Garam beryodium

Kalium iodat ($\mathrm{KIO_3}$) dalam garam dapur mencegah gondok. Simpan garam di wadah tertutup, jauh dari kompor yang panas dan udara lembap, supaya iodiumnya awet.

Kembang api tahun baru

Warnanya berasal dari ion logam: stronsium merah, barium hijau, natrium kuning, tembaga biru-hijau, dan magnesium putih menyilaukan. Itulah uji nyala dalam ukuran raksasa.

Air PDAM

Sedikit klorin membentuk asam hipoklorit yang membunuh bakteri penyebab diare. Sisa klorin yang kecil menjaga air tetap aman sepanjang pipa.

Balon gas pasar malam

Balon helium aman karena gas mulia tidak terbakar. Balon yang diisi hidrogen memang lebih murah, tetapi bisa meledak dan menyambar api bila dekat rokok atau lilin.

Baterai kendaraan listrik

Katode baterai litium-ion banyak memakai nikel, sebagian berasal dari laterit Sulawesi dan Maluku Utara. Nikel yang berganti biloks menyimpan muatan berkali-kali.

Gamelan perunggu

Bilah gamelan terbaik ditempa dari perunggu, paduan tembaga dengan ±20–25% timah. Timah membuatnya keras, nyaring, dan tahan karat.

Cek Cepat

Di antara logam berikut, manakah yang bereaksi paling hebat dengan air?

- Litium
- Natrium
- Kalium
- Magnesium

Air klorin ditambahkan ke larutan kalium bromida yang bening. Apa yang teramati?

- Larutan tetap bening karena tidak terjadi reaksi.
- Larutan menjadi jingga karena bromin terbentuk.
- Larutan menjadi ungu karena klorin terbentuk.
- Terbentuk endapan putih perak klorida.

Mengapa aluminium diperoleh dengan elektrolisis, bukan dengan reduksi karbon di tanur?

Karena aluminium terlalu mahal untuk dipanaskan.

Karena karbon akan meleleh sebelum aluminium terbentuk.

Karena bijih aluminium bukan berupa oksida.

Karena aluminium lebih reaktif daripada karbon sehingga terikat sangat erat pada oksigen.

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. D

Tantangan Rumah: paku berbaju tembaga

Bahan: benda tembaga yang sudah kusam (potongan kawat tembaga dari kabel bekas yang dikupas orang dewasa), cuka dapur, garam dapur, gelas kaca atau plastik bening, 2 paku besi, amplas atau sabut cuci piring, tisu, sendok plastik.

1. Bersihkan dan amplas satu paku sampai mengilap. Simpan paku kedua tanpa diproses sebagai pembanding.
2. Isi gelas dengan ±100 mL cuka. Bila cukanya berkadar 25% (lihat label), encerkan dulu: 1 bagian cuka ditambah 4 bagian air. Larutkan 1 sendok teh garam.
3. Rendam kawat tembaga yang kusam selama ±1 jam. Lapisan kusamnya larut dan larutan menyimpan sedikit ion tembaga.
4. Angkat kawatnya, lalu masukkan paku yang mengilap sampai setengahnya tercelup. Tunggu 20–60 menit.
5. Angkat paku, letakkan di atas tisu, dan bandingkan bagian yang tercelup dengan bagian yang tidak tercelup serta dengan paku pembanding.

Keselamatan: kerjakan bersama orang dewasa. Hati-hati dengan ujung paku dan kawat yang tajam. Cuka dapat memedihkan mata, jadi jangan mengucek mata dan pakai kacamata bila ada. Jangan mencicipi larutan. Buang sisa larutan ke wastafel sambil dialiri banyak air (jangan ke kolam ikan), lalu cuci tangan dan gelas dengan sabun.

Pertanyaan: Warna apa yang menempel di paku? Logam mana yang lebih reaktif, besi atau tembaga? Tuliskan persamaan ionnya, lalu cocokkan dengan Lab Mini "Laboratorium pendesakan" di subbab 9.5.

RINGKASAN KILAT **Bab 9 dalam 3 menit**

☑ **Kamu sekarang bisa...**

- menjelaskan sifat dan **kecenderungan reaktivitas** logam alkali, alkali tanah, halogen, dan gas mulia, lalu menulis persamaan reaksinya
- meramalkan **reaksi pendesakan** halogen dan logam memakai deret keaktifan (deret volta)
- menjelaskan perubahan sifat unsur dan **oksida periode 3** dari basa, amfoter, sampai asam
- mengenali ciri **logam transisi** (ion berwarna, bilangan oksidasi beragam, katalis) dan dasar **senyawa kompleks**
- menjelaskan **pengolahan logam** (besi, aluminium, nikel, timah) dan menghitung kadar serta massa logam dari bijih Nusantara

🔑 Istilah kunci

Logam alkali · halogen · Oksida amfoter · logam transisi · deret keaktifan · deret volta · bijih · Ion kompleks · ligan · bilangan koordinasi · pembelahan medan kristal · deret spektrokimia

🧮 Rumus penting

$$\%\,\text{logam} = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Kadar logam dalam mineral bijih. Dari rumus mineralnya, kita tahu berapa bagian massanya yang benar-benar logam.

$$m_{\text{logam}} = m_{\text{bijih}} \times \frac{w}{100} \times \frac{\eta}{100}$$

Massa logam dari bijih (dengan rendemen). Logam yang didapat sama dengan massa bijih dikali kadar logamnya, lalu dikali rendemen (persen keberhasilan) prosesnya.

$$m_{\text{Al}} = \frac{I \times t \times 27}{3 \times 96\,485} \times \frac{\eta}{100}$$

Aluminium dari satu sel elektrolisis. Makin besar arus dan makin lama waktunya, makin banyak elektron yang mengubah ion aluminium menjadi logam; tiga elektron untuk setiap atom Al.

$$\Delta_o = \frac{N_A\, h\, c}{\lambda}$$

Pembelahan medan kristal dari warna yang diserap. Makin pendek panjang gelombang cahaya yang diserap, makin besar celah energi antara orbital d bawah dan atas.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Logam alkali hanya boleh diperagakan oleh guru, tidak pernah dicoba sendiri di rumah.
- Arah tren reaktivitas golongan 1 dan golongan 17 berlawanan.
- Saat logam transisi menjadi ion, elektron 4s dilepas lebih dulu, baru elektron 3d.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=9

Teka-teki untuk Bab 10

Natrium meledak-ledak di dalam air, dan klorin adalah gas beracun yang menyesakkan. Namun gabungan keduanya, natrium klorida, justru kita taburkan di sayur setiap hari. Bagaimana dua unsur berbahaya bisa melahirkan senyawa yang aman dimakan?

▼ **Intip petunjuk**

Natrium yang royal menyerahkan satu elektron kepada klorin yang rakus. Keduanya berubah menjadi ion Na^{+} dan Cl^{-} yang susunan elektronnya menyerupai gas mulia, sehingga jauh lebih stabil dan "tenang". Ion-ion itu saling tarik membentuk kisi kristal. Sifat senyawa bisa sangat berbeda dari unsur penyusunnya. Di Bab 10 kita mempelajari **ikatan ion**.

10 Ikatan Ion: Satu Elektron yang Berpindah Tangan

Natrium bereaksi hebat bila tercebur air, sedangkan klorin adalah gas beracun. Namun ketika keduanya bertemu, lahirlah garam dapur yang setiap hari kita taburkan di sayur. Rahasianya: satu elektron yang berpindah tangan.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan kestabilan gas mulia dan **aturan oktet**, lalu meramalkan ion yang dibentuk suatu unsur;
- menggambarkan pembentukan **ikatan ion** dengan **diagram titik-silang**;
- menuliskan **rumus senyawa ion** dari muatan ionnya, termasuk senyawa dengan **ion poliatom**;
- menjelaskan **kisi kristal** NaCl dan **sifat-sifat senyawa ion** (titik leleh, kegetasan, daya hantar listrik);
- menghitung **energi kisi** dengan siklus Born–Haber dan menjelaskan karakter kovalen dengan **aturan Fajans**.

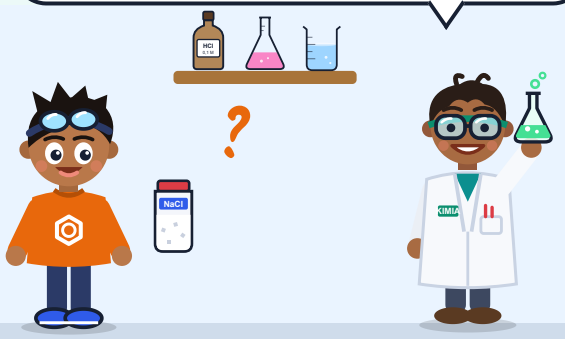
SATU ELEKTRON UNTUK KLORIN

KOMIK · 4 PANEL

Sore hari, di laboratorium sekolah

BIMA
Kak, natrium itu meledak kalau kena air, klorin gas beracun. Kok gabungannya malah kita taburkan di sayur asem?

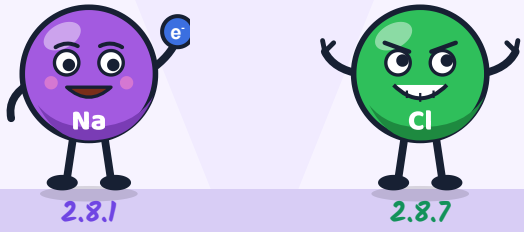
KAK TIRTA
Rahasianya satu elektron yang pindah tangan. Ayo kita intip dunia atomnya!

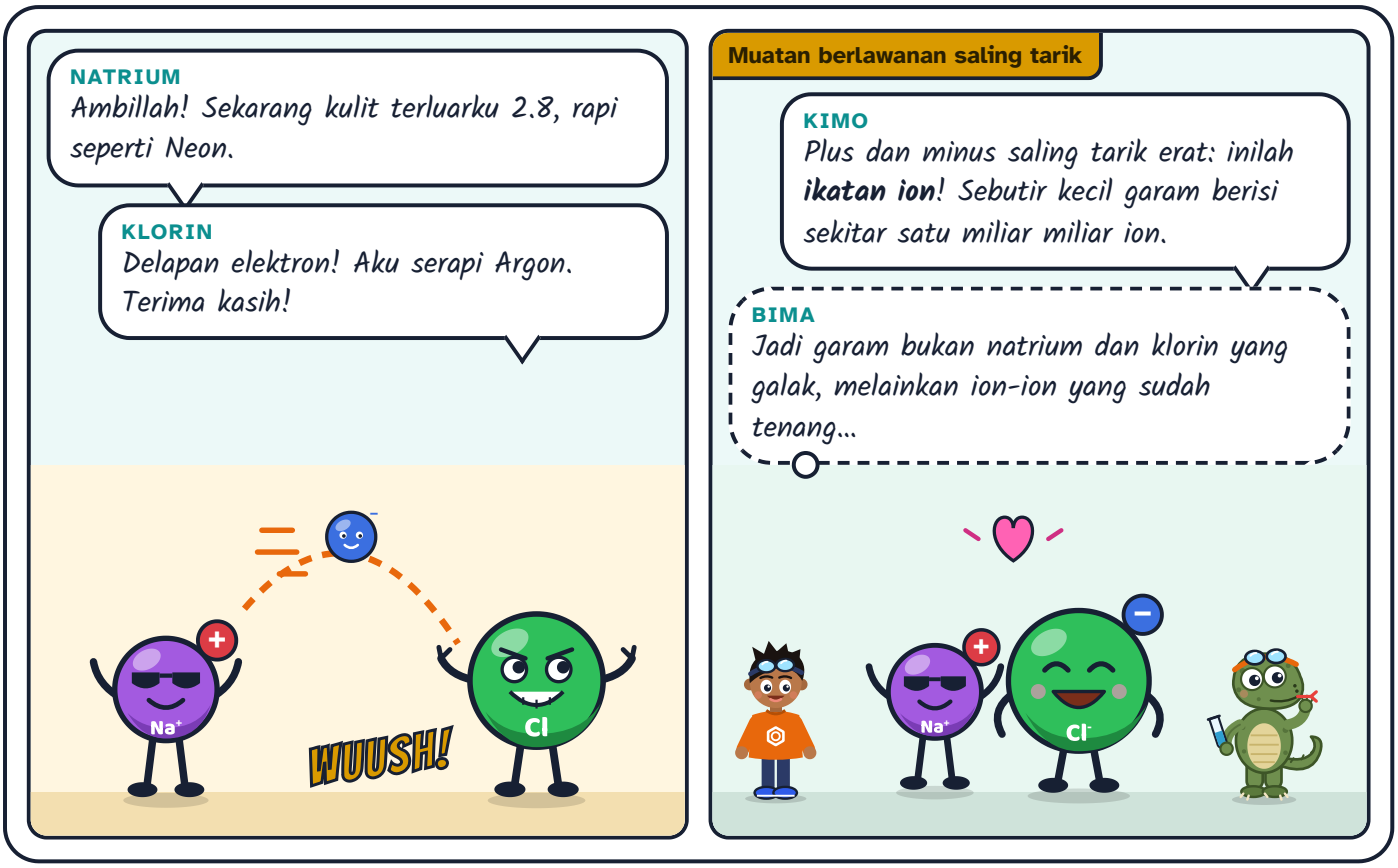


Sementara itu, di dunia atom...

NATRIUM
Satu elektron di kulit terluarku ini bikin repot. Ada yang mau?

KLORIN
MAU! Aku tinggal butuh SATU lagi supaya kulitku penuh!





Tebak Dulu!

Garam dapur tersusun dari natrium (logam yang bereaksi hebat dengan air) dan klorin (gas beracun). Mengapa garam aman dimakan?

Karena natrium dan klorinnya menguap habis saat garam dijemur di tambak.

Karena di dalam garam, natrium dan klorin hanya tercampur dalam jumlah terlalu sedikit untuk berbahaya.

Karena natrium dan klorin sudah berubah menjadi ion Na^+ dan Cl^- yang stabil, dengan sifat yang sama sekali baru.

Karena garam laut berbeda dengan natrium klorida buatan pabrik.

Jawabannya: natrium dan klorin sudah menjadi ion. Garam bukan campuran logam natrium dan gas klorin. Setiap atom natrium telah memberikan satu elektron kepada atom klorin. Hasilnya ion Na^+ dan Cl^- yang susunan elektronnya serapi gas mulia, sehingga tidak lagi "galak". Senyawa selalu punya sifat baru yang berbeda dari unsur-unsur penyusunnya.

10.1 Gas mulia yang "cuek" dan aturan oktet

Di Klub Unsur ada satu anggota yang selalu santai: **Ne** si bangsawan bermahkota. Diajak bereaksi dengan siapa pun, ia menolak. Helium, neon, dan argon di alam ditemukan sebagai atom-atom tunggal yang tidak bergandengan dengan atom lain. Mengapa mereka begitu "puas diri"?

Jawabannya ada pada susunan elektronnya (Bab 7). Kulit terluar gas mulia sudah **penuh**: helium punya 2 elektron, sedangkan neon, argon, dan seterusnya punya 8 elektron di kulit terluar.

Gas mulia	Nomor atom	Susunan elektron per kulit	Elektron kulit terluar
Helium, He	2	2	2 (duplet)
Neon, Ne	10	2 . 8	8 (oktet)
Argon, Ar	18	2 . 8 . 8	8
Kripton, Kr	36	2 . 8 . 18 . 8	8
Xenon, Xe	54	2 . 8 . 18 . 18 . 8	8

Bahasa sederhana · Bayangkan kulit terluar atom sebagai rak telur dengan 8 lubang. Rak milik gas mulia sudah penuh, jadi mereka tenang. Atom lain raknya belum penuh. Ada yang hanya berisi 1 atau 2 butir, sehingga lebih mudah dikosongkan saja. Ada juga yang sudah berisi 6 atau 7 butir, sehingga tinggal ditambah sedikit.

DEFINISI · ELEKTRON VALENSI DAN ATURAN OKTET

Elektron valensi adalah elektron di kulit terluar atom. **Aturan oktet**: atom-atom cenderung bereaksi sampai susunan elektronnya menyerupai gas mulia terdekat, yaitu memiliki 8 elektron di kulit terluar. Atom kecil seperti H, Li, dan Be cukup memiliki 2 elektron (**duplet**), seperti helium.

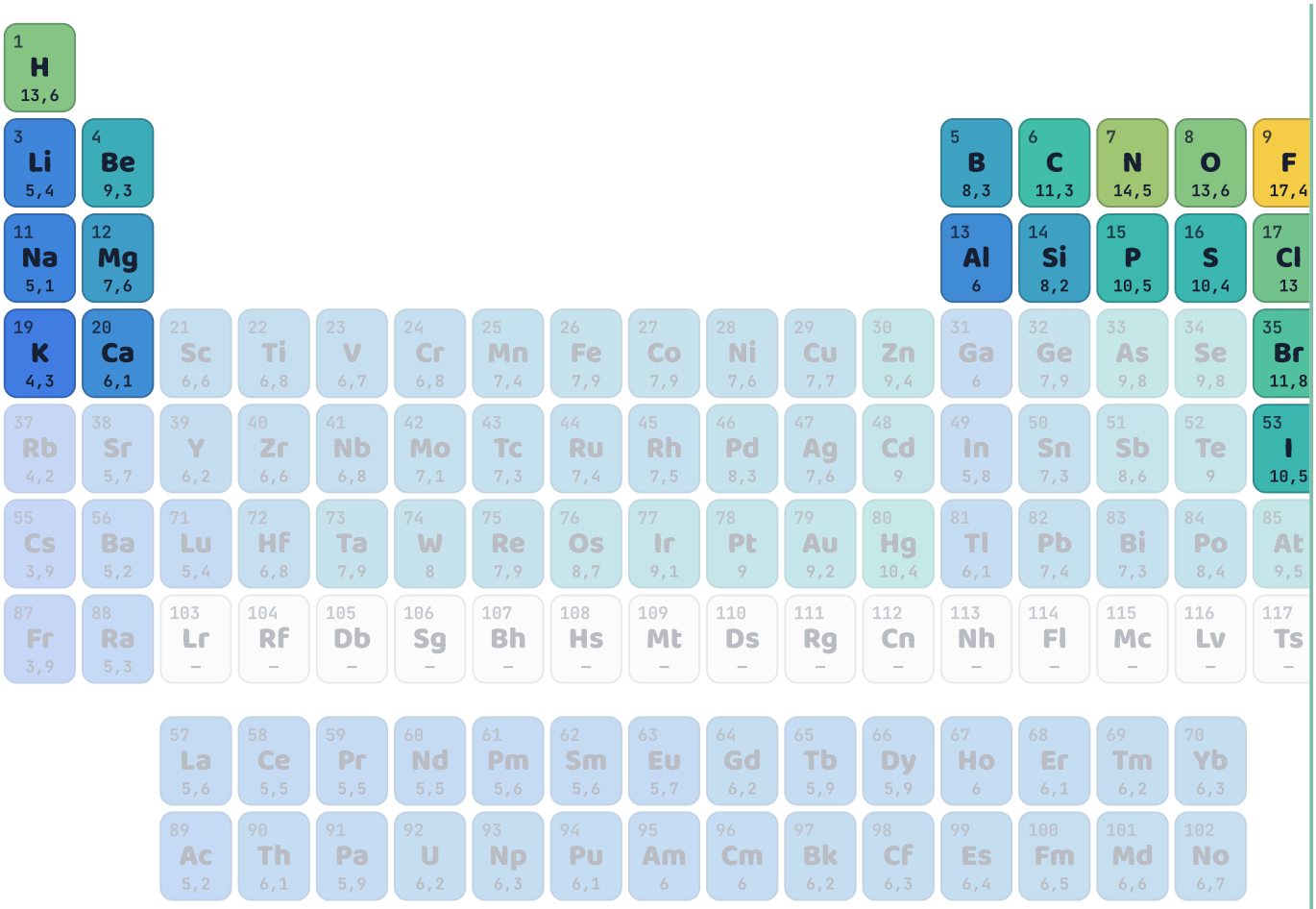
Untuk unsur golongan utama, jumlah elektron valensi sama dengan angka satuan nomor golongannya: **Na** (golongan 1) punya 1, **Mg** (golongan 2) punya 2, **Al** (golongan 13) punya 3, **O** (golongan 16) punya 6, dan **Cl** (golongan 17) punya 7.

Ada dua jalan pintas menuju oktet:

- **Melepas** elektron valensi yang sedikit. Ini jalan para **logam** di sisi kiri tabel periodik, yang energi ionisasinya rendah. Hasilnya ion positif.
- **Menerima** elektron sampai kulitnya penuh. Ini jalan para **nonlogam** di sisi kanan, yang afinitas elektronnya besar. Hasilnya ion negatif.

TABEL PERIODIK HIDUP **Siapa pelepas, siapa penerima elektron?**

Warnai menurut Energi ionisasi pertama



Warnai menurut **energi ionisasi**: logam golongan 1 dan 2 bernilai paling rendah, artinya elektron valensinya paling mudah dilepas. Ganti ke **afinitas elektron**: halogen (golongan 17) paling besar, artinya paling bersemangat menerima elektron. Ketuk sebuah unsur untuk melihat susunan elektronnya.

TRIK KAK TIRTA · GOLONGAN MENENTUKAN MUATAN ION

Golongan 1 → **+1**, golongan 2 → **+2**, golongan 13 → **+3**, golongan 15 → **−3**, golongan 16 → **−2**, golongan 17 → **−1**. Logam "membuang" sedikit, nonlogam "mengambil" sedikit: selalu jalan terpendek menuju gas mulia. Golongan 14 (karbon, silikon) jalannya sama jauh ke dua arah (4 elektron), jadi lebih suka berbagi elektron. Itu cerita Bab 11.

AWAS JEBAKAN

Natrium sebenarnya tidak "senang" melepas elektron: proses itu justru menyerap 496 kJ/mol. Menambahkan satu elektron ke klorin hanya melepas 349 kJ/mol. Jadi mengubah atom Na dan Cl (gas) menjadi ion Na^{+} dan Cl^{-} masih **rugi** 147 kJ/mol! Yang membuat garam stabil adalah energi sangat besar yang dilepas ketika ion-ion berlawanan muatan berkumpul dan saling tarik dalam kisi (lihat 10.6). Kalimat "atom ingin seperti gas mulia" hanyalah cara singkat untuk mengingat muatan ion, bukan alasan sebenarnya.

10.2 Dari atom menjadi ion: diagram titik-silang

Ketika atom melepas atau menerima elektron, jumlah proton tidak lagi sama dengan jumlah elektron. Atom itu menjadi bermuatan listrik dan disebut **ion**.

DEFINISI · KATION DAN ANION

Kation adalah ion bermuatan positif, terbentuk saat atom melepas elektron (biasanya logam). **Anion** adalah ion bermuatan negatif, terbentuk saat atom menerima elektron (biasanya nonlogam). Nama anion satu atom berakhiran *-ida*: klorida, oksida, sulfida, nitrida.

$$\mathrm{Na} \longrightarrow \mathrm{Na^+} + \mathrm{e^-} \qquad\qquad \mathrm{Cl} + \mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{Cl^-}$$

Hitung partikelnya. Atom Na punya 11 proton dan 11 elektron, jadi netral. Ion $\mathrm{Na^+}$ tetap punya 11 proton tetapi hanya 10 elektron, sehingga muatannya +1. Susunan elektron $\mathrm{Na^+}$ (2.8) sama persis dengan neon: keduanya **isoelektronik**. Ion $\mathrm{Cl^-}$ (17 proton, 18 elektron, 2.8.8) isoelektronik dengan argon.

Bahasa sederhana · Ingat: proton tidak pernah ikut pindah. Yang berpindah hanya elektron, partikel mungil bermuatan negatif. Kehilangan "barang negatif" membuat atom menjadi positif. Mendapat "barang negatif" membuat atom menjadi negatif.

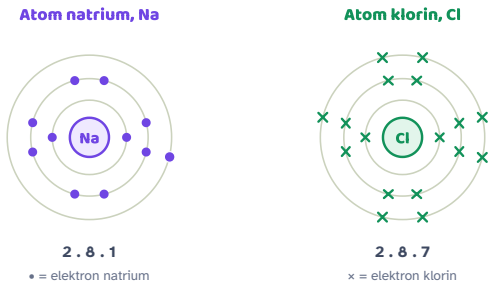


Jari-jari atom dan ion dalam pikometer (1 pm = 10^{-12} m). Kation lebih kecil daripada atomnya karena kehilangan seluruh kulit terluar. Anion lebih besar karena elektron tambahan saling tolak.

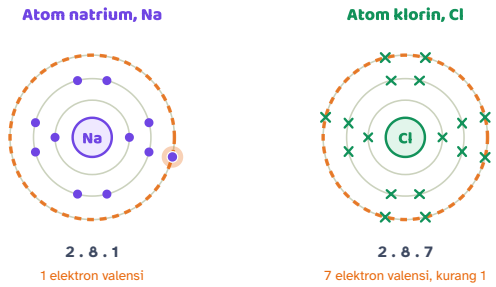
Lalu apa yang menyatukan $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$? Muatan berlawanan saling tarik, seperti kutub utara dan selatan magnet.

ATURAN · IKATAN ION

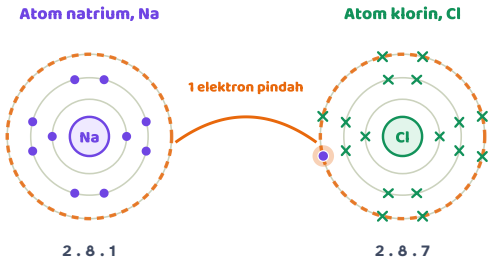
Ikatan ion adalah gaya tarik elektrostatik yang kuat antara ion-ion bermuatan berlawanan. Ikatan ion umumnya terbentuk antara **logam** (energi ionisasi rendah) dan **nonlogam** (afinitas elektron besar). Jumlah elektron yang dilepas logam selalu sama dengan jumlah elektron yang diterima nonlogam.



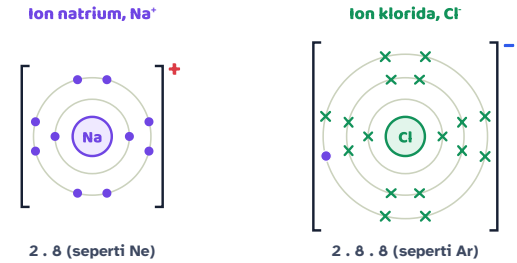
Langkah 1. Atom natrium (2.8.1) dan atom klorin (2.8.7) sama-sama netral. Elektron natrium digambar titik (•), elektron klorin digambar silang (×), supaya asal setiap elektron mudah dilacak.



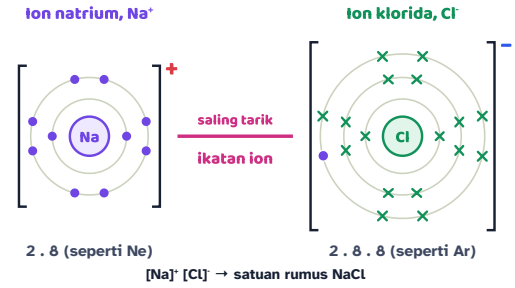
Langkah 2. Perhatikan kulit terluar. Natrium hanya punya 1 elektron valensi, sedangkan klorin punya 7 dan kurang 1 untuk oktet.



Langkah 3. Satu elektron berpindah dari Na ke Cl. Di diagram, titik itu kini duduk di antara silang-silang milik klorin.



Langkah 4. Natrium kehilangan kulit terluarnya dan menjadi Na^{+} (2.8, seperti Ne). Klorin menjadi Cl^{-} (2.8.8, seperti Ar). Ion ditulis di dalam kurung siku dengan muatan di pojok kanan atas.

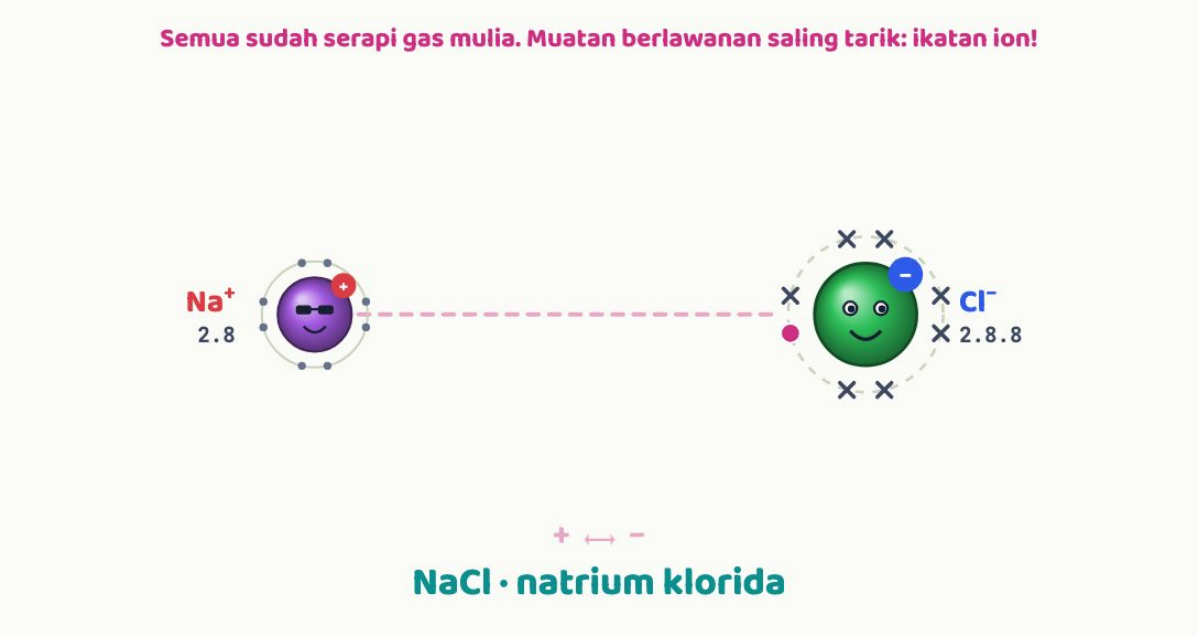


Langkah 5. Ion positif dan ion negatif saling tarik secara elektrostatik. Gaya tarik inilah **ikatan ion**.

Cara menggambar ini disebut **diagram titik-silang**. Titik dan silang hanya penanda asal: di alam, semua elektron identik.

LAB MINI Klub Unsur bertukar elektron

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-10

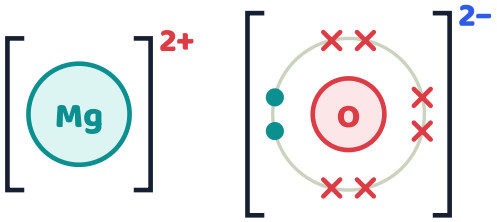


Elektron berpindah	Logam	Nonlogam
1 dari 1	Na^+ (2.8, seperti Ne)	Cl^- (2.8.8, seperti Ar)

Senyawa: NaCl (natrium klorida)

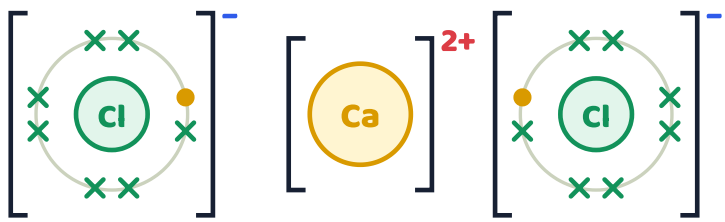
Seret elektron valensi logam (titik magenta) ke atom nonlogam, atau tekan ▶ Jalankan. Coba "Magnesium + oksigen": berapa elektron yang harus pindah? Lalu "2 aluminium + 3 oksigen": mengapa butuh 2 atom Al dan 3 atom O? Perhatikan juga ukuran atom yang berubah setelah menjadi ion.

Magnesium oksida, MgO



Mg^{2+} (2.8) O^{2-} (2.8)

Kalsium klorida, $CaCl_2$



Cl^- (2.8.8) Ca^{2+} (2.8.8) Cl^- (2.8.8)

• = elektron dari logam · × = elektron milik nonlogam

Diagram titik-silang untuk ujian cukup menampilkan kulit terluar. Mg memberi 2 elektron kepada satu atom O. Ca juga melepas 2 elektron, tetapi setiap atom Cl hanya butuh 1, sehingga diperlukan dua atom Cl.

CONTOH **Pembentukan magnesium oksida**

Pita magnesium (Z = 12) dibakar di udara dan bereaksi dengan oksigen (Z = 8), menghasilkan abu putih magnesium oksida. Jelaskan pembentukan ikatannya dan tuliskan rumusnya.

1. Susunan elektron: Mg 2.8.2 (2 elektron valensi), O 2.6 (kurang 2 untuk oktet).
2. Magnesium melepas 2 elektron: $\mathrm{Mg} \longrightarrow \mathrm{Mg}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^-$, susunannya menjadi 2.8 (seperti Ne).
3. Oksigen menerima 2 elektron itu: $\mathrm{O} + 2\,\mathrm{e}^- \longrightarrow \mathrm{O}^{2-}$, susunannya menjadi 2.8 (juga seperti Ne).
4. Muatan +2 dan −2 sudah saling meniadakan dengan perbandingan 1 : 1.

Rumusnya MgO. Karena muatan ionnya ganda, tarikan antarionnya jauh lebih kuat daripada di NaCl: MgO baru meleleh pada 2.852 °C dan dipakai sebagai pelapis tahan api di dalam tungku industri.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1916, fisikawan Jerman **Walther Kossel** mengusulkan bahwa atom membentuk ion dengan melepas atau menerima elektron sampai susunannya menyerupai gas mulia. Pada tahun yang sama, kimiawan Amerika **Gilbert N. Lewis** menggambar elektron valensi sebagai titik-titik di sekeliling lambang unsur, cikal bakal diagram titik-silang. Tiga tahun kemudian **Irving Langmuir** mempopulerkan istilah *oktet*.

10.3 Menulis rumus senyawa ion

Senyawa ion selalu **netral**: total muatan positif sama dengan total muatan negatif. Dari prinsip sederhana ini, kita dapat menulis rumus senyawa ion apa pun, asalkan tahu muatan ion-ionnya.

ATURAN · MENULIS RUMUS SENYAWA ION

1. Tulis kation lebih dulu, lalu anion.
2. Pilih jumlah setiap ion supaya total muatannya nol.
3. Pakai perbandingan bilangan bulat terkecil.
4. Bila ion poliatom muncul lebih dari satu, beri tanda kurung: $\mathrm{Ca(OH)_2}$, bukan $\mathrm{CaOH_2}$.
5. Muatan ion tidak ditulis di dalam rumus senyawa.

TRIK KAK TIRTA · SILANG MUATAN

Tulis kedua ion dengan muatannya, lalu "silangkan" angka muatan menjadi indeks ion lawannya, kemudian sederhanakan. $\mathrm{Al^{3+}}$ dan $\mathrm{O^{2-}}$ → $\mathrm{Al_2O_3}$. $\mathrm{Mg^{2+}}$ dan $\mathrm{O^{2-}}$ → $\mathrm{Mg_2O_2}$ → MgO. Silang muatan hanyalah jalan pintas supaya total muatannya nol: cek selalu, 2 × (+3) + 3 × (−2) = 0 ✔.

RUMUS HIDUP

Silang muatan: berapa kation dan anion?

$$x : y = \frac{b}{\text{FPB}} : \frac{a}{\text{FPB}}$$

x kation dan y anion: x sama dengan besar muatan anion, y sama dengan besar muatan kation, lalu keduanya dibagi FPB (faktor persekutuan terbesar) dari a dan b.

- a Muatan kation (+a)
- b Besar muatan anion (–b)
- x Jumlah kation per satuan rumus

JUMLAH KATION PER SATUAN RUMUS

2

contoh: Al_2O_3, Fe_2O_3, $Al_2(SO_4)_3$

Rumus umum: M_2X_3. Cek muatan: **2** × (+**3**) + **3** × (–**2**) = **0** ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-SILANG-MUATAN

Banyak ion terdiri atas beberapa atom yang terikat kuat satu sama lain dan membawa muatan bersama. Ion seperti ini disebut **ion poliatom**. Di dalam kisi, ion poliatom berperilaku seperti satu "ion besar" yang tidak terpecah.

Muatan	Ion monoatomik	Ion poliatom
+1	natrium Na^+, kalium K^+, perak Ag^+	amonium NH_4^+
+2	magnesium Mg^{2+}, kalsium Ca^{2+}, barium Ba^{2+}, seng Zn^{2+}, besi(II) Fe^{2+}, tembaga(II) Cu^{2+}	–
+3	aluminium Al^{3+}, besi(III) Fe^{3+}	–
–1	fluorida F^-, klorida Cl^-, bromida Br^-, iodida I^-	hidroksida OH^-, nitrat NO_3^-, hidrogen karbonat HCO_3^-
–2	oksida O^{2-}, sulfida S^{2-}	sulfat SO_4^{2-}, karbonat CO_3^{2-}
–3	nitrida N^{3-}	fosfat PO_4^{3-}

Bahasa sederhana · Angka romawi pada besi(II) dan besi(III) bukan jumlah atom, melainkan muatan ion besi. Besi bisa membentuk dua macam ion, jadi namanya harus menyebut yang mana.

LAB MINI **Mak Comblang Ion: jodohkan sampai netral**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-10



Muatan total	Rumus	Nama	Misi
+1	–	–	–

Pilih kation dan anion, lalu ketuk kolam kiri atau kanan (atau tombol ➕) sampai muatan total nol. Rumus dan nama tertulis otomatis, lengkap dengan kurung untuk ion poliatom. Coba aluminium + sulfat dan amonium + fosfat. Bagaimana bila kamu membuat Mg_2O_2? Nyalakan **Mode misi** untuk menyusun senyawa dari namanya.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Tanda kurung hanya untuk ion poliatom yang jumlahnya lebih dari satu. $CaOH_2$ berarti satu atom O dan dua atom H, padahal maksudnya dua ion OH^-: yang benar $Ca(OH)_2$. Sebaliknya, NaOH tidak perlu ditulis Na(OH). Jangan pula mengubah rumus ion poliatom: sulfat selalu SO_4^{2-}, jadi aluminium sulfat ditulis $Al_2(SO_4)_3$, bukan $Al_2S_3O_{12}$.

KERJAKAN BERSAMA

Pupuk ZA untuk sawah

Pupuk ZA (dari bahasa Belanda *zwavelzure ammoniak*) adalah amonium sulfat. Tuliskan rumusnya, lalu hitung jumlah setiap jenis atom dan jumlah ion dalam satu satuan rumus.

1. Ion-ionnya: amonium $\mathrm{NH_4^+}$ (+1) dan sulfat $\mathrm{SO_4^{2-}}$ (–2).
2. Supaya netral, setiap ion sulfat butuh dua ion amonium: 2(+1) + (–2) = 0.
3. Amonium adalah ion poliatom dan muncul dua kali, jadi diberi kurung: $\mathrm{(NH_4)_2SO_4}$.
4. Hitung atom: N = 2, H = 2 × 4 = 8, S = 1, O = 4, total 15 atom dalam 3 ion.

$\mathrm{(NH_4)_2SO_4}$: 2 N, 8 H, 1 S, dan 4 O. Satu karung ZA menyumbang dua unsur hara sekaligus bagi padi: nitrogen dan belerang.

COBA SENDIRI

Rahasia tulang dan gigi

(a) Tuliskan rumus kalsium fosfat. (b) Mineral tulang dan email gigi sebenarnya adalah *hidroksiapatit*, yang tersusun atas 5 ion $\mathrm{Ca^{2+}}$, 3 ion $\mathrm{PO_4^{3-}}$, dan 1 ion $\mathrm{OH^-}$. Tuliskan rumusnya dan buktikan bahwa senyawa itu netral.

1. (a) $\mathrm{Ca^{2+}}$ dan $\mathrm{PO_4^{3-}}$: silang muatan memberi 3 Ca dan 2 $\mathrm{PO_4}$. Cek: 3(+2) + 2(–3) = 0.
2. Fosfat muncul dua kali, jadi rumusnya $\mathrm{Ca_3(PO_4)_2}$.
3. (b) Tulis kation dulu, lalu anion: $\mathrm{Ca_5(PO_4)_3OH}$.
4. Cek muatan: 5(+2) + 3(–3) + 1(–1) = 10 – 9 – 1 = 0 ✔.

(a) $\mathrm{Ca_3(PO_4)_2}$; (b) $\mathrm{Ca_5(PO_4)_3OH}$, netral. Fluorida dalam pasta gigi menggantikan sebagian ion $\mathrm{OH^-}$ dengan $\mathrm{F^-}$ (muatannya sama!) sehingga terbentuk fluorapatit, $\mathrm{Ca_5(PO_4)_3F}$, yang lebih tahan asam dari sisa makanan manis.

ADU CEPAT **Silang muatan kilat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-10

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

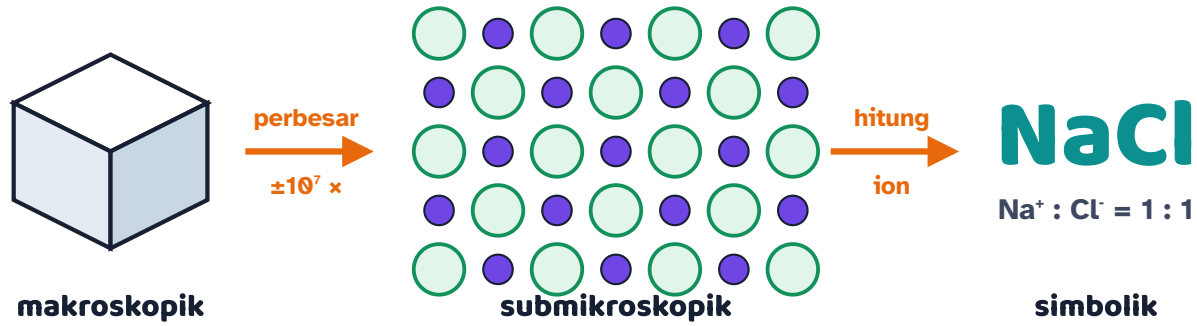
Jumlah kation = b, jumlah anion = a, lalu sederhanakan. Contoh: Al^{3+} dan O^{2-} → Al_2O_3 → 5 ion.

KIMIA NUSANTARA · KAPUR SIRIH, TAWAS, DAN GIPS

Kapur sirih, $\mathrm{Ca(OH)_2}$, dibuat dari cangkang kerang atau batu kapur yang dibakar menjadi kapur tohor (CaO), lalu disiram air. Rendaman air kapur sirih membuat keripik dan manisan pepaya lebih renyah karena ion $\mathrm{Ca^{2+}}$ "mengikat" pektin di dinding sel buah. **Tawas**, $\mathrm{KAl(SO_4)_2 \cdot 12\,H_2O}$, dipakai menjernihkan air sumur dan sebagai deodoran tradisional. **Gips**, $\mathrm{CaSO_4 \cdot 2\,H_2O}$, dipakai untuk plafon rumah dan pembalut patah tulang. Cek: (+1) + (+3) + 2(−2) = 0 ✔.

10.4 Kisi kristal raksasa: tidak ada "molekul" NaCl

Ambil sejumput garam dan amati dengan kaca pembesar atau kamera HP yang diperbesar. Butirnya berbentuk **kubus** kecil dengan permukaan rata dan sudut siku! Bentuk itu adalah petunjuk tentang susunan ion di dalamnya.



Garam dapur pada tiga tingkat: yang kita lihat (butir kubus), yang tak terlihat (ion-ion tersusun selang-seling), dan yang kita tulis (NaCl, perbandingan ion 1 : 1).

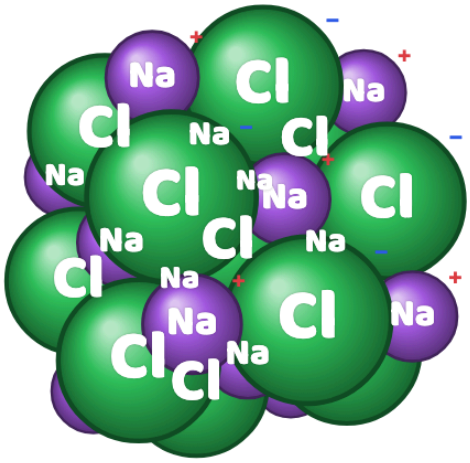
Di dalam sebutir garam, ion $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$ tidak berpasang-pasangan. Mereka tersusun selang-seling ke tiga arah (depan-belakang, kiri-kanan, atas-bawah), membentuk **kisi kristal raksasa**. Setiap ion ditarik oleh **semua** tetangga yang bermuatan lawan, bukan hanya oleh satu "pasangan".

DEFINISI · KISI ION DAN BILANGAN KOORDINASI

Kisi ion adalah susunan teratur dan berulang dari ion positif dan ion negatif dalam tiga dimensi. **Bilangan koordinasi** adalah jumlah ion lawan terdekat yang mengelilingi sebuah ion. Dalam NaCl bilangan koordinasinya 6 : 6, yaitu setiap $\mathrm{Na^+}$ dikelilingi 6 ion $\mathrm{Cl^-}$ dan setiap $\mathrm{Cl^-}$ dikelilingi 6 ion $\mathrm{Na^+}$, membentuk oktahedron.

MOLEKUL 3D

Kisi raksasa NaCl: hitung tetangganya!



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Kisi natrium klorida (NaCl) NaCl

Setiap ion Na^+ dikelilingi 6 ion Cl^- dan sebaliknya (bilangan koordinasi 6). Tidak ada "molekul" NaCl, yang ada kisi raksasa.

Model **isi ruang** menunjukkan ion-ion yang menempel rapat. Ganti ke **bola-tongkat**: garis putus-putus hanya menandai tetangga terdekat, bukan "pasangan". Hitung ion Na^+ di sekeliling Cl^- yang di tengah, dan ketuk dua ion bertetangga untuk mengukur jaraknya (±282 pm). Lalu pilih CsCl: berapa tetangga Cs^+?

Bahasa sederhana · Bayangkan papan catur yang ditumpuk bertingkat-tingkat. Kotak hitam adalah Na^+ dan kotak putih adalah Cl^-. Setiap kotak hitam selalu bertetangga dengan kotak putih di depan, belakang, kiri, kanan, atas, dan bawahnya. Itulah 6 tetangga!

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Tidak ada molekul NaCl di dalam kristal garam. Rumus NaCl hanya menyatakan **satuan rumus**: perbandingan ion $\mathrm{Na}^+ : \mathrm{Cl}^- = 1:1$ di seluruh kisi. Karena itu, untuk senyawa ion kita memakai istilah "massa rumus relatif" dan "satuan rumus", bukan "molekul". Pasangan NaCl yang terpisah hanya ada dalam uap garam pada suhu sangat tinggi.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1913, ayah dan anak **William Henry Bragg** dan **William Lawrence Bragg** menembakkan sinar-X ke kristal garam. Pola pantulannya menunjukkan ion natrium dan klorida tersusun selang-seling dalam kubus, tanpa pasangan NaCl yang terpisah. Sebagian kimiawan saat itu sulit menerima bahwa "molekul garam" tidak ada! Keduanya meraih Nobel Fisika 1915, dan Lawrence yang baru berusia 25 tahun menjadi peraih Nobel Fisika termuda sepanjang sejarah.

KIMIA NUSANTARA · GARAM MADURA DAN GARAM BERYODIUM

Air laut mengandung ±3,5% garam terlarut, sebagian besar NaCl. Petani garam di Madura mengalirkan air laut ke petak-petak tambak dan membiarkan matahari serta angin menguapkan airnya. Saat larutan lewat jenuh, ion $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$ menyusun diri menjadi kristal kubus. Garam krosok terasa sedikit pahit karena ikut membawa ion $\mathrm{Mg^{2+}}$. Untuk mencegah gondok, garam konsumsi wajib ditambah kalium iodat, $\mathrm{KIO_3}$, yang mengandung ion poliatom $\mathrm{IO_3^-}$.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SEL SATUAN DAN RASIO JARI-JARI

Pola kisi NaCl dapat diringkas dalam satu kubus kecil yang berulang, disebut **sel satuan**. Ion di sudut kubus dipakai bersama 8 sel, ion di sisi 2 sel, ion di rusuk 4 sel, dan ion di pusat milik 1 sel saja. Untuk sel satuan NaCl (rusuk ±564 pm):

- $\mathrm{Cl^-}$: 8 sudut × ⅛ + 6 sisi × ½ = 4 ion;
- $\mathrm{Na^+}$: 12 rusuk × ¼ + 1 pusat × 1 = 4 ion.

Jadi satu sel satuan berisi 4 satuan rumus NaCl. Mengapa NaCl memilih koordinasi 6 sedangkan CsCl koordinasi 8? Bandingkan **rasio jari-jari** r_+/r_-. Semakin besar kation, semakin banyak anion yang muat di sekelilingnya. Kira-kira: rasio 0,225–0,414 memberi koordinasi 4 (ZnS ≈ 0,40), 0,414–0,732 koordinasi 6 (NaCl: 102/181 ≈ 0,56), dan di atas 0,732 koordinasi 8 (CsCl: 174/181 ≈ 0,96).

10.5 Sifat-sifat senyawa ion

Kisi raksasa yang dipegang gaya tarik kuat ke segala arah menjelaskan hampir semua sifat senyawa ion.

1. Titik leleh tinggi

Untuk melelehkan kristal ion, ion-ion harus dilepaskan dari kedudukannya di kisi. Karena setiap ion ditarik oleh banyak tetangga, energi yang diperlukan sangat besar.

Zat	Jenis partikel	Muatan ion	Titik leleh (°C)
NaF	ion	+1 dan −1	993
NaCl (garam dapur)	ion	+1 dan −1	801
KCl	ion	+1 dan −1	770
CaO (kapur tohor)	ion	+2 dan −2	±2.600
MgO	ion	+2 dan −2	2.852
Gula pasir (sukrosa)	molekul	–	±186 (lalu terurai)
Es (air)	molekul	–	0

Perhatikan dua pola. Makin besar ion (dari NaF ke KCl), makin jauh jarak antarinti dan makin rendah titik lelehnya. Makin besar muatan (dari NaF ke MgO, yang ukuran ionnya mirip), titik lelehnya melonjak hampir tiga kali lipat. Keduanya diatur oleh **hukum Coulomb**: gaya tarik sebanding dengan hasil kali muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak.

RUMUS HIDUP

Gaya tarik antarion (hukum Coulomb)

$$\frac{F}{F_{\mathrm{NaCl}}} = \frac{q_+\, q_-}{1 \times 1} \left(\frac{282\ \mathrm{pm}}{r} \right)^2$$

Muatan dua kali lebih besar, tarikan dua kali lebih kuat. Jarak dua kali lebih jauh, tarikan tinggal seperempat.

- q_+ Muatan kation
- q_- Besar muatan anion
- r Jarak antarinti ion `pm`
- F_{rel} Gaya tarik relatif (NaCl = 1) `× NaCl`

GAYA TARIK RELATIF (NACL = 1)

7,21

× NaCl

ini MgO (titik leleh 2.852 °C) **tarikan sangat kuat → titik leleh sangat tinggi**

Ion bermuatan **+2** dan **−2** pada jarak **210** pm saling tarik **7,21** kali lebih kuat daripada ion Na^+ dan Cl^- di garam dapur.

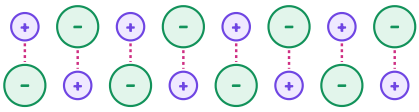
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-GAYA-COULOMB

Mengapa MgO jauh lebih sulit meleleh daripada NaF?

Keempat ion Na^+, Mg^{2+}, F^-, dan O^{2-} isoelektronik dengan neon, dan jarak antarintinya mirip (NaF ±231 pm, MgO ±210 pm). Bedanya pada hasil kali muatan: 4 untuk MgO, 1 untuk NaF. Tarikan dalam MgO jauh lebih kuat, sehingga titik leleh MgO (2.852 °C) hampir tiga kali NaF (993 °C).

2. Keras tetapi getas

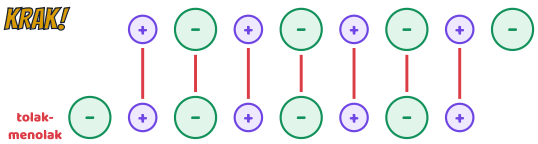
Kristal garam cukup keras, tetapi bila dipukul ulekan ia pecah berkeping-keping, tidak penyok seperti paku. Lihat lapisan ionnya.



Langkah 1. Dalam kristal ion, lapisan-lapisan ion tersusun selang-seling. Setiap ion positif bertetangga dengan ion negatif, sehingga lapisan-lapisannya saling tarik.



Langkah 2. Kristal dipukul. Lapisan atas bergeser sejauh satu ion.



Langkah 3. Sekarang ion bermuatan sama saling berhadapan: + dengan +, – dengan –. Mereka saling tolak dan kristal retak. Itulah sebabnya garam getas dan tidak bisa ditempa seperti logam.

3. Menghantarkan listrik hanya bila meleleh atau larut

Tebak Dulu!

Dua kabel dari baterai dan lampu LED ditancapkan ke segunduk kristal garam kering. Apakah LED menyala?

- Ya, terang, karena garam tersusun dari ion-ion bermuatan.
- Ya, tetapi redup, karena kristal garam keras.
- Tidak, karena garam sama sekali tidak mengandung partikel bermuatan.
- Tidak, karena ion-ion dalam kristal terkunci di tempatnya dan tidak dapat bergerak.

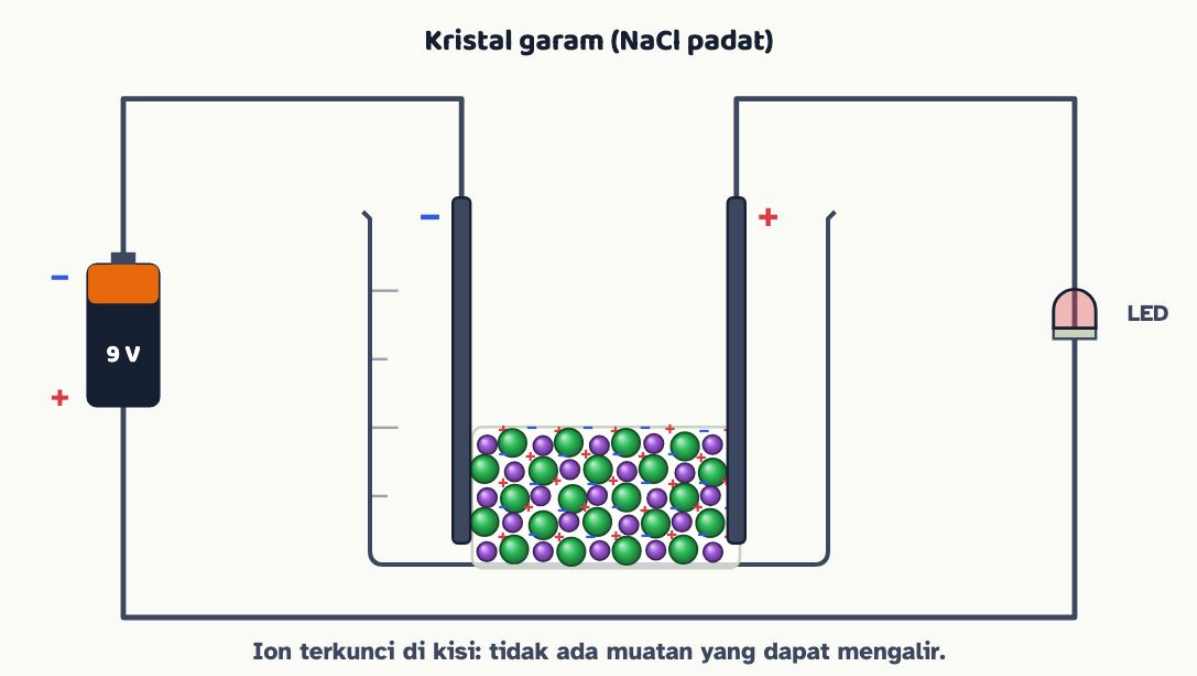
Jawabannya: tidak menyala, karena ionnya tidak bisa bergerak. Arus listrik adalah aliran muatan. Garam memang penuh muatan, tetapi di dalam kristal setiap ion terkunci di kedudukannya. Begitu garam dilelehkan (801 °C) atau dilarutkan dalam air, kisinya runtuh, ion-ion bebas bergerak, dan LED pun menyala.

Saat garam larut, molekul air yang polar mengerumuni setiap ion dan menariknya keluar dari kisi. Ion-ion yang terbungkus air (**ion terhidrasi**) bebas berkeliaran. Bila dua elektrode dicelupkan, kation bergerak ke elektrode negatif dan anion ke elektrode positif: muatan mengalir! Zat yang larutan atau lelehannya menghantarkan listrik

disebut **elektrolit**. Humphry Davy memanfaatkan sifat ini pada 1807: ia mengalirkan listrik ke dalam soda kaustik leleh dan untuk pertama kalinya memperoleh logam natrium murni.

LAB MINI **Uji daya hantar: siapa yang menyalakan LED?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-10



Lampu LED
padam

Ion yang bebas bergerak
tidak ada (ion terkunci di kisi)

Jenis zat
padatan ion: bukan penghantar

Pilih zat dan tutup sakelar. Di kabel yang bergerak adalah elektron, di dalam cairan yang bergerak adalah ion. Mengapa kristal garam gagal, tetapi garam leleh dan air garam berhasil? Mengapa air gula gagal walaupun gula larut? Di dunia nyata, uji seperti ini hanya boleh memakai baterai 9 V, bukan listrik rumah.

⚠ **KESELAMATAN**

Jangan pernah menguji daya hantar dengan listrik PLN atau stopkontak: tegangan 220 V dapat mematikan, apalagi melalui air. Pakai baterai 9 V dan LED saja. Garam leleh (801 °C) cukup dilihat di simulasi, jangan dicoba di rumah. Saat menguji air garam, gelembung di elektrode positif bisa mengandung sedikit gas klorin, jadi nyalakan rangkaian sebentar saja (±10 detik) di ruangan berventilasi.

4. Banyak yang larut dalam air, tidak larut dalam minyak

Garam, tawas, dan pupuk ZA mudah larut dalam air tetapi tidak larut dalam minyak goreng atau minyak tanah. Air polar mampu "membungkus" ion, sedangkan minyak tidak. Meski begitu, tidak semua senyawa ion larut: batu kapur ($\mathrm{CaCO_3}$) dan perak klorida (AgCl) praktis tidak larut, karena tarikan di kisinya lebih kuat daripada tarikan air. Kelarutan dibahas lebih dalam di Bab 28.

MITOS

"Kristal garam menghantarkan listrik karena tersusun dari ion."

FAKTA

Ion dalam kristal terkunci di tempatnya, padahal arus listrik butuh muatan yang bisa bergerak. Garam baru menghantar setelah dilelehkan atau dilarutkan dalam air.

MITOS

"Di dalam garam dapur ada molekul-molekul NaCl."

FAKTA

Kristal garam adalah kisi raksasa ion Na^{+} dan Cl^{-} dengan perbandingan 1 : 1. NaCl adalah satuan rumus, bukan rumus molekul.

MITOS

"Air murni adalah penghantar listrik yang baik."

FAKTA

Air murni hampir tanpa ion, jadi penghantarnya sangat buruk. Air keran dan keringat menghantar karena berisi ion terlarut. Itu sebabnya tangan basah tetap berbahaya di dekat listrik.

10.6 Lanjut: energi kisi, siklus Born–Haber, dan aturan Fajans

Mengapa ion-ion berhenti mendekat pada jarak tertentu? Karena ada dua gaya yang bertarung. Tarikan Coulomb menarik ion berlawanan muatan, tetapi bila terlalu dekat, awan elektron kedua ion mulai saling tolak dengan sangat kuat. Energi total paling rendah pada jarak setimbang r_0, seperti bola yang menggelinding ke dasar sumur.

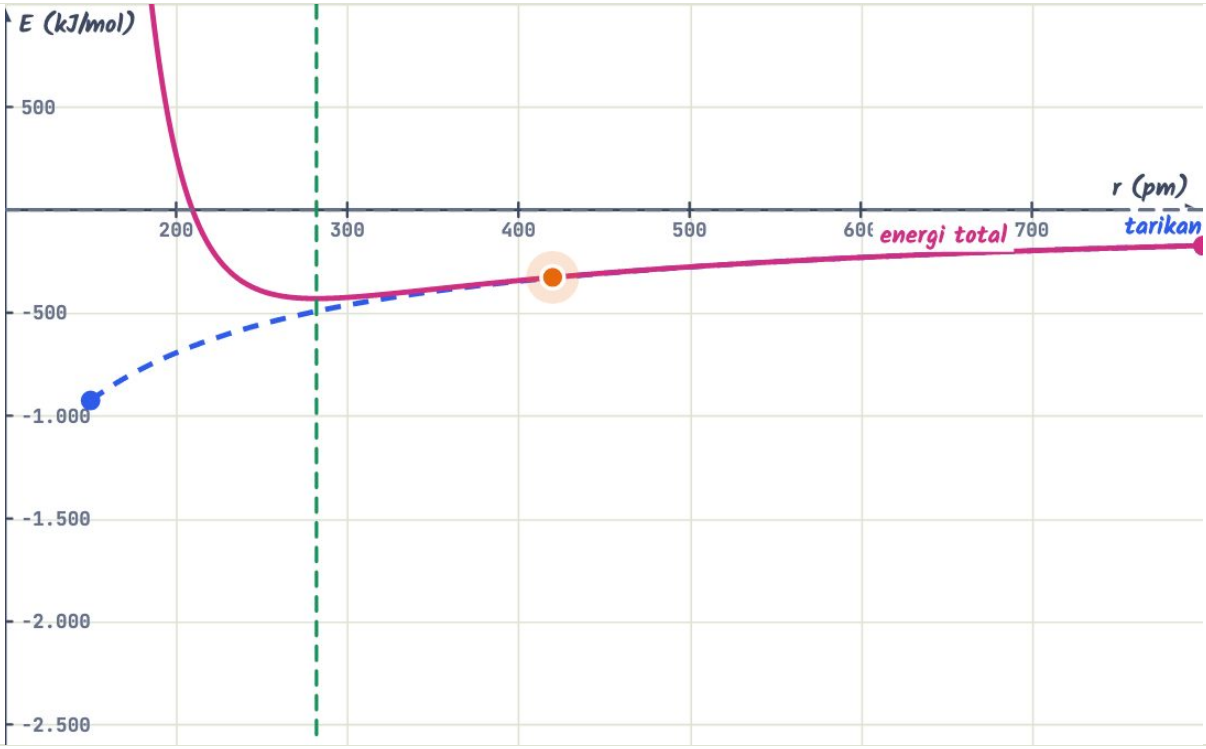
GRAFIK HIDUP

Sumur energi sepasang ion

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-10

$$E(r) = -\frac{138\,935\, z_+ z_-}{r}\left[1 - \frac{1}{8}\left(\frac{r_0}{r}\right)^7\right]$$

$$z_+ z_- = 1,\ r = 420\ \text{pm} \Rightarrow E = -328{,}25\ \text{kJ/mol}$$



E pada jarak r	E terendah (di r_0)
-328 kJ/mol	-431 kJ/mol

Seret titik oranye ke kiri dan kanan. Di mana energinya paling rendah? Lalu ubah muatan menjadi 2 dan 2 (seperti MgO) dan perkecil r_0: sumurnya menjadi jauh lebih dalam. Garis biru putus-putus adalah tarikan Coulomb saja; selisihnya dengan garis magenta adalah tolakan jarak dekat.

Kedalaman "sumur" untuk satu mol senyawa padat, dengan menghitung semua tetangga di kisi, disebut **energi kisi**.

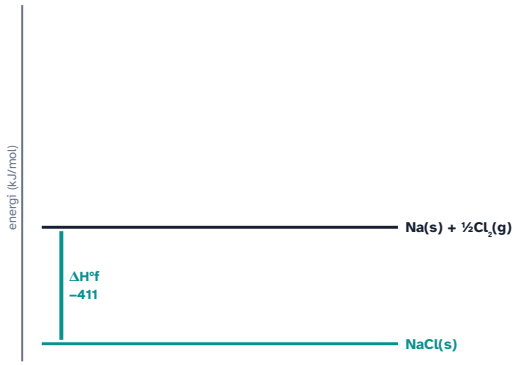
DEFINISI · ENERGI KISI

Energi kisi (U) adalah perubahan entalpi ketika 1 mol senyawa ion padat terbentuk dari ion-ion gasnya yang terpisah jauh, misalnya $\text{Na}^+(\text{g}) + \text{Cl}^-(\text{g}) \longrightarrow \text{NaCl}(\text{s})$, $U = -787$ kJ/mol. Makin besar nilainya (makin negatif), makin kuat kisinya.

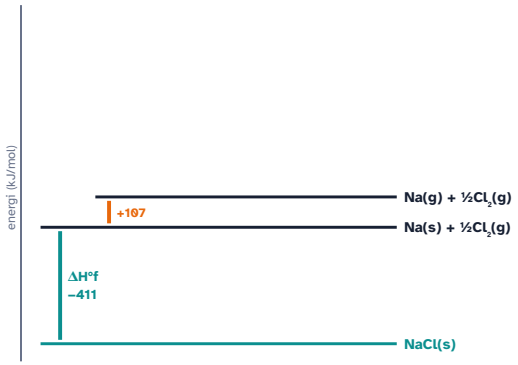
⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Perhatikan arah definisinya. Sebagian buku (termasuk buku data IB) mendefinisikan entalpi kisi sebagai energi untuk **memecah** kisi menjadi ion gas, sehingga nilainya positif: +787 kJ/mol untuk NaCl. Buku lain memakai arah **pembentukan**, sehingga nilainya negatif: −787 kJ/mol. Besarnya sama, tandanya berlawanan. Selalu tulis persamaan reaksinya agar tidak keliru.

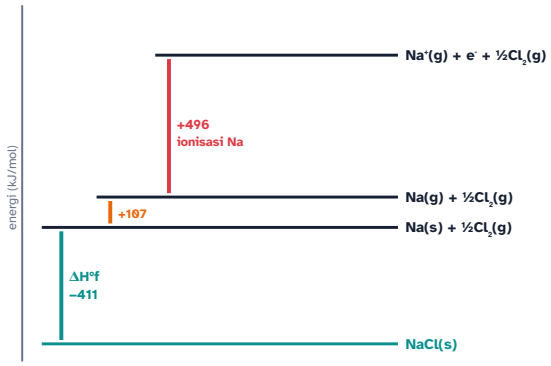
Energi kisi tidak bisa diukur langsung. Namun, **hukum Hess** (Bab 19) menyelamatkan kita: perubahan entalpi total tidak bergantung pada jalan yang ditempuh. Jalan memutar dari unsur ke ion-ion gas lalu ke kristal disebut **siklus Born–Haber**.



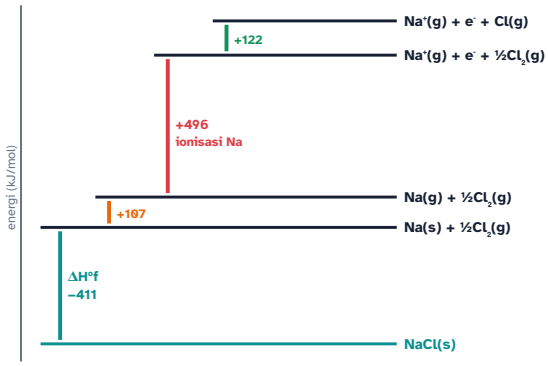
Langkah 1. Kita mencari energi kisi NaCl. Yang mudah diukur adalah entalpi pembentukan dari unsur-unsurnya: $\Delta H_f^\circ = -411$ kJ/mol.



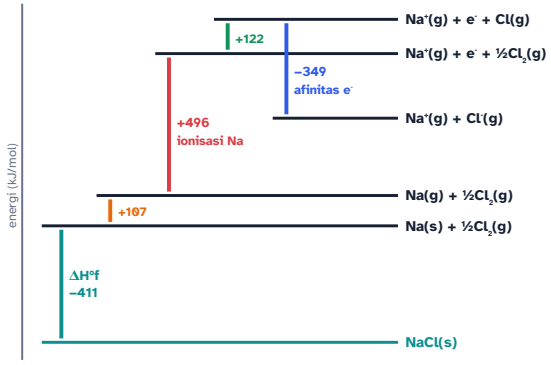
Langkah 2. Langkah 1 · Atomisasi natrium: $\mathrm{Na(s)} \longrightarrow \mathrm{Na(g)}$, +107 kJ/mol.



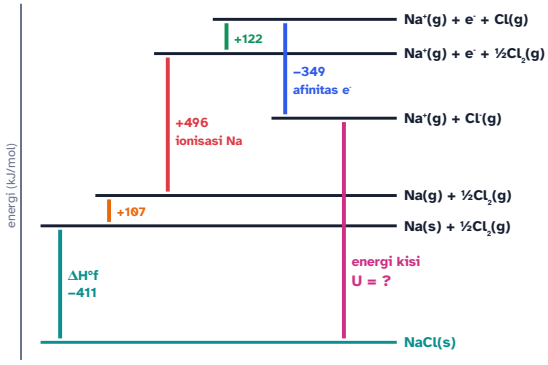
Langkah 3. Langkah 2 · Ionisasi natrium: $\mathrm{Na(g)} \longrightarrow \mathrm{Na^+(g) + e^-}$, +496 kJ/mol. Mahal!



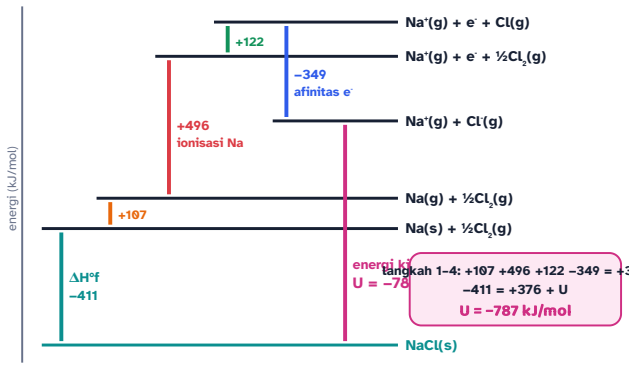
Langkah 4. Langkah 3 · Atomisasi klorin: $\frac{1}{2}\,\mathrm{Cl_2(g)} \longrightarrow \mathrm{Cl(g)}$, +122 kJ/mol, yaitu setengah energi ikatan Cl–Cl.



Langkah 5. Langkah 4 · Afinitas elektron klorin: $\mathrm{Cl(g) + e^-} \longrightarrow \mathrm{Cl^-(g)}$, −349 kJ/mol. Sebagian energi kembali, tetapi ion-ion gas masih 376 kJ/mol di atas unsur-unsurnya.



Langkah 6. Langkah 5 · Ion-ion gas bergabung menjadi kisi: $\mathrm{Na^+(g) + Cl^-(g)} \longrightarrow \mathrm{NaCl(s)}$. Inilah energi kisi U yang dicari.



Langkah 7. Hukum Hess: jalan memutar sama dengan jalan langsung. $-411 = (107 + 496 + 122 - 349) + U$, jadi $U = -787$ kJ/mol. Energi kisi yang besar inilah yang "membayar" semua langkah mahal tadi.

RUMUS HIDUP **Energi kisi dari siklus Born–Haber**

$$U = \Delta H_f^\circ - \left(\Delta H_{at}^M + E_i + \Delta H_{at}^X + E_{ae}\right)$$

Energi kisi sama dengan entalpi pembentukan dikurangi jumlah semua langkah memutar dari unsur menjadi ion-ion gas.

- ΔH_f° Entalpi pembentukan senyawa kJ/mol
- ΔH_{at}^M Atomisasi logam kJ/mol
- E_i Energi ionisasi pertama logam kJ/mol
- ΔH_{at}^X Atomisasi nonlogam kJ/mol
- E_{ae} Afinitas elektron pertama nonlogam kJ/mol
- U Energi kisi (arah pembentukan) kJ/mol

ENERGI KISI (ARAH PEMBENTUKAN)

-787

kJ/mol

NaCl: 787 kJ/mol

Ion-ion gas berada **376** kJ/mol di atas unsur-unsurnya. Saat kisi terbentuk, dilepaskan **787** kJ/mol.

Cek satuan: semua suku dalam kJ/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-BORN-HABER

KERJAKAN BERSAMA

Energi kisi kalium klorida

Hitung energi kisi KCl dari data berikut (kJ/mol): ΔH_f° KCl = –437; atomisasi K = +89; energi ionisasi K = +419; atomisasi Cl = +122; afinitas elektron Cl = –349. Bandingkan dengan NaCl.

1. Jumlah langkah memutar: 89 + 419 + 122 – 349 = +281 kJ/mol.
2. Hukum Hess: $\Delta H_f^\circ = 281 + U$, jadi $U = -437 - 281 = -718$ kJ/mol.
3. Bandingkan: NaCl –787 kJ/mol. Ion K^+ (138 pm) lebih besar daripada Na^+ (102 pm), jarak antarinti lebih jauh, tarikan lebih lemah.

U KCl = –718 kJ/mol, sekitar 9% lebih lemah daripada NaCl. Cocok dengan titik leleh KCl (770 °C) yang lebih rendah daripada NaCl (801 °C).



TAMU DARI MASA LALU

Siklus ini disusun pada 1919 oleh **Max Born** dan **Fritz Haber**, penemu proses pembuatan amonia yang kini menjadi bahan baku pupuk urea di Bontang dan Gresik. Pada tahun yang sama **Kazimierz Fajans** menerbitkan gagasan serupa, lalu pada 1923 merumuskan aturan kapan ikatan ion mulai bersifat kovalen.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MEMPERKIRAKAN ENERGI KISI TANPA SIKLUS: PERSAMAAN KAPUSTINSKII

Bila data siklus Born–Haber tidak lengkap, energi kisi dapat diperkirakan dari model ion bermuatan saja. Persamaan Kapustinskii (1956) hanya membutuhkan jumlah ion per satuan rumus (ν), muatan, dan jumlah jari-jari ion (r, dalam pm).

RUMUS HIDUP **Perkiraan energi kisi (Kapustinskii)**

$$|U| \approx 1{,}2025 \times 10^5 \, \frac{\nu \, z_+ \, z_-}{r} \left(1 - \frac{34{,}5}{r}\right)$$

Makin banyak ion, makin besar muatannya, dan makin pendek jaraknya, makin besar energi kisinya.

- ν Jumlah ion per satuan rumus
- z_+ Muatan kation
- z_- Besar muatan anion
- r Jumlah jari-jari ion $r_+ + r_-$ pm
- $|U|$ Besar energi kisi (perkiraan) kJ/mol

BESAR ENERGI KISI (PERKIRAAN)

746

kJ/mol

NaCl: perkiraan ±746, data Born–Haber 787 (selisih ±5%)

Perkiraan **746** kJ/mol, yaitu **0,948** kali energi kisi NaCl dari siklus Born–Haber (787 kJ/mol).

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KAPUSTINSKII

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ATURAN FAJANS: KETIKA IKATAN ION "BERBAGI" SEDIKIT

Model ion murni menganggap ion sebagai bola bermuatan yang bulat sempurna. Kenyataannya, kation dapat **mempolarisasi** anion: menarik awan elektron anion ke arahnya sehingga sebagian elektron seolah-olah dipakai bersama. Akibatnya ikatan memperoleh sedikit **karakter kovalen**. Menurut Kazimierz Fajans, karakter kovalen makin besar bila:

1. **kation kecil dan bermuatan besar** (rapat muatannya tinggi), misalnya $\mathrm{Al^{3+}}$, $\mathrm{Be^{2+}}$, $\mathrm{Li^{+}}$;
2. **anion besar dan bermuatan besar** (mudah dipolarisasi), misalnya $\mathrm{I^{-}}$ lebih mudah daripada $\mathrm{F^{-}}$;
3. kation tidak bersusunan gas mulia, misalnya $\mathrm{Ag^{+}}$ dan $\mathrm{Cu^{+}}$ (kulit d penuh melindungi inti kurang baik).

Buktinya: aluminium klorida menyublim pada ±180 °C (NaCl baru meleleh pada 801 °C) dan uapnya berupa molekul $\mathrm{Al_2Cl_6}$. Untuk NaCl, model ion murni hanya meleset beberapa persen dari hasil siklus Born–Haber. Untuk AgCl, siklus Born–Haber memberi ±916 kJ/mol, kira-kira 6–10% lebih besar daripada perkiraan model ion; kelebihan itu berasal dari sifat kovalen. Jadi ikatan ion dan ikatan kovalen bukan dua kotak yang terpisah, melainkan dua ujung sebuah **spektrum**. Bab 11 akan memperkenalkan ujung yang satunya.

Kimia di sekitarmu

Garam beryodium

Garam dapur (NaCl) ditambah sedikit kalium iodat, $\mathrm{KIO_3}$. Ion iodat memasok iodin untuk kelenjar tiroid dan mencegah gondok.

Kapur sirih

Kalsium hidroksida, $\mathrm{Ca(OH)_2}$, dipakai untuk menyirih dan untuk merendam keripik atau manisan supaya renyah berkat ion $\mathrm{Ca^{2+}}$.

Tawas penjernih air

Ion $\mathrm{Al^{3+}}$ bermuatan besar menetralkan partikel lumpur yang bermuatan negatif sehingga menggumpal dan mengendap. Air sumur yang keruh pun menjadi jernih.

Gips dan tulang

Gips ($\mathrm{CaSO_4 \cdot 2\,H_2O}$) membungkus tulang yang patah, sementara tulang kita sendiri dibangun dari kristal ion kalsium fosfat (hidroksiapatit).

Oralit

Saat diare, tubuh kehilangan ion $\mathrm{Na^{+}}$, $\mathrm{K^{+}}$, dan $\mathrm{Cl^{-}}$. Oralit menggantinya dalam takaran yang tepat bersama sedikit glukosa.

Cek Cepat

Ion Cl^- (Z = 17) mempunyai susunan elektron yang sama dengan ...

- atom neon
- ion Na^+
- atom argon
- atom kripton

Rumus senyawa yang terbentuk dari ion Ba^{2+} dan ion NO_3^- adalah ...

- $Ba(NO_3)_2$
- $BaNO_3$
- Ba_2NO_3
- BaN_2O_6

Dalam kisi NaCl, setiap ion Na^+ dikelilingi oleh berapa ion Cl^- terdekat?

- 1
- 4
- 8
- 6

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: kebun kristal garam dan tawas

Bahan: garam dapur (lebih bagus garam krosok), tawas dari warung atau toko bahan kue, air panas dari termos, 2 gelas atau toples kaca bening, sendok, benang katun, 2 pensil atau sedotan, kertas label, kaca pembesar atau kamera HP.

1. Minta orang dewasa menuang ±150 mL air panas ke gelas pertama. Larutkan garam sedikit demi sedikit sambil diaduk sampai tidak bisa larut lagi (larutan jenuh).
2. Ulangi dengan tawas di gelas kedua.
3. Ikat benang pada pensil, lalu gantung benang ke dalam larutan tanpa menyentuh dasar gelas.
4. Simpan kedua gelas di tempat tenang dan beri label "BAHAN PERCOBAAN, JANGAN DIMINUM".
5. Amati setiap hari selama 3–7 hari. Foto kristal dengan kamera HP yang diperbesar dan bandingkan bentuknya.

Keselamatan: air panas hanya dituang oleh orang dewasa. Tawas tidak boleh dicicipi atau ditelan, dan cuci tangan setelah memegangnya. Jauhkan gelas dari jangkauan adik kecil. Sisa larutan dibuang ke wastafel sambil dibilas banyak air.

Pertanyaan: Kristal garam tumbuh berbentuk kubus, sedangkan kristal tawas berbentuk seperti dua piramida yang ditempel (oktahedron). Mengapa sebesar apa pun kristal garam, bentuknya tetap kubus? Hubungkan dengan susunan ion di subbab 10.4.

RINGKASAN KILAT

Bab 10 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan kestabilan gas mulia dan **aturan oktet**, lalu meramalkan ion yang dibentuk suatu unsur
- menggambarkan pembentukan **ikatan ion** dengan **diagram titik-silang**
- menuliskan **rumus senyawa ion** dari muatan ionnya, termasuk senyawa dengan **ion poliatom**
- menjelaskan **kisi kristal** NaCl dan **sifat-sifat senyawa ion** (titik leleh, kegetasan, daya hantar listrik)
- menghitung **energi kisi** dengan siklus Born–Haber dan menjelaskan karakter kovalen dengan **aturan Fajans**

Istilah kunci

Elektron valensi · Aturan oktet · duplet · ion · Kation · Anion · isoelektronik · Ikatan ion · diagram titik-silang · ion poliatom · kisi kristal raksasa · Kisi ion · Bilangan koordinasi · satuan rumus · sel satuan · hukum Coulomb

Rumus penting

$$x : y = \frac{b}{\text{FPB}} : \frac{a}{\text{FPB}}$$

Silang muatan: berapa kation dan anion?. x kation dan y anion: x sama dengan besar muatan anion, y sama dengan besar muatan kation, lalu keduanya dibagi FPB (faktor persekutuan terbesar) dari a dan b.

$$\frac{F}{F_{\text{NaCl}}} = \frac{q_+ \, q_-}{1 \times 1} \left(\frac{282 \text{ pm}}{r} \right)^2$$

Gaya tarik antarion (hukum Coulomb). Muatan dua kali lebih besar, tarikan dua kali lebih kuat. Jarak dua kali lebih jauh, tarikan tinggal seperempat.

$$U = \Delta H_f^\circ - \left(\Delta H_{at}^M + E_i + \Delta H_{at}^X + E_{ae} \right)$$

Energi kisi dari siklus Born–Haber. Energi kisi sama dengan entalpi pembentukan dikurangi jumlah semua langkah memutar dari unsur menjadi ion-ion gas.

$$|U| \approx 1{,}2025 \times 10^5 \, \frac{\nu \, z_+ \, z_-}{r} \left(1 - \frac{34{,}5}{r} \right)$$

Perkiraan energi kisi (Kapustinskii). Makin banyak ion, makin besar muatannya, dan makin pendek jaraknya, makin besar energi kisinya.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Natrium sebenarnya tidak "senang" melepas elektron: proses itu justru menyerap 496 kJ/mol.
- Tanda kurung hanya untuk ion poliatom yang jumlahnya lebih dari satu.
- Tidak ada molekul NaCl di dalam kristal garam.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=10

🧩 Teka-teki untuk Bab 11

Dua atom klorin sama-sama rakus: masing-masing butuh satu elektron lagi untuk oktet, dan tidak ada yang mau mengalah. Lalu bagaimana keduanya bisa bersatu menjadi molekul Cl_2, gas kuning kehijauan yang dipakai untuk membunuh kuman di instalasi air minum?

▼ **Intip petunjuk**

Kalau tidak ada yang mau memberi, mereka bisa **berbagi**. Masing-masing menyumbang satu elektron untuk dipakai bersama, sehingga keduanya "merasa" memiliki 8 elektron. Pasangan elektron bersama ini disebut **ikatan kovalen**, tokoh utama Bab 11.

BAB 11 · IKATAN & WUJUD ZAT

11 Ikatan Kovalen: Seni Berbagi Elektron

Dua atom klorin sama-sama rakus elektron, dan tidak ada yang mau mengalah. Jalan keluarnya sederhana sekaligus indah: berbagi. Dari cara berbagi inilah lahir air yang kamu minum, oksigen yang kamu hirup, dan gas di tabung LPG dapurmu.

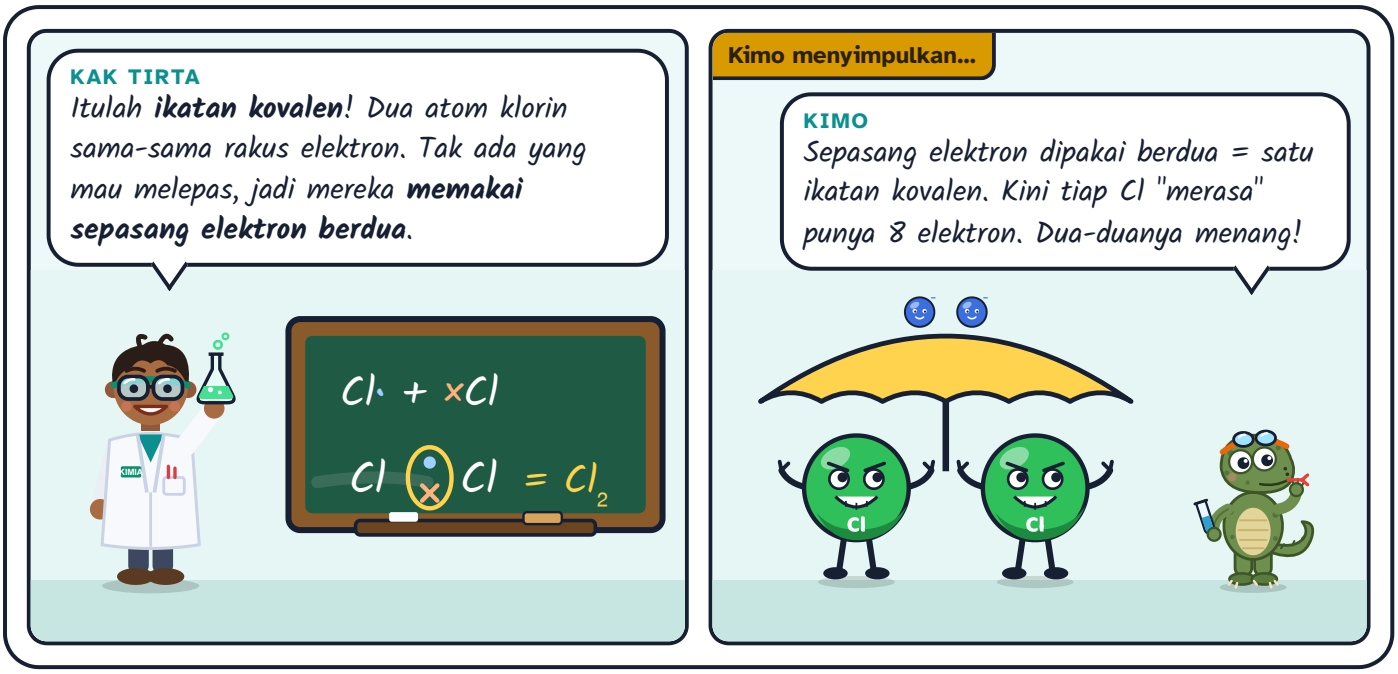
Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **ikatan kovalen** sebagai pemakaian bersama pasangan elektron dan membedakan ikatan **tunggal, rangkap dua, dan rangkap tiga**;
- menggambar **struktur Lewis** molekul dan ion poliatom langkah demi langkah;
- mengenali **ikatan kovalen koordinasi** dan molekul yang **menyimpang dari aturan oktet**;
- memperkirakan **kepolaran ikatan** dari selisih keelektronegatifan dan memandang ion–kovalen sebagai spektrum;
- menghitung **muatan formal**, menuliskan **struktur resonansi**, dan mengaitkan orde ikatan dengan panjang dan energi ikatan.

SATU PAYUNG BERDUA

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Dua atom klorin bertemu. Keduanya sama-sama butuh satu elektron lagi supaya kulit terluarnya penuh. Apa yang paling mungkin terjadi?

- Atom yang lebih kuat merebut elektron atom lainnya, sehingga terbentuk ion Cl^+ dan Cl^-.
- Keduanya memakai sepasang elektron bersama sehingga terbentuk molekul Cl_2.
- Keduanya saling tolak karena sama-sama bermuatan negatif.
- Tidak terjadi apa-apa; klorin di alam selalu berupa atom tunggal.

Jawabannya: berbagi. Kedua atom Cl identik, jadi tarikannya terhadap elektron sama kuat: tidak ada yang bisa "menang" merebut. Atom juga netral, bukan bermuatan negatif. Dengan memakai sepasang elektron bersama, masing-masing dikelilingi 8 elektron. Gas klorin yang dipakai untuk membunuh kuman di instalasi pengolahan air minum memang berupa molekul Cl_2.

11.1 Berbagi pasangan elektron: tunggal, rangkap dua, rangkap tiga

Di Bab 10, natrium yang royal menyerahkan satu elektronnya kepada klorin. Hasilnya ion Na^+ dan Cl^- yang saling tarik. Tetapi bagaimana jika kedua atom sama-sama "rakus"? Atom **nonlogam** seperti H, C, N, O, dan Cl mempunyai energi ionisasi tinggi. Melepas elektron terlalu mahal bagi mereka. Jalan keluarnya: elektron tidak dipindahkan, melainkan **dipakai bersama**.

Bahasa sederhana · Bayangkan kembali Bima dan Laras di bawah satu payung. Payungnya tidak berpindah tangan, tetapi melindungi keduanya. Atom-atom kecil seperti hidrogen dan oksigen melakukan hal yang sama: mereka menaruh elektron di tengah-tengah dan memakainya berdua. Elektron yang dipakai berdua itulah "lem" yang menyatukan atom menjadi molekul.

DEFINISI · IKATAN KOVALEN

Ikatan kovalen adalah ikatan yang terbentuk ketika dua atom memakai bersama satu atau lebih pasangan elektron. Pasangan elektron bersama itu berada di antara kedua inti dan ditarik oleh **kedua inti sekaligus**; tarikan elektrostatik inilah yang mengikat atom. Ikatan kovalen umumnya terjadi antara sesama atom nonlogam, dan kumpulan atom yang terikat kovalen disebut **molekul**.

Mengapa dua atom hidrogen mau mendekat, tetapi tidak sampai menempel? Saat jaraknya berkurang, inti setiap atom mulai menarik elektron atom tetangganya, sehingga energi sistem turun. Jika terlalu dekat, kedua inti (yang sama-sama positif) saling tolak dan energi naik lagi. Jarak dengan energi **paling rendah** itulah **panjang ikatan**, dan energi yang dilepaskan saat ikatan terbentuk sama dengan **energi ikatan**. Untuk H_2: 74 pm dan 436 kJ/mol.

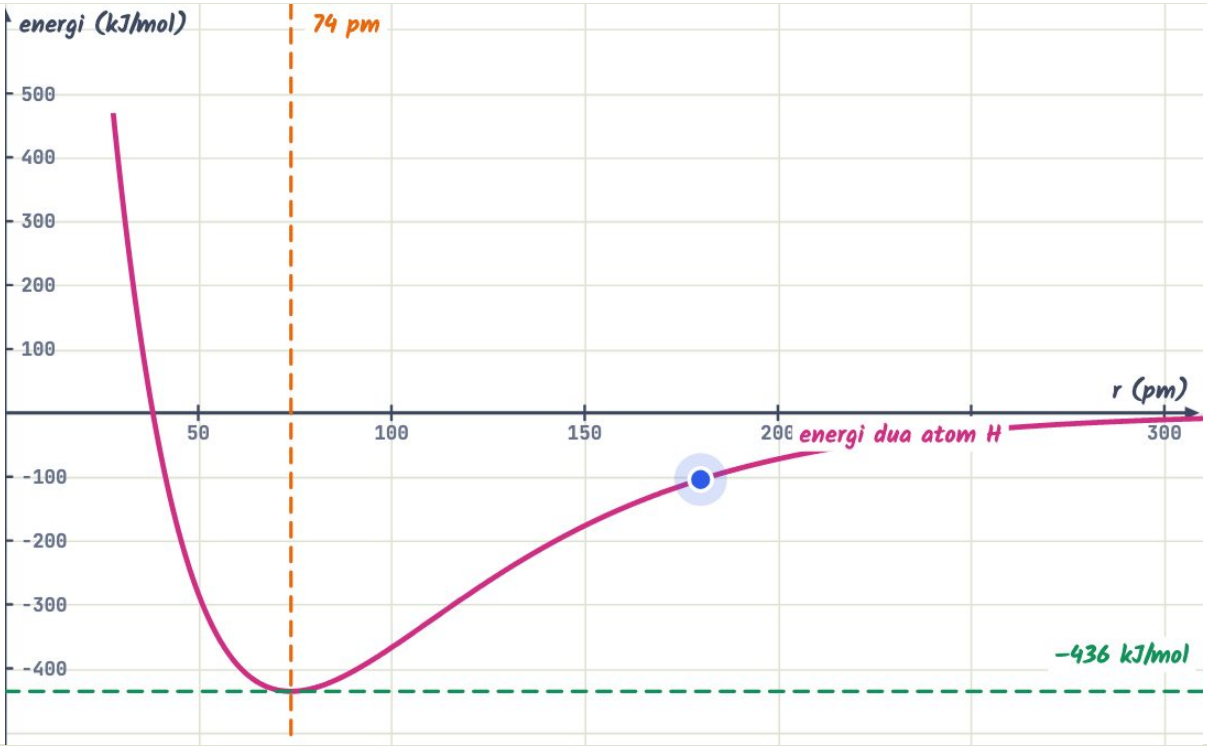
GRAFIK HIDUP

Kurva energi dua atom H: lembah tempat ikatan lahir

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-11

$$E(r) = D\left[\left(1 - e^{-a(r-r_0)}\right)^2 - 1\right]$$

$$r = 180\ \text{pm}: \quad E = -104{,}41\ \text{kJ/mol}$$



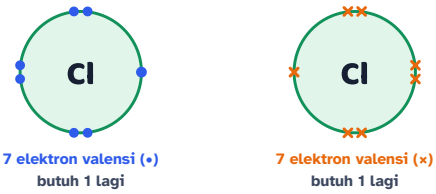
saling tarik: inti menarik elektron atom tetangga

jarak antarinti
180 pm

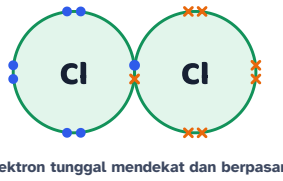
energi sistem
-104 kJ/mol

Seret titik biru dari kanan ke kiri, seolah dua atom H saling mendekat. Di mana energinya paling rendah? Apa yang terjadi jika kamu memaksanya lebih dekat dari 60 pm? (Kurva ini model Morse yang disederhanakan.)

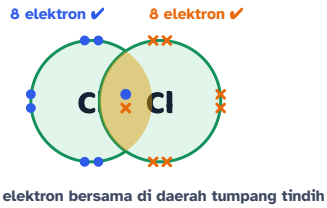
Klorin bekerja dengan cara yang sama, tetapi kita perlu melihat elektron valensinya. Ikuti animasinya langkah demi langkah:



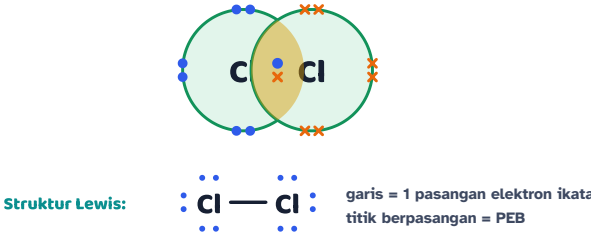
Langkah 1. Dua atom klorin mendekat. Masing-masing punya 7 elektron valensi (• milik Cl kiri, × milik Cl kanan) dan butuh 1 lagi supaya oktet.



Langkah 2. Tidak ada yang mau melepas elektron. Elektron tunggal milik keduanya berpasangan di antara kedua inti.



Langkah 3. Kulit terluar keduanya tumpang tindih: sepasang elektron dipakai berdua. Hitung elektron di lingkaran masing-masing: 8! Kedua Cl kini oktet.



Langkah 4. Ditulis sebagai struktur Lewis: satu garis = satu **pasangan elektron ikatan** (PEI), titik berpasangan = **pasangan elektron bebas** (PEB). Cl_2 punya 1 PEI dan 6 PEB.

Diagram dengan titik (•) dan silang (×) seperti di atas disebut **diagram titik-silang**. Titik dan silang hanya penanda asal elektron; di dalam molekul, semua elektron identik.

Oksigen butuh **dua** elektron lagi. Dua atom O memakai bersama dua pasang elektron: **ikatan rangkap dua**, $O{=}O$. Nitrogen butuh tiga, sehingga dua atom N memakai bersama tiga pasang: **ikatan rangkap tiga**, $N{\equiv}N$. Satu pasang saja disebut **ikatan tunggal**, seperti $H{-}H$ dan $Cl{-}Cl$.

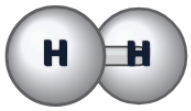
Molekul	Struktur	Pasangan bersama	Jenis ikatan	Panjang ikatan	Energi ikatan
Hidrogen, H_2	$H{-}H$	1 (2 elektron)	tunggal	74 pm	436 kJ/mol
Klorin, Cl_2	$Cl{-}Cl$	1 (2 elektron)	tunggal	199 pm	242 kJ/mol
Hidrogen klorida, HCl	$H{-}Cl$	1 (2 elektron)	tunggal	127 pm	431 kJ/mol
Oksigen, O_2	$O{=}O$	2 (4 elektron)	rangkap dua	121 pm	498 kJ/mol
Nitrogen, N_2	$N{\equiv}N$	3 (6 elektron)	rangkap tiga	110 pm	945 kJ/mol

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Satu garis ikatan berarti **sepasang (2) elektron**, bukan satu elektron. Ikatan rangkap tiga $N{\equiv}N$ berisi 6 elektron. Jadi saat menghitung elektron dalam struktur Lewis, setiap garis dihitung 2.

MOLEKUL 3D

Tunggal, rangkap dua, rangkap tiga: ukur sendiri!



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Hidrogen H_2

Mr ≈ 2,02

Molekul paling sederhana: dua proton berbagi sepasang elektron.

Pilih molekul, lalu ketuk dua atom yang berikatan untuk mengukur panjang ikatannya. Bandingkan etana, etena, dan etuna: makin banyak pasangan elektron bersama, makin pendek ikatannya. Nyalakan "pasangan elektron bebas" untuk melihat PEB.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · "HONC 1-2-3-4"**

Hafalkan jumlah "tangan" (ikatan) yang biasa dibuat atom: **H** 1, **O** 2, **N** 3, **C** 4. Halogen (F, Cl, Br, I) seperti H: 1 tangan. Angka ini sama dengan jumlah elektron yang masih dibutuhkan untuk oktet (atau duplet untuk H): 8 − elektron valensi. Kalau di struktur buatanmu karbon punya 5 tangan atau oksigen 3 tangan, periksa lagi (kecuali ion, lihat 11.3).

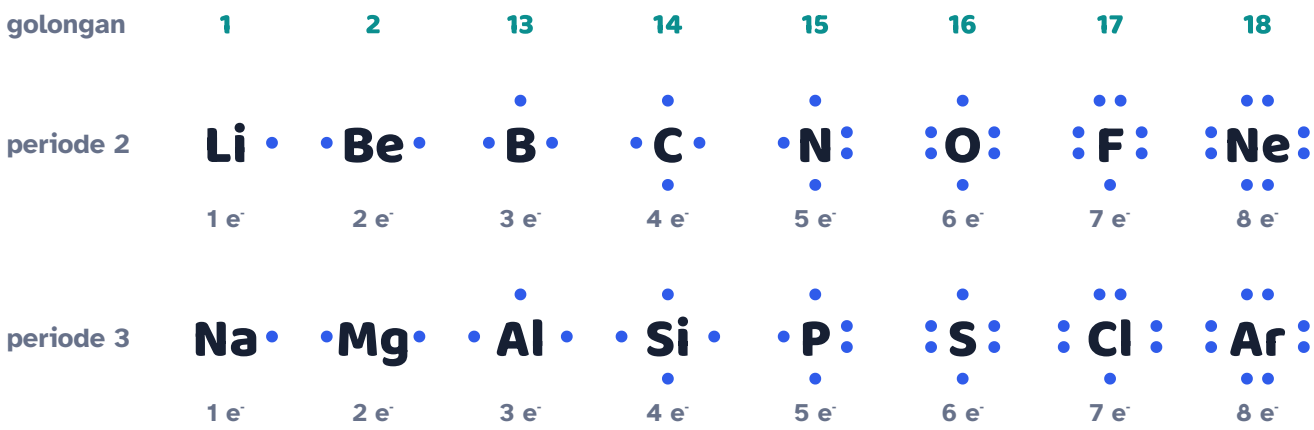
KIMIA NUSANTARA · NITROGEN DI BAN, OKSIGEN DI PUSKESMAS

Di banyak bengkel dan SPBU kamu bisa mengisi ban dengan **nitrogen**. Ikatan rangkap tiga $\mathrm{N{\equiv}N}$ yang sangat kuat membuat gas ini nyaris tidak bereaksi, dan gas nitrogen kering tidak membawa uap air yang dapat memicu karat pada pelek. Ingat juga bahwa udara biasa sudah berisi 78% nitrogen, jadi bedanya tidak sebesar yang sering diiklankan.

Tabung **oksigen medis** di puskesmas berisi $\mathrm{O_2}$ murni bertekanan tinggi. Ikatan $\mathrm{O{=}O}$ lebih mudah "dibuka" daripada $\mathrm{N{\equiv}N}$, sehingga oksigen sangat aktif membantu pembakaran. Karena itu petugas melarang merokok di dekat tabung dan menjauhkan regulatornya dari minyak atau gemuk.

11.2 Menggambar struktur Lewis langkah demi langkah

Sebelum menggambar molekul, kita perlu "kartu identitas" setiap atom: berapa elektron valensinya. **Lambang Lewis** (lambang titik elektron) menuliskan lambang unsur yang dikelilingi titik sebanyak elektron valensinya. Untuk unsur golongan utama, jumlahnya mengikuti golongan: golongan 1 dan 2 punya 1 dan 2; golongan 13 sampai 18 punya 3 sampai 8.



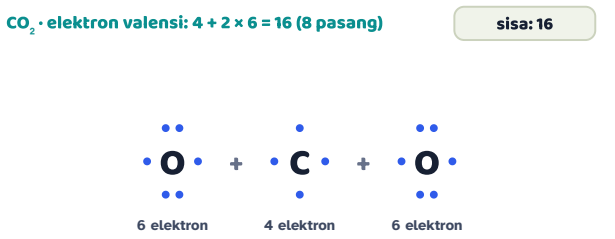
Lambang Lewis unsur periode 2 dan 3. Unsur dalam satu golongan punya jumlah elektron valensi yang sama, sehingga cenderung membentuk jumlah ikatan yang sama: C dan Si 4, N dan P 3, O dan S 2, F dan Cl 1.

Bahasa sederhana · Struktur Lewis seperti peta tempat duduk elektron. Garis menunjukkan elektron yang "duduk berdua" di antara dua atom (pasangan ikatan), sedangkan pasangan titik menunjukkan elektron yang hanya menjadi milik satu atom (pasangan bebas). Aturan mainnya: semua elektron valensi harus mendapat tempat, dan setiap atom sebisa mungkin "penuh".

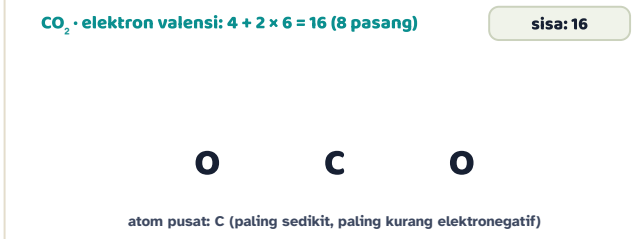
Dalam struktur Lewis, sepasang elektron yang dipakai bersama disebut **pasangan elektron ikatan (PEI)** dan digambar sebagai garis. Pasangan yang tidak ikut berikatan disebut **pasangan elektron bebas (PEB)** dan digambar sebagai dua titik.

ATURAN · ENAM LANGKAH MENGGAMBAR STRUKTUR LEWIS

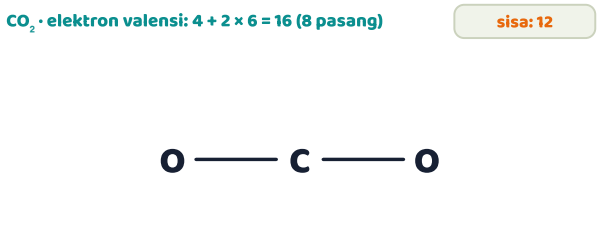
1. **Hitung** total elektron valensi semua atom. Ion negatif: **tambah** elektron sebanyak muatannya; ion positif: **kurangi**.
2. **Pilih atom pusat**: biasanya atom yang jumlahnya paling sedikit dan paling kurang elektronegatif (sering C, N, P, S). H dan F tidak pernah menjadi atom pusat.
3. **Hubungkan** atom pusat dengan setiap atom luar memakai ikatan tunggal (2 elektron per ikatan).
4. **Lengkapi oktet atom luar** dengan PEB (H cukup 2 elektron).
5. **Sisa elektron** diletakkan di atom pusat. Jika atom pusat belum oktet, ubah PEB atom luar menjadi ikatan rangkap.
6. **Periksa**: jumlah elektron sama dengan langkah 1, setiap atom oktet (atau duplet), dan muatan formal sekecil mungkin (11.6).



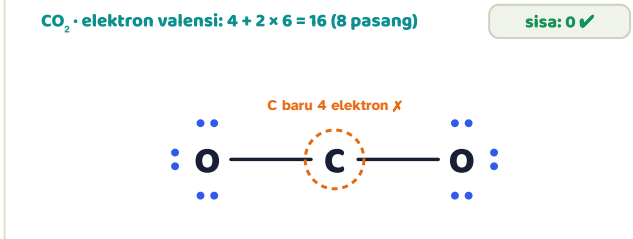
Langkah 1. Langkah 1 · Hitung. C (golongan 14) punya 4 elektron valensi, setiap O (golongan 16) punya 6. Total $4 + 2 \times 6 = 16$ elektron, yaitu 8 pasang.



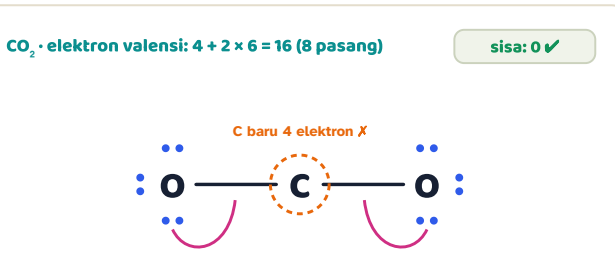
Langkah 2. Langkah 2 · Kerangka. Atom pusat adalah C: jumlahnya paling sedikit dan paling kurang elektronegatif. Kedua O di luar.



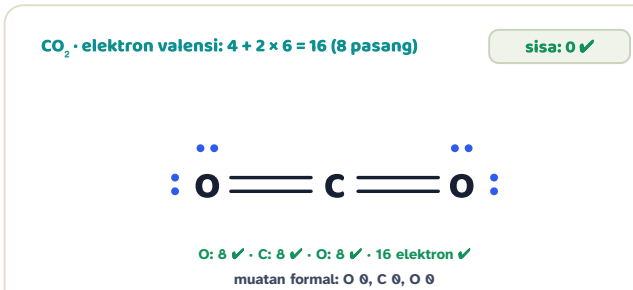
Langkah 3. Langkah 3 · Ikatan tunggal. Dua ikatan memakai 4 elektron; sisa 12.



Langkah 4. Langkah 4 · Lengkapi atom luar. Tiap O mendapat 3 PEB (6 elektron). Sisa 0, tetapi C baru dikelilingi 4 elektron!



Langkah 5. Langkah 5 · Geser PEB. Atom pusat belum oktet, jadi satu PEB dari setiap O digeser menjadi pasangan ikatan (panah).



Langkah 6. Langkah 6 · Periksa. Total 16 elektron ✔, semua atom oktet ✔, muatan formal semua nol ✔. Inilah O=C=O.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1916, kimiawan Amerika **Gilbert N. Lewis** mengusulkan gagasan berani: atom dapat terikat dengan *memakai bersama sepasang elektron*. Ia menggambar atom sebagai kubus dengan elektron di sudut-sudutnya, dan dari situ lahirlah titik-titik yang kini kita kenal sebagai struktur Lewis. Tiga tahun kemudian, **Irving Langmuir** memopulerkan istilah *covalence* (kovalen). Lewis berkali-kali dinominasikan untuk Hadiah Nobel, tetapi tidak pernah menerimanya, padahal gagasannya dipakai setiap hari oleh kimiawan di seluruh dunia.

TRIK KAK TIRTA · HITUNG IKATAN DENGAN "N − A"

Sebelum menggambar, tebak dulu jumlah garisnya. **N** = elektron yang *dibutuhkan* supaya semua atom penuh (8 untuk setiap atom selain H, 2 untuk setiap H). **A** = elektron yang *tersedia* (total elektron valensi). Selisihnya harus dipakai berdua, dan setiap ikatan memakai 2 elektron. Trik ini berlaku untuk molekul yang taat oktet.

RUMUS HIDUP

Jumlah ikatan dari kebutuhan dan ketersediaan elektron

$$\text{ikatan} = \frac{N - A}{2}, \qquad N = 8\,n_X + 2\,n_H$$

Elektron yang dibutuhkan semua atom dikurangi elektron yang tersedia adalah elektron yang harus dipakai berdua; setiap ikatan memakai dua.

- n_X Jumlah atom selain H `atom`
- n_H Jumlah atom H `atom`
- A Elektron valensi tersedia `elektron`
- ikatan Jumlah garis ikatan

JUMLAH GARIS IKATAN

4

CO_2: 4 garis, yaitu O=C=O ✔

Dibutuhkan **24** elektron, tersedia **16**. Jadi **8** elektron dipakai berdua = **4** garis ikatan, dan **8** elektron sisanya menjadi PEB.

Cek satuan: elektron ÷ (2 elektron per ikatan) = ikatan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOV-TRIK-IKATAN

Sekarang giliranmu. Di lab berikut, kerangkanya sudah disediakan; tugasmu menempatkan pasangan elektron.

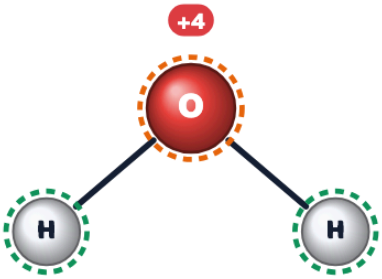
LAB MINI **Penggambar Lewis: tempatkan setiap pasangan elektron**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-11

Air · H_2O

elektron valensi: O 6 + H 1 × 2 = 8

sisa elektron: 4



O: 4 e⁻ ✗ H (×2): 2 e⁻ ✔

Ketuk atom: + PEB · Ketuk garis: tunggal → rangkap dua → rangkap tiga

Status: masih ada 4 elektron belum ditempatkan

Elektron valensi	Elektron terpakai	Σ|muatan formal|
8	4	4

Status
masih ada 4 elektron belum ditempatkan

Pilih molekul. **Ketuk atom** untuk menambah satu PEB, **ketuk garis ikatan** untuk mengubahnya: tunggal → rangkap dua → rangkap tiga. Cincin hijau = atom sudah penuh, jingga = belum. Perhatikan "sisa elektron" di kanan atas, lalu tekan ✔ **Periksa**. Tantangan: selesaikan CO, O_3, dan NO_3^- tanpa melihat jawaban!

CONTOH **Struktur Lewis air**

Gambarkan struktur Lewis air, H_2O, dan tentukan jumlah PEI dan PEB pada atom O.

1. Total elektron valensi: O = 6, H = 2 × 1 = 2. Total 8 elektron (4 pasang).
2. Atom pusat O (H tidak pernah menjadi pusat). Kerangka H–O–H memakai 2 pasang.
3. H sudah duplet. Sisa 4 elektron (2 pasang) diletakkan di O sebagai PEB.
4. Periksa: O dikelilingi 2 PEI + 2 PEB = 8 elektron ✔; setiap H 2 elektron ✔.

Struktur $H{-}O{-}H$ dengan 2 PEI dan 2 PEB pada O. Kedua PEB inilah yang kelak membuat molekul air bengkok (Bab 12).

KERJAKAN BERSAMA **Formalin: struktur Lewis formaldehida**

Formalin, larutan formaldehida (CH_2O), dilarang dipakai untuk mengawetkan tahu atau ikan karena beracun. Gambarkan struktur Lewis formaldehida. (C golongan 14, O golongan 16)

1. Elektron valensi: C 4 + H 2 × 1 + O 6 = 12 elektron (6 pasang).
2. Atom pusat C; H dan O terikat pada C. Tiga ikatan tunggal memakai 6 elektron, sisa 6.
3. Lengkapi O dengan 3 PEB (6 elektron). Sisa 0, tetapi C hanya dikelilingi 6 elektron.
4. Geser satu PEB dari O menjadi ikatan C=O. Sekarang C 8 ✔, O 8 ✔ (2 PEI + 2 PEB), H 2 ✔.
5. Cek dengan trik N – A: $N = 8(2) + 2(2) = 20$, $A = 12$, ikatan $= (20 - 12)/2 = 4$ garis ✔ (dua C–H dan satu C=O).

Formaldehida punya satu ikatan rangkap dua C=O dan dua PEB pada O. Gugus C=O yang reaktif inilah yang membuat formaldehida mengikat silang protein, sehingga berbahaya bila tertelan.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Hidrogen tidak pernah menjadi atom pusat dan tidak pernah punya PEB, sebab kulitnya sudah penuh dengan 2 elektron (duplet). Untuk ion, jangan lupa muatannya: OH^- punya $6 + 1 + 1 = 8$ elektron, sedangkan NH_4^+ punya $5 + 4 - 1 = 8$ elektron.

11.3 Ikatan kovalen koordinasi: satu pihak yang membawa payung

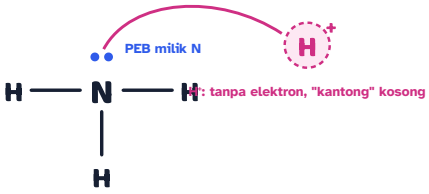
Pada ikatan kovalen biasa, setiap atom menyumbang satu elektron ke pasangan bersama. Tetapi ada kalanya **kedua** elektron berasal dari satu atom saja, seperti satu orang yang membawa payung lalu mengajak temannya berteduh. Atom penyumbang harus punya PEB, sedangkan atom penerima harus punya "tempat kosong".

DEFINISI · IKATAN KOVALEN KOORDINASI

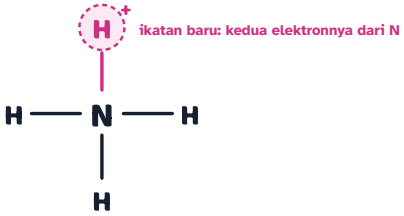
Ikatan kovalen koordinasi (ikatan datif) adalah ikatan kovalen yang pasangan elektron bersamanya berasal dari **satu atom saja** (donor). Atom lain (akseptor) menerima pasangan itu ke orbital yang kosong. Kadang ditulis dengan panah dari donor ke akseptor, misalnya $H_3N \longrightarrow H^+$.



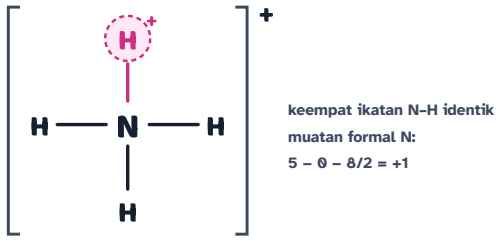
Langkah 1. Amonia, NH_3, punya satu PEB pada atom N. Ion H^+ hanyalah proton telanjang: tidak punya elektron sama sekali.



Langkah 2. PEB milik N "menyambar" proton. Panah lengkung menunjukkan ke mana pasangan elektron bergerak.



Langkah 3. Terbentuk ikatan N–H baru yang **kedua elektronnya berasal dari N**: inilah ikatan kovalen koordinasi.



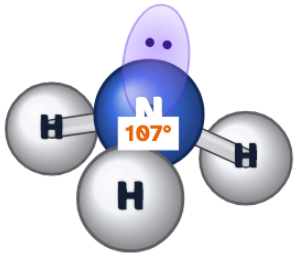
Langkah 4. Hasilnya ion amonium, NH_4^+. Setelah terbentuk, keempat ikatan N–H sama persis. Muatan +1 milik seluruh ion; secara formal ditempatkan pada N.

Dengan cara yang sama, molekul air menangkap H^+ menjadi **ion hidronium**, H_3O^+. Ion inilah yang sebenarnya beredar di setiap larutan asam (Bab 26):

$$NH_3 + H^+ \longrightarrow NH_4^+ \qquad H_2O + H^+ \longrightarrow H_3O^+$$

Contoh yang lebih mengejutkan adalah **karbon monoksida**, CO. Dua pasang elektron dipakai bersama dengan cara biasa, sedangkan pasangan ketiga disumbangkan O kepada C. Hasilnya ikatan rangkap tiga $C{\equiv}O$ yang sangat kuat (1.072 kJ/mol). Boron trifluorida, BF_3, yang boronnya "kekurangan" elektron, juga gemar menerima PEB dari amonia: $F_3B \longleftarrow NH_3$.

MOLEKUL 3D **Sebelum dan sesudah menangkap proton**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Amonia (VSEPR) NH_3

Mr ≈ 17,03 | AX3E · piramida trigonal

Satu pasangan elektron bebas menekan ketiga ikatan N–H sehingga sudutnya mengecil menjadi ±107°.

Bandingkan NH_3 dengan NH_4^+, lalu H_2O dengan H_3O^+. PEB mana yang "hilang"? Ukur keempat ikatan N–H pada NH_4^+: adakah yang berbeda?

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Setelah terbentuk, ikatan kovalen koordinasi tidak bisa dibedakan dari ikatan kovalen biasa. Keempat ikatan N–H pada NH_4^+ sama panjang dan sama kuat; istilah "koordinasi" hanya bercerita tentang *asal-usul* elektronnya, bukan jenis ikatan yang berbeda.

ID **KIMIA NUSANTARA · AMONIUM DI SAWAH**

Pupuk ZA (amonium sulfat, $(NH_4)_2SO_4$) yang dibuat di pabrik pupuk Gresik mengandung ion NH_4^+. Pupuk urea pun di tanah sawah diubah enzim urease menjadi amonia, $CO(NH_2)_2 + H_2O \longrightarrow 2\,NH_3 + CO_2$, lalu amonia di tanah yang lembap menangkap H^+ menjadi ion amonium yang diserap akar padi. Bau pesing di toilet yang jarang disiram? Itu amonia yang belum "menangkap" proton.

11.4 Melanggar oktet dengan gaya

Tebak Dulu!

Belerang heksafluorida, SF_6, adalah gas yang dipakai sebagai penyekat listrik di gardu induk. Berapa elektron yang mengelilingi atom S di dalam molekul ini?

- 8, karena setiap atom dalam molekul stabil harus oktet.
- 6, sama dengan elektron valensi S.
- 12, karena S membentuk enam ikatan tunggal.
- 14, karena S juga menyimpan satu PEB.

Jawabannya: 12. Enam ikatan S–F × 2 elektron = 12 elektron di sekitar S, dan S tidak punya PEB (6 + 6 × 7 = 48 elektron habis untuk 6 ikatan dan 18 PEB di F). Aturan oktet adalah pedoman yang sangat berguna, bukan hukum alam yang mutlak.

Aturan oktet bekerja sangat baik untuk C, N, O, dan F. Namun ada tiga kelompok molekul yang "melanggarnya", dan ketiganya stabil serta nyata.

Jenis penyimpangan	Contoh	Elektron di sekitar atom pusat	Mengapa?
Oktet tak lengkap	$BeCl_2$ (gas)	4	Be hanya punya 2 elektron valensi
	BF_3, BCl_3	6	B hanya punya 3 elektron valensi; gemar menerima PEB
Elektron ganjil (radikal)	NO (11 elektron)	7 pada N	jumlah ganjil tidak bisa semuanya berpasangan
	NO_2 (17 elektron)	7 pada N	gas cokelat dari asap kendaraan
Oktet diperluas	PCl_5	10	atom pusat periode 3 atau lebih besar sehingga muat lebih dari 4 tetangga
	SF_6	12	
	XeF_4	12 (4 PEI + 2 PEB)	

Mengapa hanya atom periode 3 ke bawah yang bisa "melebihi" oktet? Atom P, S, dan Xe jauh lebih besar daripada N dan O, sehingga ada cukup ruang untuk lima atau enam atom tetangga di sekelilingnya. Atom periode 2 terlalu kecil: tidak pernah ada NCl_5 atau OF_6. Atom tetangga yang paling sering muncul pada oktet diperluas adalah F, O, dan Cl, yaitu atom kecil yang sangat elektronegatif.

MOLEKUL 3D

Galeri pelanggar oktet



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Berilium klorida (gas) $BeCl_2$

Mr ≈ 79,91 | AX2 · linear

Be hanya punya 2 pasangan elektron di sekitarnya (oktet tak lengkap) → linear 180°.

Hitung pasangan elektron di sekitar atom pusat setiap molekul (ikatan + PEB). Mana yang kurang dari 4 pasang, mana yang lebih? Bentuk 3D-nya akan kamu pelajari di Bab 12.

KERJAKAN BERSAMA **Belerang tetrafluorida**

Gambarkan struktur Lewis SF_4 dan tentukan jumlah elektron di sekitar atom S. (S golongan 16, F golongan 17)

1. Elektron valensi: S 6 + F 4 × 7 = 34 elektron (17 pasang).
2. S di pusat, empat ikatan tunggal S–F memakai 4 pasang. Sisa 13 pasang.
3. Lengkapi setiap F dengan 3 PEB: 4 × 3 = 12 pasang. Sisa 1 pasang.
4. Pasangan terakhir diletakkan di atom pusat S sebagai PEB.

S dikelilingi 4 PEI + 1 PEB = 10 elektron (oktet diperluas, sah karena S di periode 3). Semua muatan formal nol.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BENARKAH OKTETNYA "DIPERLUAS"?

Buku lama menjelaskan oktet diperluas dengan orbital 3d kosong yang "ikut dipakai" atom pusat (hibridisasi sp^3d dan sp^3d^2, Bab 12). Perhitungan kimia kuantum modern menunjukkan bahwa orbital d hampir tidak ikut berikatan. Molekul seperti SF_6 lebih tepat digambarkan sebagai **molekul hipervalen**: sebagian ikatannya bersifat ion (S bermuatan cukup positif, F negatif) dan sebagian memakai ikatan tiga-pusat-empat-elektron, misalnya F–S–F yang berseberangan memakai bersama 4 elektron.

Untuk ujian sekolah, IGCSE, dan IB, cukup ingat: atom periode 3 ke bawah *boleh* dikelilingi lebih dari 8 elektron; atom periode 2 *tidak pernah*.

11.5 Tarik-tambang elektron: kepolaran ikatan

Pada H_2 dan Cl_2, kedua atom identik sehingga pasangan elektron bersama berada tepat di tengah. Bagaimana dengan HCl? Inti klorin menarik pasangan elektron lebih kuat daripada inti hidrogen, sehingga pasangan itu **condong ke Cl**, seperti tarik-tambang yang tidak seimbang.

DEFINISI · KEELEKTRONEGATIFAN DAN IKATAN POLAR

Keelektronegatifan (χ) adalah kemampuan sebuah atom dalam ikatan untuk menarik pasangan elektron bersama ke arahnya. Pada skala Pauling, fluorin paling elektronegatif (3,98), sedangkan sesium termasuk yang paling rendah (0,79). Jika keelektronegatifan dua atom berbeda, terbentuk **ikatan kovalen polar**: atom yang lebih elektronegatif bermuatan parsial negatif ($\delta-$), atom lainnya bermuatan parsial positif ($\delta+$).

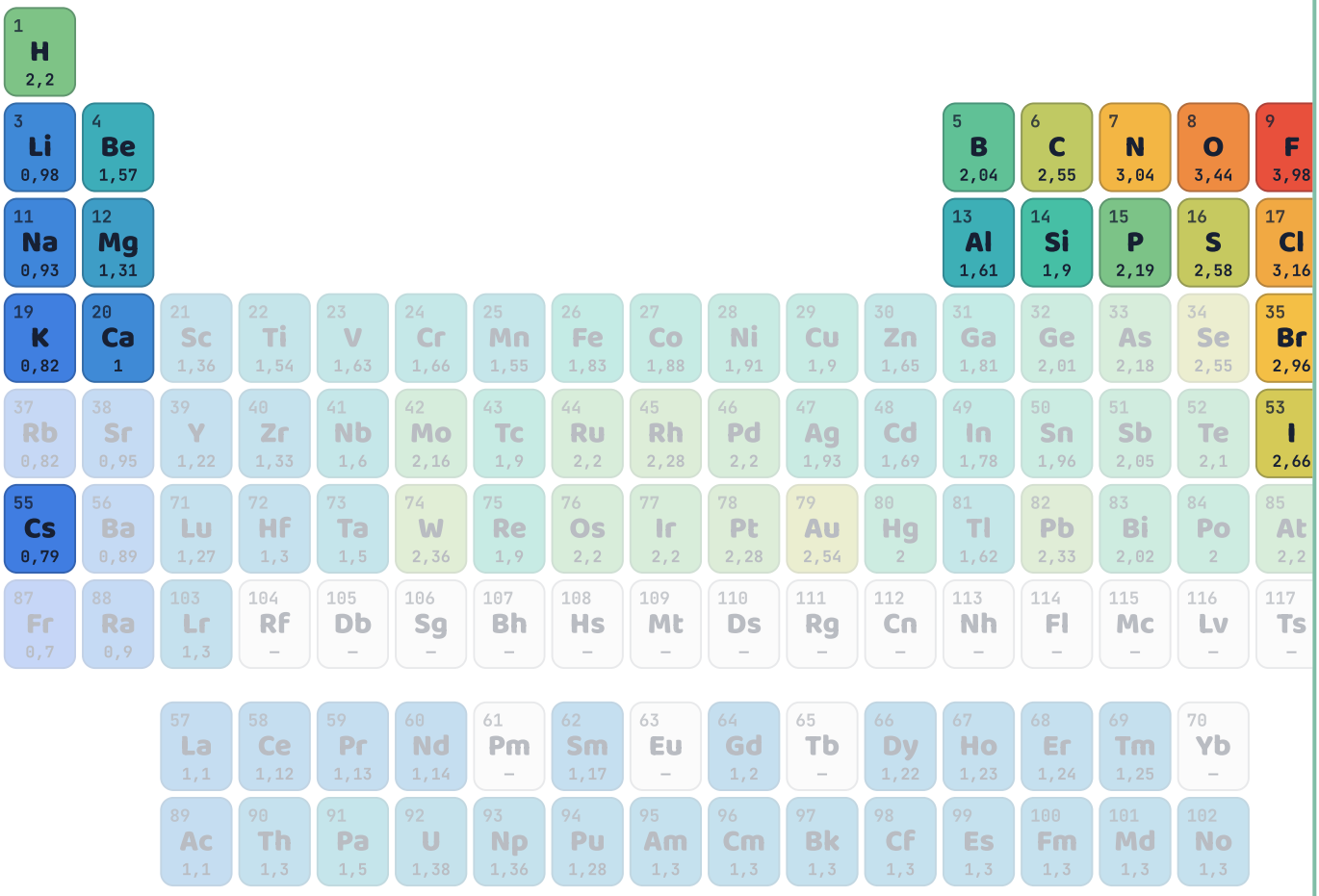
Bahasa sederhana · Bayangkan dua anak bermain tarik-tambang memperebutkan sepasang elektron. Kalau kekuatan mereka sama, elektronnya diam di tengah. Kalau salah satu jauh lebih kuat, elektronnya tertarik ke arahnya. Atom yang "menang" menjadi sedikit negatif, yang "kalah" menjadi sedikit positif.

Keelektronegatifan naik dari kiri ke kanan dalam satu periode (muatan inti makin besar, jari-jari makin kecil) dan turun dari atas ke bawah dalam satu golongan (elektron ikatan makin jauh dari inti). Lihat polanya pada tabel periodik mini ini:

TABEL PERIODIK HIDUP

Peta keelektronegatifan (skala Pauling)

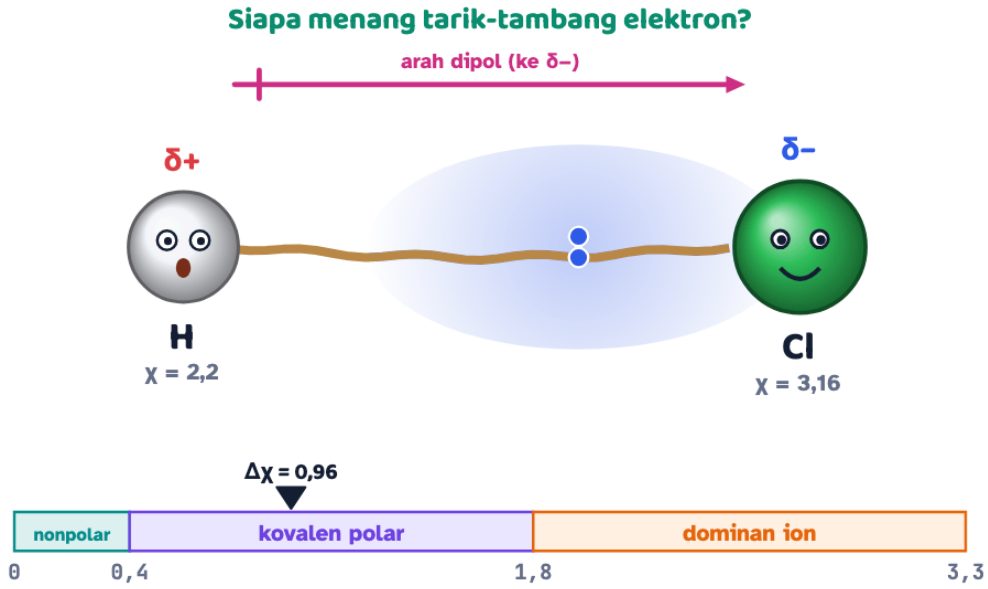
Warnai menurut Keelektronegatifan (Pauling)



Ketuk unsur untuk melihat nilai χ-nya. Unsur mana yang paling "rakus"? Bandingkan dengan peta jari-jari atom: apa hubungannya?

LAB MINI **Tarik-tambang elektron: siapa yang menang?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-11



χ kiri	χ kanan	Δχ	karakter ion ±	Jenis ikatan
2,2	3,16	0,96	21 %	kovalen polar

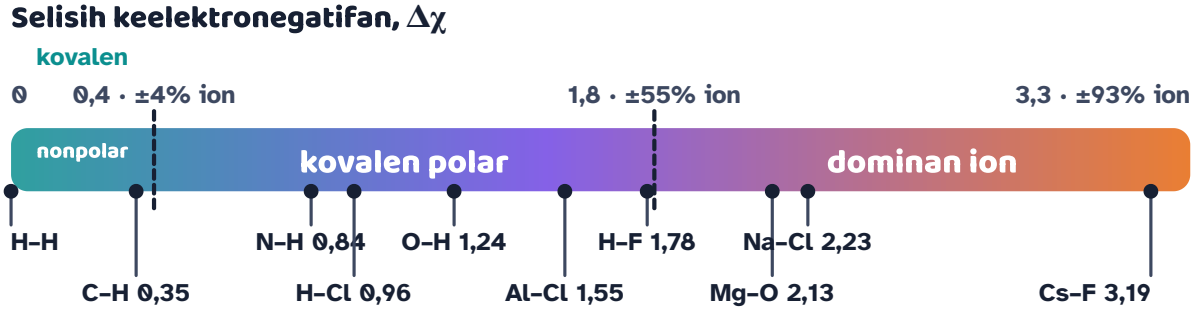
Pilih dua atom. Pasangan elektron (titik biru) dan awan elektronnya bergeser ke atom yang lebih elektronegatif. Coba H–H, lalu H–Cl, H–F, dan Na–Cl. Di mana tali tarik-tambangnya "putus" dan elektron benar-benar pindah? Coba juga Al–Cl dan B–F: apakah logam + nonlogam selalu ion?

ATURAN PRAKTIS · DARI SELISIH KEELEKTRONEGATIFAN KE JENIS IKATAN

Hitung $\Delta\chi = |\chi_A - \chi_B|$. Sebagai pedoman kasar:

- $\Delta\chi < 0{,}4$: **kovalen nonpolar** (H–H, C–H, Cl–Cl)
- $0{,}4 \le \Delta\chi \le 1{,}8$: **kovalen polar** (O–H, N–H, H–Cl)
- $\Delta\chi > 1{,}8$: **dominan ion** (Na–Cl, Mg–O, Cs–F)

Batasnya tidak tajam: ikatan ion dan kovalen adalah dua ujung dari **satu spektrum**.



Spektrum ikatan. Makin besar $\Delta\chi$, makin berat sebelah pasangan elektronnya, sampai akhirnya elektron praktis berpindah dan terbentuk ion. Persentase karakter ion dihitung dengan rumus Pauling di bawah.

RUMUS HIDUP **Selisih keelektronegatifan → jenis ikatan**

$$\%\,\text{ion} \approx \left(1 - e^{-(\chi_B - \chi_A)^2/4}\right) \times 100\%$$

Makin jauh beda kekuatan tarik kedua atom, makin berat sebelah pasangan elektronnya, sampai elektron praktis berpindah dan ikatannya menjadi ion.

χ_A Keelektronegatifan atom A

χ_B Keelektronegatifan atom B

$\%\,\text{ion}$ Karakter ion (perkiraan Pauling) %

KARAKTER ION (PERKIRAAN PAULING)

20,6

%

kovalen polar **ini H–Cl**

Δχ = **0,96**: karakter ion **±20,6** %, karakter kovalen **±79,422** %.

Cek satuan: tanpa satuan (skala Pauling) → persen

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOV-KARAKTER-ION

CONTOH **Ke mana elektron condong?**

Tentukan jenis ikatan dan atom yang bermuatan parsial negatif pada (a) H–Cl, (b) C–H, (c) Na–Cl. (χ: H 2,20; C 2,55; Na 0,93; Cl 3,16)

1. (a) $\Delta\chi = 3{,}16 - 2{,}20 = 0{,}96$: kovalen polar, $\mathrm{H}^{\delta+}-\mathrm{Cl}^{\delta-}$.
2. (b) $\Delta\chi = 2{,}55 - 2{,}20 = 0{,}35$: praktis kovalen nonpolar; C sedikit lebih negatif.
3. (c) $\Delta\chi = 3{,}16 - 0{,}93 = 2{,}23$: dominan ion, Na^+ dan Cl^- (Bab 10).

Urutan kepolaran: C–H < H–Cl < Na–Cl. Itulah sebabnya minyak (penuh ikatan C–H) tidak bercampur dengan air, sedangkan garam mudah larut.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Aturan "Δχ > 1,8 berarti ion" hanyalah pedoman, bukan hukum. Ikatan B–F ($\Delta\chi = 1{,}94$) tetap kovalen karena $\mathrm{BF_3}$ berupa molekul gas, sedangkan aluminium klorida (Al–Cl, $\Delta\chi = 1{,}55$) adalah senyawa logam + nonlogam yang banyak bersifat kovalen dan menyublim pada ±180 °C. Lihat zatnya, bukan hanya angkanya.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Skala keelektronegatifan diusulkan **Linus Pauling** pada 1932. Ia memperhatikan bahwa ikatan antara dua atom berbeda, misalnya H–Cl, selalu lebih kuat daripada rata-rata ikatan H–H dan Cl–Cl. "Kelebihan" energi itu ia tafsirkan sebagai sumbangan tarik-menarik listrik akibat elektron yang condong. Pauling meraih Nobel Kimia 1954 untuk penelitiannya tentang ikatan kimia, lalu Nobel Perdamaian 1962. Ia satu-satunya orang yang memenangi dua Nobel tanpa berbagi dengan orang lain.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

SEGITIGA IKATAN VAN ARKEL–KETELAAR

Satu angka $\Delta\chi$ belum cukup untuk membedakan ikatan kovalen dari ikatan logam: Na–K dan Cl–Cl sama-sama punya $\Delta\chi$ kecil. IB memakai **segitiga ikatan**: sumbu mendatar adalah *rata-rata* keelektronegatifan $\bar{\chi} = \frac{1}{2}(\chi_A + \chi_B)$, sumbu tegak adalah $\Delta\chi$.

- $\bar{\chi}$ kecil, $\Delta\chi$ kecil → **logam** (Na, Na–K)
- $\bar{\chi}$ besar, $\Delta\chi$ kecil → **kovalen** ($\mathrm{Cl_2}$, $\mathrm{CCl_4}$)
- $\Delta\chi$ besar → **ion** (CsF, NaCl)

Senyawa seperti $\mathrm{AlCl_3}$ ($\bar{\chi} = 2{,}39$, $\Delta\chi = 1{,}55$) jatuh di daerah peralihan, sesuai sifatnya yang setengah ion setengah kovalen.

11.6 Lanjut: muatan formal, resonansi, panjang dan energi ikatan

Terkadang satu molekul bisa digambar dengan beberapa struktur Lewis yang sama-sama oktet. Contohnya $\mathrm{CO_2}$: $\mathrm{O{=}C{=}O}$ atau $\mathrm{O{\equiv}C{-}O}$? Kedua struktur memakai 16 elektron dan semua atomnya oktet. Untuk memilih yang paling mendekati kenyataan, kimiawan memakai **muatan formal**: muatan yang "dimiliki" sebuah atom jika setiap pasangan ikatan dibagi **sama rata**.

RUMUS HIDUP

Muatan formal

$$MF = V - N - \frac{B}{2}$$

Muatan formal = elektron valensi atom bebas dikurangi elektron yang menjadi miliknya di dalam molekul: semua elektron bebasnya ditambah separuh elektron ikatannya.

- V Elektron valensi atom bebas
- N Elektron bebas (bukan ikatan) pada atom itu
- B Elektron ikatan di sekitar atom itu
- MF Muatan formal



ini N pada NH_4^+: +1

Atom dengan **5** elektron valensi, **0** elektron bebas, dan **8** elektron ikatan bermuatan formal **1**.

Cek satuan: satuan muatan elementer (e)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOV-MUATAN-FORMAL

ATURAN · MEMILIH STRUKTUR LEWIS TERBAIK

1. Jumlah muatan formal semua atom selalu sama dengan muatan molekul atau ion.
2. Struktur terbaik punya muatan formal **sekecil mungkin** (sebanyak mungkin nol).
3. Jika harus ada muatan negatif, letakkan pada atom yang **paling elektronegatif**.
4. Hindari muatan formal sejenis pada dua atom yang bertetangga.

Untuk CO_2: $O{=}C{=}O$ bermuatan formal (0, 0, 0), sedangkan $O{\equiv}C{-}O$ bermuatan formal (+1, 0, −1). Pemenangnya jelas $O{=}C{=}O$.

ADU CEPAT **Muatan formal kilat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-11

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

MF = V − N − B/2. Contoh: N pada NH_4^+ → 5 − 0 − 8/2 = +1.

COBA SENDIRI **Gas tertawa di ruang praktik dokter gigi**

Dinitrogen oksida, N_2O ("gas tertawa"), dipakai sebagai pereda nyeri ringan di sebagian praktik dokter gigi. Susunan atomnya N–N–O. (a) Gambarkan tiga struktur Lewis yang oktet dan hitung muatan formalnya. (b) Tentukan struktur yang paling besar kontribusinya. (c) Mengapa susunannya bukan N–O–N?

1. Elektron valensi: $2(5) + 6 = 16$. Trik N − A: $(24 - 16)/2 = 4$ garis ikatan.
2. Struktur 1: $N{=}N{=}O$. MF: N ujung $5 - 4 - 2 = -1$; N tengah $5 - 0 - 4 = +1$; O $6 - 4 - 2 = 0$.
3. Struktur 2: $N{\equiv}N{-}O$. MF: N ujung $5 - 2 - 3 = 0$; N tengah $+1$; O $6 - 6 - 1 = -1$.
4. Struktur 3: $N{-}N{\equiv}O$. MF: N ujung $5 - 6 - 1 = -2$; N tengah $+1$; O $6 - 2 - 3 = +1$. Muatan besar dan positif pada O: paling buruk.
5. Struktur 2 menaruh muatan negatif pada O (paling elektronegatif), struktur 1 pada N. Keduanya menyumbang; struktur 2 sedikit lebih besar kontribusinya.
6. Susunan N–O–N terbaik ($N{=}O{=}N$) memberi MF –1, +2, –1: muatan +2 pada O yang elektronegatif sangat tidak disukai.

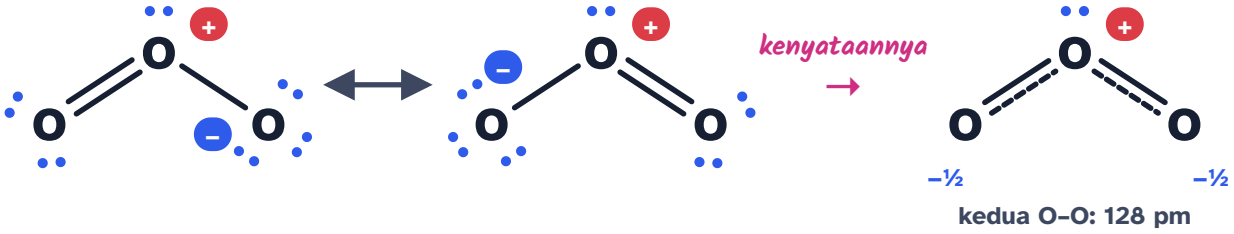
N_2O adalah hibrida dari $N{\equiv}N{-}O$ dan $N{=}N{=}O$. Data mendukungnya: ikatan N–N (113 pm) di antara rangkap dua dan rangkap tiga, ikatan N–O (119 pm) di antara tunggal dan rangkap dua.

Resonansi: satu molekul, beberapa gambar

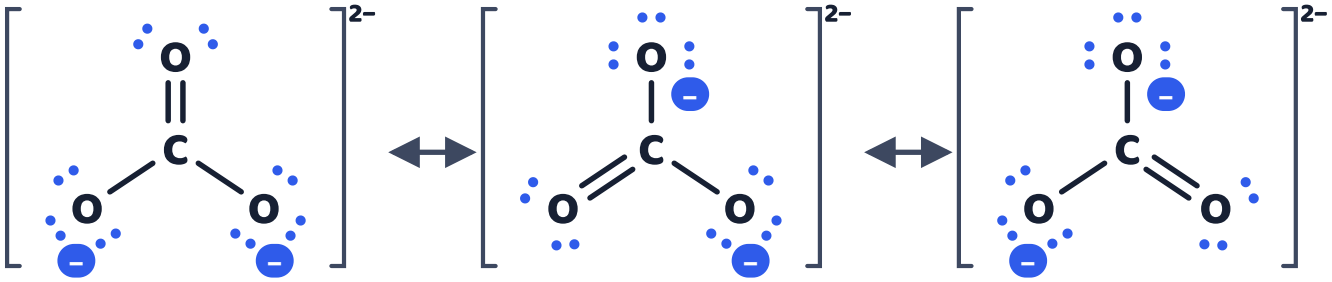
Ozon, O_3, punya 18 elektron valensi. Struktur Lewisnya menempatkan satu ikatan rangkap dua dan satu ikatan tunggal. Tetapi di sisi mana ikatan rangkapnya? Kiri dan kanan sama-sama sah. Hasil pengukuran justru mengejutkan: **kedua ikatan O–O sama panjang**, yaitu 128 pm, di antara O–O tunggal (±148 pm) dan O=O (121 pm).

Penjelasannya adalah **resonansi**. Molekul ozon yang sebenarnya bukan struktur kiri atau kanan, melainkan **hibrida resonansi**: pasangan elektron "ekstra" tersebar (terdelokalisasi) merata di kedua ikatan. Struktur-struktur Lewis yang kita gambar hanyalah cara menuliskan sesuatu yang tidak bisa diwakili satu gambar saja.

Ozon, O_3 (18 elektron valensi)



Ion karbonat, CO_3^{2-} (24 elektron valensi)



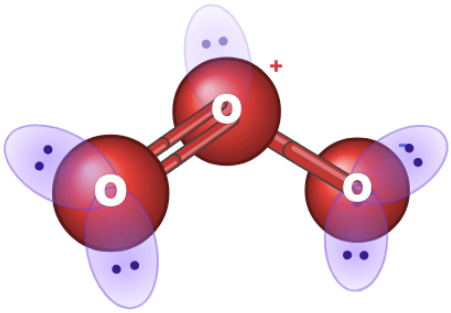
Struktur resonansi ozon dan ion karbonat. Panah berkepala dua (↔) berarti "struktur sebenarnya adalah campuran keduanya", bukan reaksi bolak-balik. Pada ion karbonat dari batu kapur, ketiga ikatan C–O sama panjang (±129 pm) dengan orde ikatan rata-rata $1\frac{1}{3}$.

AWAS JEBAKAN

Resonansi bukan berarti molekul berganti-ganti struktur dengan cepat. Warna hijau bukanlah "sebentar biru, sebentar kuning", melainkan campuran keduanya sepanjang waktu. Begitu pula ozon: setiap saat kedua ikatannya sama, masing-masing berorde 1,5.

MOLEKUL 3D

Resonansi dalam 3D: ukur, lalu terkejutlah



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Ozon O_3 Mr ≈ 48

Digambar sebagai satu struktur resonansi, tetapi koordinatnya nyata: kedua O–O sama panjang (128 pm) dan bersudut ±117°. Ozon di stratosfer menyerap sinar UV.

Model menggambar ikatan rangkap di satu tempat saja, tetapi ketuk dua atom untuk mengukur: pada ozon dan karbonat, semua ikatannya sama panjang! Pada benzena, keenam ikatan C–C sekitar 139–140 pm, di antara C–C (154 pm) dan C=C (134 pm).

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1865, **August Kekulé** mengusulkan bahwa enam atom karbon benzena membentuk cincin dengan ikatan tunggal dan rangkap bergantian. Menurut kisah yang ia ceritakan sendiri bertahun-tahun kemudian, gagasan itu muncul ketika ia melamun tentang ular yang menggigit ekornya. Masalahnya, semua ikatan C–C benzena ternyata sama panjang. Teka-teki ini baru terjawab tuntas pada 1930-an lewat teori resonansi (Pauling) dan teori orbital molekul: elektron benzena terdelokalisasi merata di seluruh cincin, sehingga kini cincinnya sering digambar dengan lingkaran di tengah.

Panjang dan energi ikatan

Tebak Dulu!

Energi ikatan tunggal C–C adalah 347 kJ/mol. Kira-kira berapa energi ikatan rangkap dua C=C?

694 kJ/mol, tepat dua kali karena pasangannya dua.

614 kJ/mol: lebih kuat, tetapi kurang dari dua kali.

347 kJ/mol, sama saja karena atomnya sama.

Kurang dari 347 kJ/mol, karena elektronnya berdesakan.

Jawabannya: 614 kJ/mol. Pasangan kedua tidak berada tepat di antara kedua inti seperti pasangan pertama, melainkan di "atas" dan "bawah" sumbu ikatan (ikatan pi, Bab 12). Tumpang tindihnya kurang efektif sehingga sumbangannya hanya 614 − 347 = 267 kJ/mol.

Orde ikatan adalah jumlah pasangan elektron yang dipakai bersama di antara dua atom: 1 untuk tunggal, 2 untuk rangkap dua, 3 untuk rangkap tiga, dan bisa pecahan untuk hibrida resonansi (ozon 1,5). Makin besar orde ikatan, ikatannya makin **kuat** dan makin **pendek**.

Ikatan	Orde	Panjang rata-rata (pm)	Energi ikatan rata-rata (kJ/mol)
C–C	1	154	347
C=C	2	134	614
C≡C	3	120	839
C–C benzena	1,5	140	±518
C–O	1	143	358
C=O	2	±122 (CO_2: 116)	±745 (CO_2: ±800)
C≡O (CO)	3	113	1.072
N–N / N=N / N≡N	1 / 2 / 3	145 / 125 / 110	±160 / ±420 / 945
O–O / O=O	1 / 2	148 / 121	±145 / 498

Kata "rata-rata" penting: energi ikatan C–O di metanol sedikit berbeda dengan di etanol atau gula, karena tetangganya berbeda. Tabel memuat nilai rata-rata dari banyak senyawa, dan angkanya bisa sedikit berbeda antara buku data yang satu dan yang lain. Kamu akan memakainya untuk memperkirakan kalor reaksi di Bab 19.

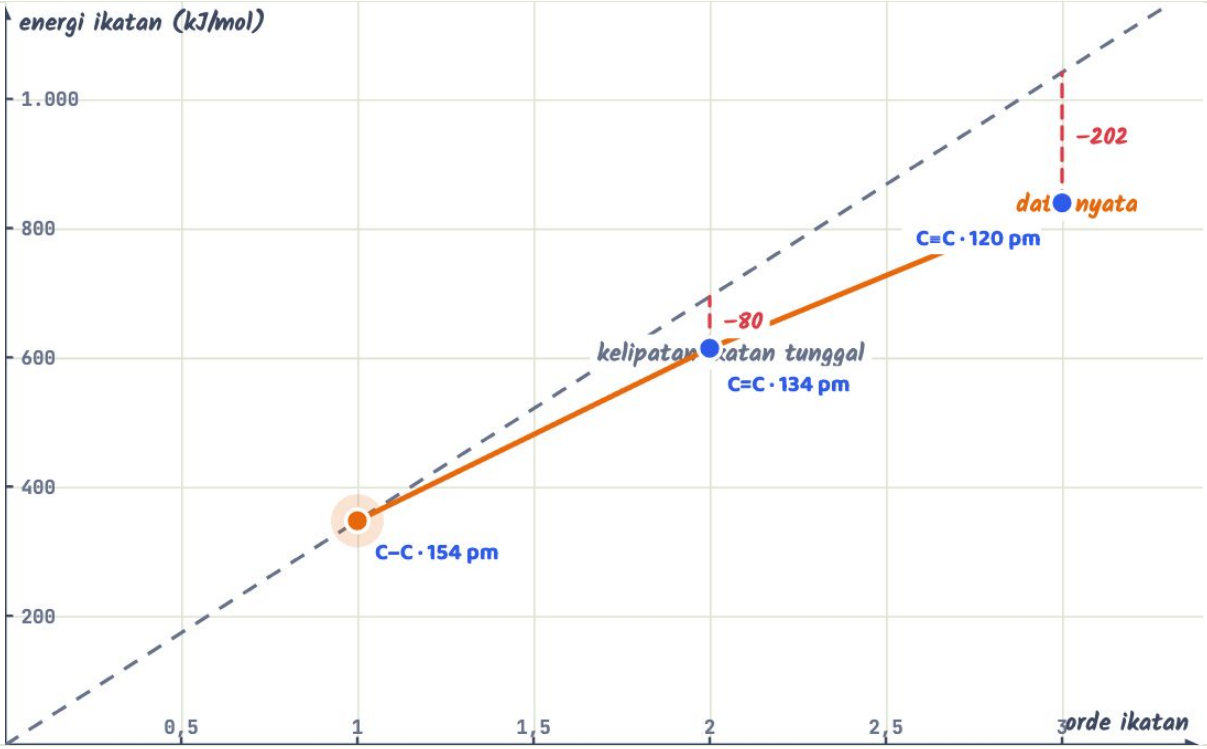
GRAFIK HIDUP

Orde ikatan karbon–karbon: makin rangkap, makin kuat dan pendek

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-11

$$\mathrm{C{-}C} \;\rightarrow\; \mathrm{C{=}C} \;\rightarrow\; \mathrm{C{\equiv}C}$$

$$\text{orde } 1: \quad E \approx 347\ \mathrm{kJ/mol}, \quad d \approx 154\ \mathrm{pm}$$



energi (data)	kalau sekadar kelipatan	panjang (rumus empiris)
347 kJ/mol	347 kJ/mol	154 pm

Seret titik jingga dari orde 1 ke orde 3. Garis putus-putus adalah tebakan "dua kali, tiga kali lipat". Seberapa jauh data nyata di bawahnya? Panjang ikatan dihitung dengan rumus empiris $d \approx 154 - 71 \log n$ pm.

MITOS

"Ikatan rangkap dua dua kali lebih kuat daripada ikatan tunggal."

FAKTA

C=C (614 kJ/mol) kurang dari 2 × C–C (694 kJ/mol). Pasangan kedua membentuk ikatan pi yang tumpang tindihnya lebih lemah. Rangkap tiga pun kurang dari tiga kali lipat.

MITOS

"Pada ikatan kovalen, elektron selalu dibagi sama rata."

FAKTA

Hanya jika kedua atomnya sama (H–H, Cl–Cl). Pada H–Cl dan O–H, pasangan elektron condong ke atom yang lebih elektronegatif sehingga ikatannya polar.

MITOS

"Setiap atom dalam molekul yang stabil pasti oktet."

FAKTA

H cukup 2 elektron, B pada BF_3 hanya 6, N pada NO_2 hanya 7, dan S pada SF_6 malah 12. Oktet adalah pedoman, terutama untuk C, N, O, F.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MUATAN FORMAL BUKAN BILANGAN OKSIDASI

Keduanya sama-sama "muatan khayalan", tetapi dengan asumsi yang berlawanan. **Muatan formal** menganggap setiap pasangan ikatan dibagi *sama rata* (ikatan 100% kovalen). **Bilangan oksidasi** (Bab 29) menganggap seluruh pasangan ikatan menjadi milik atom yang lebih elektronegatif (ikatan 100% ion).

Contoh $C{\equiv}O$: muatan formal C = −1 dan O = +1, sedangkan bilangan oksidasi C = +2 dan O = −2. Kenyataannya di antara keduanya: momen dipol CO sangat kecil (0,11 D) dengan ujung C sedikit negatif. Itulah sebabnya CO menempel pada zat besi hemoglobin lewat atom C-nya, lebih dari 200 kali lebih kuat daripada O_2, sehingga sangat beracun.

Kimia di sekitarmu

LPG di dapur

Propana dan butana tersusun atas ikatan tunggal C–C dan C–H yang nyaris nonpolar. Saat terbakar, ikatan itu putus dan terbentuk ikatan C=O serta O–H yang lebih kuat; selisih energinya menjadi panas kompor. Bau "gas bocor" berasal dari zat berbau belerang yang sengaja ditambahkan.

Air, pelarut serba bisa

Ikatan O–H sangat polar ($\Delta\chi$ 1,24). Ujung H yang $\delta+$ dan ujung O yang $\delta-$ membuat air mampu melarutkan garam, gula, dan sirup. Bab 13 menceritakan kehebatan lainnya.

Waspada formalin

Gugus C=O formaldehida sangat reaktif dan mengikat protein. Karena itu formalin dilarang untuk tahu, mi basah, atau ikan; petugas pengawas pangan rutin mengujinya di pasar.

SF_6 di gardu listrik

Molekul pelanggar oktet ini sangat stabil dan tidak menghantar listrik, sehingga dipakai sebagai penyekat di pemutus arus gardu induk. Sayangnya, efek rumah kacanya lebih dari 20.000 kali CO_2, jadi kebocorannya harus dicegah.

Ozon, pelindung sekaligus polutan

Molekul beresonansi O_3 di stratosfer menyerap sinar UV yang merusak kulit. Di permukaan tanah, ozon dari asap kendaraan yang terkena sinar matahari justru menjadi polutan yang membuat mata pedih.

Cek Cepat

Berapa pasangan elektron yang dipakai bersama dalam molekul N_2?

- 1 pasang
- 2 pasang
- 3 pasang
- 6 pasang

Ikatan manakah yang paling polar? (χ: H 2,20; C 2,55; N 3,04; Cl 3,16; F 3,98)

- C–H
- H–F
- N–H
- H–Cl

Spesi manakah yang mengandung ikatan kovalen koordinasi?

- NH_4^+
- CH_4
- H_2O
- CO_2

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. A

Tantangan Rumah: molekul dari permen kenyal

Bahan: permen kenyal (jeli) atau plastisin dalam 4 warna, tusuk gigi, sedotan lentur (untuk ikatan rangkap), kertas, dan spidol.

1. Tentukan kode warna seperti di Molekul 3D: hitam/cokelat = C, merah = O, biru = N, putih/kuning = H.
2. Satu tusuk gigi = satu pasangan elektron ikatan. Untuk ikatan rangkap dua atau tiga, pakai dua atau tiga potong sedotan lentur yang dilengkungkan di antara dua atom yang sama.
3. Bangun H_2O, CH_4, CO_2, N_2, C_2H_4, dan HCN. Pastikan H selalu punya 1 tangan, O 2, N 3, dan C 4.
4. Gambar struktur Lewis setiap model di kertas, lengkap dengan PEB, lalu periksa dengan Penggambar Lewis di 11.2.

Keselamatan: ujung tusuk gigi runcing; pegang di bagian tengah dan jangan diarahkan ke wajah. Jangan memakan permen yang sudah ditusuk dan dipegang-pegang. Awasi adik kecil agar tidak menelan permen atau plastisin. Buang sisa permen ke tempat sampah tertutup supaya tidak mengundang semut, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Mengapa model N_2 dan CO_2 sulit dibuat dengan tusuk gigi lurus saja? Hitung jumlah "batang" pada CO_2 dan HCN: mengapa keduanya sama-sama 4?

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 11 dalam 3 menit

☑️ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **ikatan kovalen** sebagai pemakaian bersama pasangan elektron dan membedakan ikatan **tunggal, rangkap dua, dan rangkap tiga**
- menggambar **struktur Lewis** molekul dan ion poliatom langkah demi langkah
- mengenali **ikatan kovalen koordinasi** dan molekul yang **menyimpang dari aturan oktet**
- memperkirakan **kepolaran ikatan** dari selisih keelektronegatifan dan memandang ion–kovalen sebagai spektrum
- menghitung **muatan formal**, menuliskan **struktur resonansi**, dan mengaitkan orde ikatan dengan panjang dan energi ikatan

🔑 Istilah kunci

Ikatan kovalen · molekul · panjang ikatan · energi ikatan · diagram titik-silang · ikatan rangkap dua · ikatan rangkap tiga · ikatan tunggal · Lambang Lewis · pasangan elektron ikatan (PEI) · pasangan elektron bebas (PEB) · Ikatan kovalen koordinasi · ion hidronium · Keelektronegatifan · ikatan kovalen polar · muatan formal

🧮 Rumus penting

$$\text{ikatan} = \frac{N - A}{2}, \qquad N = 8\,n_X + 2\,n_H$$

Jumlah ikatan dari kebutuhan dan ketersediaan elektron. Elektron yang dibutuhkan semua atom dikurangi elektron yang tersedia adalah elektron yang harus dipakai berdua; setiap ikatan memakai dua.

$$\%\,\text{ion} \approx \left(1 - e^{-(\chi_B - \chi_A)^2/4}\right) \times 100\%$$

Selisih keelektronegatifan → jenis ikatan. Makin jauh beda kekuatan tarik kedua atom, makin berat sebelah pasangan elektronnya, sampai elektron praktis berpindah dan ikatannya menjadi ion.

$$MF = V - N - \frac{B}{2}$$

Muatan formal. Muatan formal = elektron valensi atom bebas dikurangi elektron yang menjadi miliknya di dalam molekul: semua elektron bebasnya ditambah separuh elektron ikatannya.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Satu garis ikatan berarti sepasang (2) elektron, bukan satu elektron.
- Hidrogen tidak pernah menjadi atom pusat dan tidak pernah punya PEB, sebab kulitnya sudah penuh dengan 2 elektron (duplet).
- Setelah terbentuk, ikatan kovalen koordinasi tidak bisa dibedakan dari ikatan kovalen biasa.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=11

Teka-teki untuk Bab 12

CO_2 dan H_2O sama-sama terdiri atas tiga atom dengan atom pusat di tengah. Tetapi molekul CO_2 lurus seperti tusuk sate, sedangkan molekul air bengkok seperti huruf V. Siapa yang "membengkokkan" molekul air?

▼ **Intip petunjuk**

Lihat lagi struktur Lewisnya. Atom C pada CO_2 tidak punya PEB, sedangkan atom O pada H_2O punya **dua PEB**. Pasangan elektron, baik ikatan maupun bebas, saling tolak dan berusaha menjauh sejauh mungkin, seperti balon-balon yang diikat di satu titik. Di Bab 12 aturan ini disebut teori VSEPR.

12 Bentuk Molekul: Balon Elektron yang Tak Pernah Akur

Karbon dioksida lurus seperti lidi, tetapi air bengkok seperti bumerang. Rahasianya sederhana: pasangan elektron bersifat seperti balon pesta yang diikat jadi satu, selalu saling menjauh. Dari aturan kecil itu lahir bentuk setiap molekul, dari metana di sawah sampai obat di apotek.

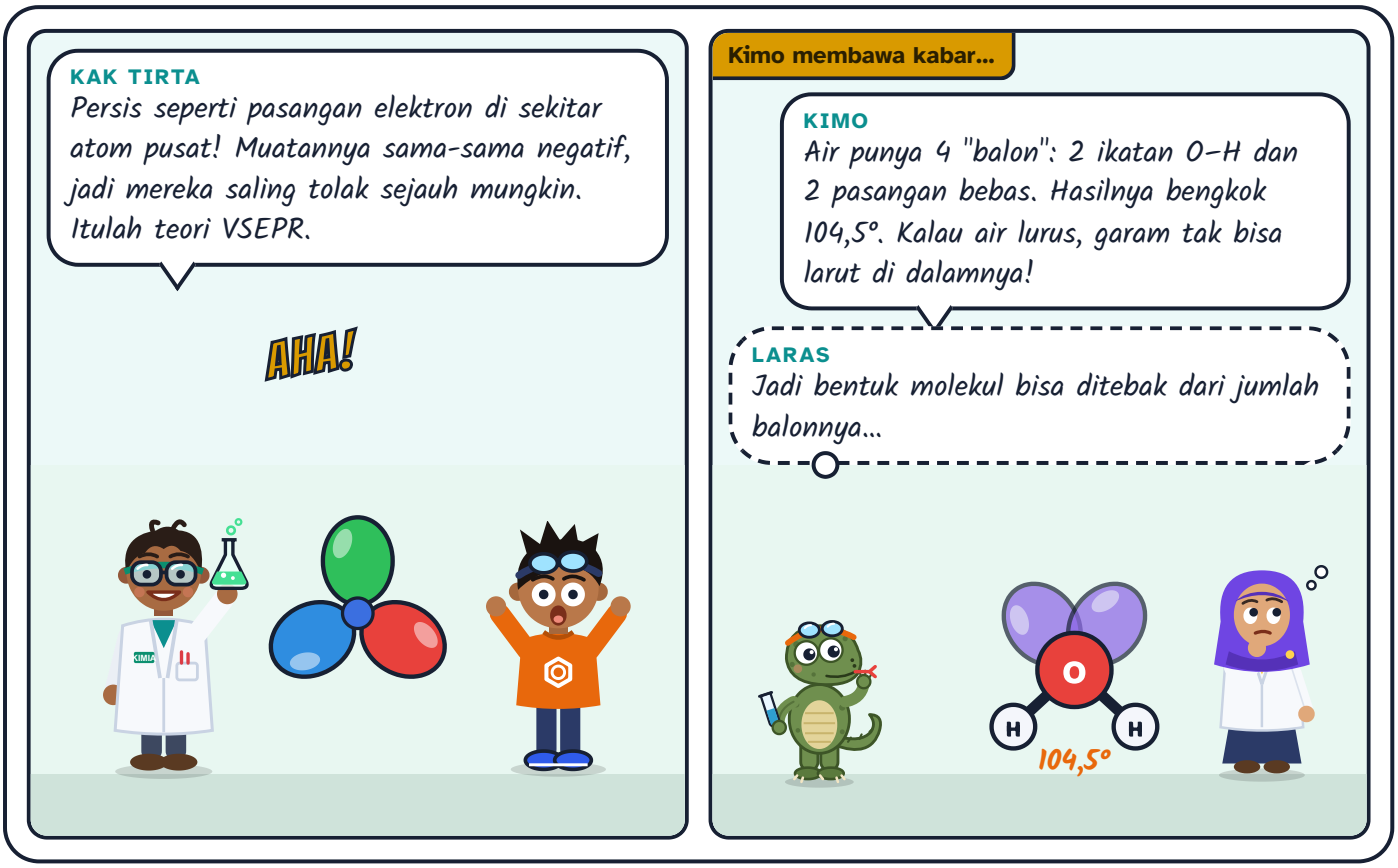
Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **jumlah domain elektron** atom pusat dan menuliskan **notasi VSEPR AX_nE_m**;
- meramalkan **bentuk molekul** (dari linear sampai oktahedral beserta turunannya) dan sudut ikatannya;
- menjelaskan mengapa **pasangan elektron bebas** menyempitkan sudut: 109,5° → 107° → 104,5°;
- menentukan **kepolaran molekul** dari bentuk dan arah dipol ikatannya;
- menjelaskan **hibridisasi** sp, sp^2, sp^3, sp^3d, sp^3d^2 serta membedakan **ikatan sigma (σ) dan pi (π)**, termasuk sekilas teori orbital molekul O_2.

BALON YANG TIDAK AKUR

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

CO_2 dan H_2O sama-sama terdiri atas tiga atom dengan atom pusat di tengah. CO_2 berbentuk lurus. Bagaimana bentuk molekul air?

- Lurus 180°, sama seperti CO_2, karena kedua atom H saling tolak sejauh mungkin.
- Bengkok, dengan sudut H–O–H sekitar 104,5°.
- Bengkok dengan sudut tepat 90°, karena orbital p saling tegak lurus.
- Segitiga datar 120°, karena ada tiga atom.

Jawabannya: bengkok ±104,5°. Yang saling tolak bukan atom H, melainkan *pasangan elektron*. Atom O dikelilingi empat "balon" elektron: dua ikatan O–H dan dua pasangan elektron bebas. Keempatnya menjauh membentuk tetrahedron, tetapi yang tampak hanya atom-atomnya, jadi molekul air bengkok. Atom C dalam CO_2 hanya punya dua "balon", sehingga lurus.

12.1 Balon pesta dan teori VSEPR

Coba ikat beberapa balon tiup pada satu simpul. Dua balon selalu berseberangan membentuk garis lurus. Tiga balon membentuk segitiga datar seperti baling-baling. Empat balon tidak mau menjadi tanda plus yang datar,

melainkan menyebar ke segala arah seperti kaki-kaki sebuah limas. Setiap balon "ingin" punya ruang sebanyak mungkin, sehingga mereka saling mendorong sampai berjarak sejauh-jauhnya.

Bahasa sederhana · Bayangkan atom pusat sebagai simpul pengikat balon. Setiap pasangan elektron di sekelilingnya adalah satu balon. Karena elektron bermuatan negatif, balon-balon itu saling menolak dan mencari posisi sejauh mungkin. Posisi balon-balon itulah yang membuat molekul berbentuk lurus, segitiga, atau limas.

Elektron di sekitar atom pusat berperilaku serupa. Pasangan-pasangan elektron sama-sama bermuatan negatif, sehingga saling tolak. Gagasan sederhana ini disebut teori **VSEPR** (*Valence Shell Electron Pair Repulsion*, tolakan pasangan elektron kulit valensi).

DEFINISI · TEORI VSEPR

Pasangan-pasangan elektron di kulit valensi atom pusat saling tolak dan menempati posisi **sejauh mungkin** satu sama lain. Susunan pasangan elektron inilah yang menentukan **bentuk molekul**.

Daerah tempat elektron berkumpul di sekitar atom pusat disebut **domain elektron**. Ada dua jenis domain:

- **pasangan elektron ikatan (PEI)**: elektron yang dipakai bersama dengan atom tetangga. Ujung balon ini "diduduki" sebuah atom;
- **pasangan elektron bebas (PEB)**: pasangan elektron milik atom pusat sendiri, tanpa atom di ujungnya.

Kimiawan meringkasnya dengan **notasi VSEPR AX_nE_m**: **A** adalah atom pusat, **X** adalah atom yang terikat pada A (sebanyak *n*), dan **E** adalah pasangan elektron bebas pada A (sebanyak *m*). Contohnya: metana $\mathrm{CH_4}$ adalah AX_4, amonia $\mathrm{NH_3}$ adalah AX_3E, dan air $\mathrm{H_2O}$ adalah AX_2E_2.

$$\text{jumlah domain} = \underbrace{n}_{\text{PEI} = \text{atom terikat}} + \underbrace{m}_{\text{PEB}}$$

Cara cepat menghitung jumlah domain tanpa menggambar struktur Lewis lengkap: jumlahkan elektron valensi atom pusat (V) dan elektron yang "disumbangkan" atom tetangga (L), sesuaikan dengan muatan ion (q), lalu bagi dua. Atom H dan halogen yang terikat dengan ikatan tunggal masing-masing menyumbang 1 elektron, sedangkan O dan S yang berikatan rangkap dengan atom pusat dihitung 0.

RUMUS HIDUP

Jumlah domain elektron atom pusat

$$D = \frac{1}{2}\left(V + L - q\right)$$

Elektron valensi atom pusat ditambah sumbangan atom tetangga, dikurangi muatan ion, lalu dibagi dua: itulah banyaknya 'balon' di sekitar atom pusat. Kurangi dengan jumlah atom terikat untuk mendapatkan pasangan bebas.

- V Elektron valensi atom pusat
- L Elektron dari atom tetangga
- q Muatan ion
- X Jumlah atom terikat (PEI)
- D Jumlah domain `domain`

JUMLAH DOMAIN

4

domain

AX_2E_2 · bengkok · **ini H_2O**

4 domain di sekitar atom pusat: **2** PEI dan **2** PEB.

Cek satuan: elektron ÷ 2 = pasangan elektron = domain ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-DOMAIN-VSEPR

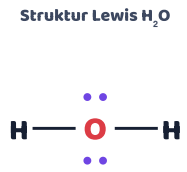
TRIK KAK TIRTA · HITUNG BALONNYA

"Satu tetangga, satu balon." Ikatan tunggal, rangkap dua, atau rangkap tiga ke atom yang *sama* tetap dihitung **satu domain**, karena semua elektronnya berada di daerah yang sama, di antara dua inti. Lalu tambahkan PEB atom pusat. Domain = jumlah atom tetangga + jumlah PEB.

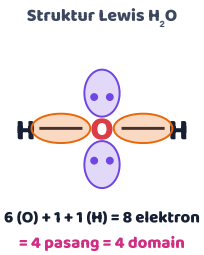
AWAS JEBAKAN

Ikatan rangkap tidak dihitung sebagai dua atau tiga domain. Dalam $\mathrm{O{=}C{=}O}$, atom C hanya punya **dua** domain (dua ikatan rangkap dua, tanpa PEB), sehingga $\mathrm{CO_2}$ linear. Kalau ikatan rangkap dihitung empat domain, kamu akan keliru meramalkan bentuk tetrahedral.

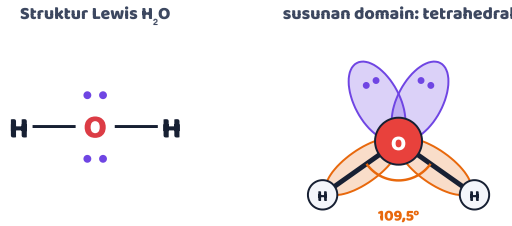
Mari kita lihat langkah demi langkah bagaimana VSEPR meramalkan bentuk molekul air.



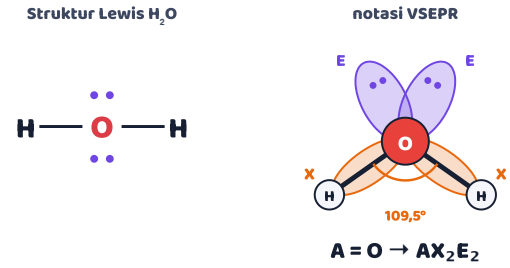
Langkah 1. Mulai dari struktur Lewis air. Atom pusatnya O. Di sekitar O ada dua ikatan O–H dan dua pasangan elektron bebas (titik ungu).



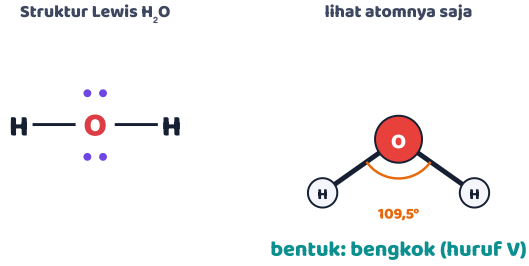
Langkah 2. Hitung balonnya: O punya 6 elektron valensi, setiap H menyumbang 1. Total 8 elektron = 4 pasang = **4 domain**, yaitu 2 PEI (oranye) dan 2 PEB (ungu).



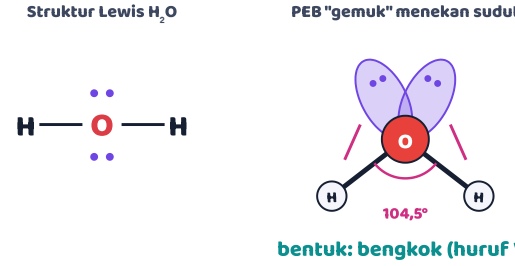
Langkah 3. Empat domain saling menjauh sejauh mungkin di ruang tiga dimensi. Susunannya **tetrahedral**, dengan sudut ideal 109,5°.



Langkah 4. Beri nama: A = atom O, dua X = dua atom H, dua E = dua PEB. Notasi VSEPR-nya AX_2E_2.



Langkah 5. Bentuk molekul hanya dilihat dari posisi **atom**. PEB tetap ada tetapi tidak "terlihat" sebagai atom, sehingga H–O–H tampak **bengkok** seperti huruf V.

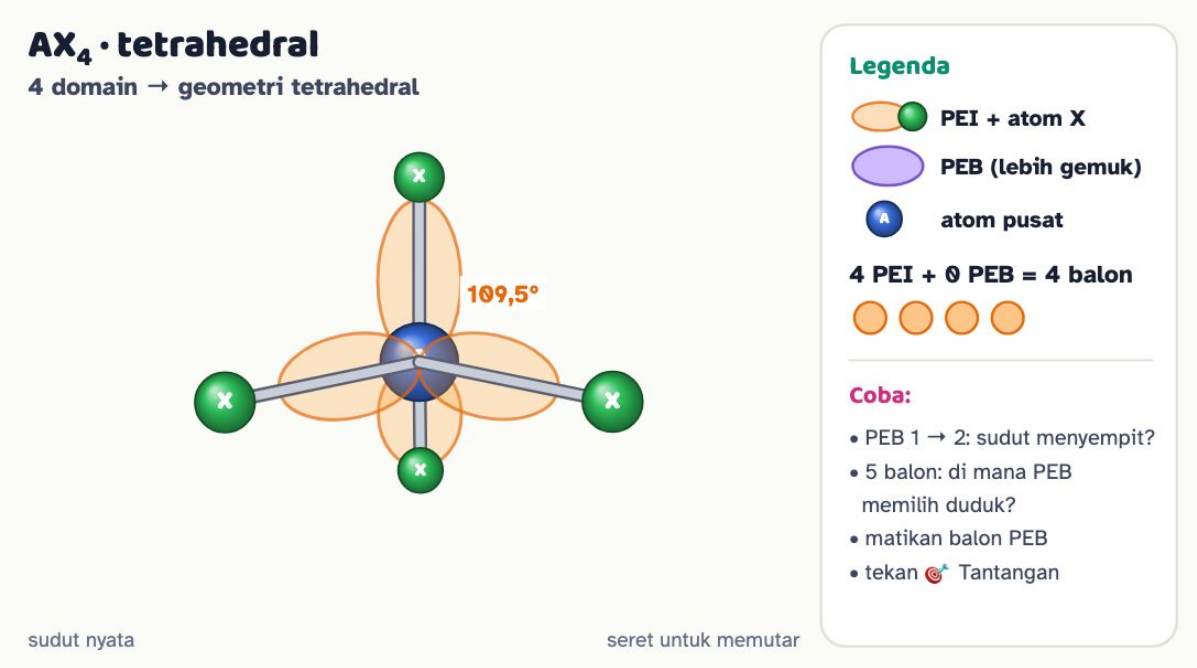


Langkah 6. PEB lebih "gemuk" daripada PEI dan menekan kedua ikatan O–H. Sudutnya menyempit dari 109,5° menjadi **104,5°**. Subbab 12.3 menjelaskan alasannya.

Sekarang giliranmu menjadi "pengikat balon". Atur jumlah pasangan elektron ikatan dan bebas, lalu lihat balon-balon itu saling dorong sampai menemukan posisinya.

LAB MINI **Balon Elektron: atur pasangan, lihat bentuknya**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-12



Notasi	Geometri domain	Bentuk molekul	Sudut ideal → nyata
AX_4	tetrahedral (4 domain)	tetrahedral	109,5° → 109,5°

Contoh	Tantangan tuntas
CH_4, CCl_4, NH_4^+	0

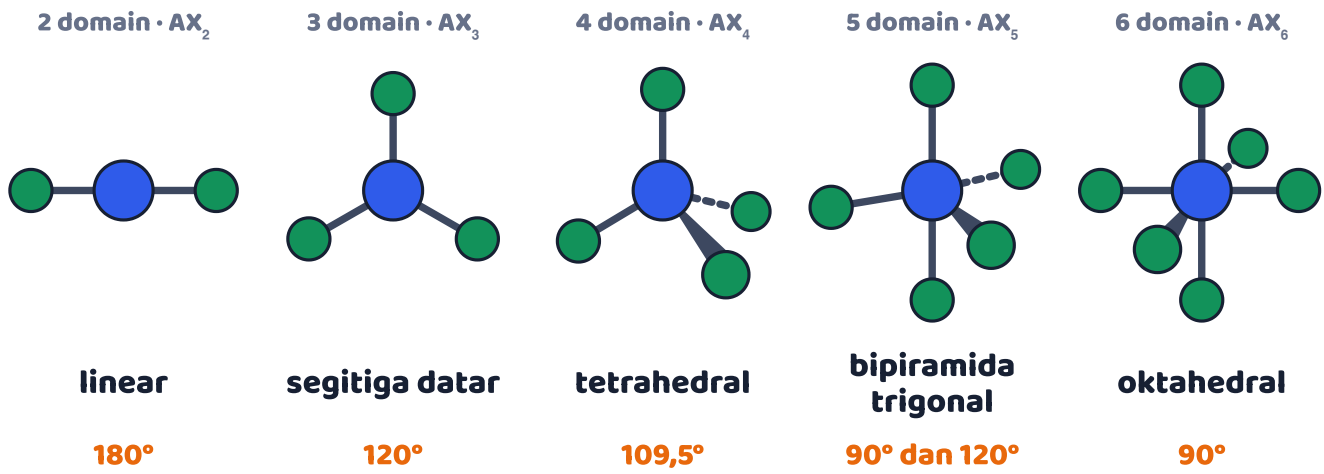
Geser jumlah **PEI** (balon oranye berujung atom X) dan **PEB** (balon ungu yang lebih gemuk). Matikan "Tampilkan balon PEB" untuk melihat *bentuk molekul* yang sebenarnya. Bandingkan sudut **ideal** dengan sudut **nyata**. Tekan Tantangan dan coba susun balon untuk molekul yang diminta. Seret gambar untuk memutar.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1940, dua kimiawan Inggris, **Nevil Sidgwick** dan **Herbert Powell**, memperhatikan bahwa bentuk molekul dapat ditebak dari jumlah pasangan elektron di sekitar atom pusat. Pada 1957, **Ronald Gillespie** dan **Ronald Nyholm** menyempurnakannya, termasuk aturan bahwa pasangan elektron bebas menolak lebih kuat. Lahirlah teori VSEPR. Gillespie, yang kemudian mengajar di Kanada, senang menunjukkan teorinya dengan balon tiup di depan kelas, persis seperti Bima!

12.2 Lima bentuk dasar dan keluarganya

Jumlah domain menentukan **geometri domain**, yaitu cara semua balon (PEI maupun PEB) tersusun di sekitar atom pusat. Ada lima susunan dasar untuk 2 sampai 6 domain:



Lima geometri domain dasar. Garis putus-putus menjauhi pembaca (ke belakang kertas); baji hitam mendekati pembaca. Tetrahedral, bipiramida trigonal, dan oktahedral adalah bentuk tiga dimensi.

Kalau sebagian domain adalah PEB, susunan balonnya tetap sama, tetapi **nama bentuk molekul** berubah karena kita hanya menamai posisi atom. Dari lima susunan dasar lahirlah "keluarga" bentuk berikut.

Domain	Notasi	Geometri domain	Bentuk molekul	Sudut ikatan	Contoh
2	AX_2	linear	**linear**	180°	$BeCl_2$, CO_2
3	AX_3	segitiga datar	**segitiga datar**	120°	BF_3, SO_3
3	AX_2E	segitiga datar	**bengkok**	±118° (< 120°)	SO_2, O_3
4	AX_4	tetrahedral	**tetrahedral**	109,5°	CH_4, CCl_4
4	AX_3E	tetrahedral	**piramida trigonal**	±107°	NH_3, PCl_3
4	AX_2E_2	tetrahedral	**bengkok**	±104,5°	H_2O, OF_2
5	AX_5	bipiramida trigonal	**bipiramida trigonal**	90° dan 120°	PCl_5, PF_5
5	AX_4E	bipiramida trigonal	**jungkat-jungkit**	±102° dan ±173°	SF_4
5	AX_3E_2	bipiramida trigonal	**bentuk T**	±87,5°	ClF_3, BrF_3
5	AX_2E_3	bipiramida trigonal	**linear**	180°	XeF_2, I_3^-
6	AX_6	oktahedral	**oktahedral**	90°	SF_6
6	AX_5E	oktahedral	**piramida segi empat**	±85°	BrF_5, IF_5

6	AX_4E_2	oktahedral	**segi empat datar**	90°	XeF_4, ICl_4^-

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Geometri domain tidak sama dengan bentuk molekul. Amonia punya empat domain yang tersusun **tetrahedral**, tetapi bentuk molekulnya **piramida trigonal**, karena PEB di puncaknya tidak dihitung sebagai "sudut" bangun. Kalau soal menanyakan *bentuk molekul*, jawablah dengan posisi atom saja.

Molekul dengan 5 domain punya dua jenis posisi yang tidak setara: tiga posisi **ekuatorial** (di "sabuk" segitiga, saling bersudut 120°) dan dua posisi **aksial** (di "kutub" atas dan bawah). Di mana PEB akan duduk?

✏️ **TRIK KAK TIRTA · KURSI UNTUK SI GEMUK**

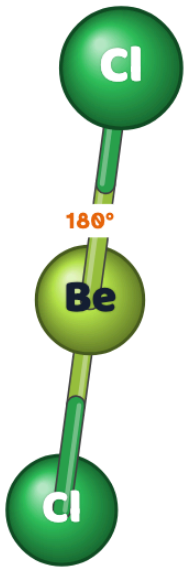
Pada 5 domain, PEB selalu memilih kursi **ekuatorial**. Pada 6 domain, PEB pertama boleh duduk di mana saja (semua posisi setara), tetapi PEB kedua duduk **berseberangan** dengan yang pertama. Itulah sebabnya XeF_4 segi empat datar, bukan bentuk lain.

▾ **Mengapa begitu? Hitung tetangga 90°-nya**

Tolakan paling kuat terjadi antara domain yang bersudut 90° (paling dekat). Pada bipiramida trigonal, sebuah posisi **aksial** punya tiga tetangga pada 90° (ketiga posisi ekuatorial). Sebuah posisi **ekuatorial** hanya punya dua tetangga pada 90° (kedua posisi aksial); dua tetangga lainnya berjarak 120°, lebih lega.

PEB yang "gemuk" butuh tempat paling lega, jadi ia memilih posisi ekuatorial. Hasilnya: SF_4 (1 PEB) berbentuk jungkat-jungkit, ClF_3 (2 PEB) berbentuk T, dan XeF_2 (3 PEB di sabuk ekuator) berbentuk linear. Pada oktahedral, dua PEB yang berseberangan (180°) tidak bersentuhan pada 90°, sedangkan bila bersebelahan mereka saling tekan pada 90°.

MOLEKUL 3D **Galeri VSEPR: 15 molekul, satu aturan**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Berilium klorida (gas) $\mathrm{BeCl_2}$

Mr ≈ 79,91 | AX2 · linear

Be hanya punya 2 pasangan elektron di sekitarnya (oktet tak lengkap) → linear 180°.

Pilih molekul dari daftar. Balon ungu adalah pasangan elektron bebas; label oranye menunjukkan sudut ikatan ideal di sekitar atom pusat. Matikan "Pasangan elektron bebas" dan perhatikan: $\mathrm{XeF_2}$ tiba-tiba tampak sama dengan $\mathrm{BeCl_2}$, padahal xenon menyimpan tiga PEB di sabuknya! Ketuk tiga atom (misalnya F–S–F pada $\mathrm{SF_4}$) untuk mengukur sudutnya sendiri.

KIMO BERBISIK

Model di galeri memakai sudut ideal untuk molekul 5 dan 6 domain. Pada molekul nyata, PEB sedikit menekan sudut-sudut itu: $\mathrm{SF_4}$ punya sudut F–S–F ±102° (bukan 120°) dan ±173° (bukan 180°), sedangkan $\mathrm{BrF_5}$ ±85° (bukan 90°). Lihat perbedaannya di Lab Mini **Balon Elektron** dengan pilihan sudut "nyata".

CONTOH

Bentuk fosforus triklorida

Tentukan bentuk molekul $\mathrm{PCl_3}$ dan perkirakan sudut Cl–P–Cl-nya. (P golongan 15, Cl golongan 17)

1. Atom pusat P punya 5 elektron valensi; tiga atom Cl masing-masing menyumbang 1. $D = \frac{1}{2}(5 + 3) = 4$ domain.
2. Ada 3 atom terikat, jadi PEI = 3 dan PEB = 4 – 3 = 1. Notasinya AX_3E.
3. Empat domain tersusun tetrahedral; satu posisi diisi PEB, sehingga atom-atomnya membentuk **piramida trigonal**.
4. PEB menekan ketiga ikatan, jadi sudutnya lebih kecil daripada 109,5°.

$\mathrm{PCl_3}$ berbentuk piramida trigonal (AX_3E) dengan sudut Cl–P–Cl < 109,5° (data: ±100°). Bentuknya mirip amonia.

KERJAKAN BERSAMA

Xenon, gas mulia yang mau berikatan

Xenon tetrafluorida, $\mathrm{XeF_4}$, adalah kristal putih yang dibuat dari xenon dan fluorin. Tentukan notasi VSEPR, geometri domain, dan bentuk molekulnya.

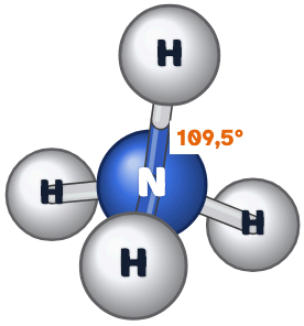
1. Xe golongan 18: 8 elektron valensi. Empat F menyumbang 4. $D = \frac{1}{2}(8 + 4) = 6$ domain.
2. PEI = 4 (empat F), PEB = 6 – 4 = 2. Notasi AX_4E_2.
3. Enam domain tersusun oktahedral. Dua PEB memilih posisi berseberangan (atas dan bawah) agar tidak saling tekan pada 90°.
4. Empat atom F tinggal di "sabuk" datar di sekeliling Xe.

AX_4E_2, geometri domain oktahedral, bentuk molekul segi empat datar dengan sudut F–Xe–F 90°.

Ion poliatom juga punya bentuk. Caranya sama, hanya saja muatan ion ikut dihitung: anion menambah elektron, kation mengurangi.

MOLEKUL 3D

Ion poliatom juga punya bentuk



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Ion amonium NH_4^+

Mr ≈ 18,04 · AX4 · tetrahedral

N: 5 elektron valensi + 4 dari H – 1 (muatan +) = 8 → 4 domain, tanpa PEB. Tetrahedral 109,5°, persis seperti metana.

Untuk setiap ion, hitung dulu jumlah domainnya dengan rumus $D = \frac{1}{2}(V + L - q)$, tebak bentuknya, baru periksa dengan model. Perhatikan pasangan kembar: I_3^- dan XeF_2 di galeri sama-sama linear, ICl_4^- dan XeF_4 sama-sama segi empat datar.

ADU CEPAT

Kilat PEB: hitung pasangan bebas atom pusat

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-12

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Domain = (V + X) ÷ 2, lalu PEB = domain – X. Cepatnya: PEB = (V – X) ÷ 2.

12.3 Pasangan bebas yang "gemuk": 109,5° → 107° → 104,5°

Tebak Dulu!

Metana CH_4, amonia NH_3, dan air H_2O sama-sama punya 4 domain di sekitar atom pusatnya. Bagaimana sudut ikatan H–A–H pada ketiganya?

- Sama semua, 109,5°, karena geometri domainnya sama-sama tetrahedral.
- Air paling besar, karena atom O paling elektronegatif dan menarik H lebih kuat.
- Metana paling besar, lalu amonia, dan air paling kecil.
- Amonia paling kecil, karena punya atom H paling banyak.

Jawabannya: CH_4 109,5° > NH_3 107° > H_2O 104,5°. Makin banyak PEB, makin sempit sudut antar-ikatan. PEB ibarat balon yang ditiup lebih besar: ia mendesak balon-balon ikatan agar merapat.

Mengapa PEB lebih "gemuk"? Pasangan elektron ikatan ditarik oleh **dua** inti atom sekaligus, sehingga tertarik memanjang di antara keduanya, seperti balon yang ujungnya diikat ke tiang. Pasangan elektron bebas hanya dipegang **satu** inti (atom pusat), sehingga awannya lebih dekat ke atom pusat dan lebih melebar. Akibatnya, PEB menolak domain lain lebih kuat.

ATURAN · URUTAN KEKUATAN TOLAKAN

$$\text{PEB–PEB} > \text{PEB–PEI} > \text{PEI–PEI}$$

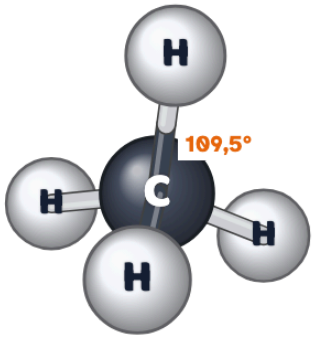
Setiap PEB menyempitkan sudut antar-ikatan sekitar 2–3° pada molekul 4 domain. Ikatan rangkap juga sedikit lebih "gemuk" daripada ikatan tunggal, sehingga sudut di dekatnya ikut melebar.

Molekul	Domain	PEI	PEB	Bentuk molekul	Sudut H–A–H
CH_4	4	4	0	tetrahedral	109,5°
NH_3	4	3	1	piramida trigonal	107°
H_2O	4	2	2	bengkok	104,5°

Sudut 109,5° bukan angka kebetulan. Itulah sudut di antara garis-garis yang menghubungkan pusat sebuah tetrahedron sempurna ke keempat pojoknya. Nilai eksaknya memenuhi $\cos\theta = -\frac{1}{3}$, sehingga $\theta = 109{,}47^\circ$. Di Subbab 12.5 kamu bisa memainkan rumus yang melahirkan angka ini.

MOLEKUL 3D

Ukur sendiri: siapa yang paling terjepit?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Metana (VSEPR) CH_4

Mr ≈ 16,04

AX4 · tetrahedral

Empat pasangan elektron ikatan menjauh sejauh mungkin → tetrahedral, 109,5°.

Ketuk tiga atom berurutan, misalnya H, lalu atom pusat, lalu H lain. Bandingkan sudut pada CH_4, NH_3, dan H_2O. Lalu periksa PH_3 dan H_2S: mengapa sudutnya hampir 90°? Simpan pertanyaan ini untuk kotak Lanjut di bawah dan teka-teki di akhir bab.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KETIKA VSEPR MULAI KEWALAHAN

VSEPR meramalkan "sedikit di bawah 109,5°" untuk NH_3 dan H_2O, dan itu tepat. Namun untuk saudara-saudaranya dari periode 3, sudutnya anjlok mendekati 90°: PH_3 ±93,5° dan H_2S ±92°. Atom pusat yang besar dan kurang elektronegatif "enggan" mencampur orbital s dan p-nya (lihat Subbab 12.5). Ikatannya hampir murni memakai orbital p yang saling tegak lurus, sedangkan PEB-nya bersembunyi di orbital yang kaya karakter s.

Keelektronegatifan atom tetangga juga berpengaruh. Pada NF_3, atom F menarik elektron ikatan menjauhi N, sehingga awan PEI menipis di dekat N dan PEB makin leluasa menekan: sudut F–N–F ±102°, lebih kecil daripada H–N–H pada NH_3. Kecenderungan ini dirumuskan sebagai **aturan Bent**: atom pusat mengarahkan orbital yang kaya karakter s ke substituen yang lebih elektropositif.

12.4 Kepolaran molekul: tarik tambang elektron

Tebak Dulu!

Ikatan C=O sangat polar: oksigen jauh lebih elektronegatif daripada karbon. Apakah molekul CO_2 bersifat polar?

- Ya, sangat polar, karena kedua ikatannya polar.
- Ya, sedikit polar, karena ada dua atom O yang menarik elektron.
- Tidak. CO_2 nonpolar karena kedua tarikan sama kuat dan berlawanan arah.
- Tidak bisa ditentukan tanpa mengukur titik didihnya.

Jawabannya: nonpolar. Bayangkan dua regu tarik tambang yang sama kuat menarik tali ke arah berlawanan: simpul di tengah tidak bergeser. Kedua dipol C=O sama besar dan berlawanan arah (180°), sehingga saling meniadakan. Bentuk molekul menentukan segalanya!

Gosokkan penggaris plastik ke rambut yang kering, lalu dekatkan ke aliran air keran yang kecil. Aliran air membelok ke arah penggaris! Air tersusun atas molekul yang punya ujung sedikit negatif dan ujung sedikit positif. (Para ilmuwan mencatat bahwa muatan yang terinduksi pada aliran air juga ikut berperan, jadi percobaan ini adalah petunjuk, bukan bukti tunggal.)

Di Bab 11 kamu sudah belajar bahwa ikatan antara dua atom dengan keelektronegatifan berbeda bersifat polar. Atom yang lebih elektronegatif mendapat muatan parsial negatif ($\delta-$), pasangannya $\delta+$. Ketidakseimbangan ini digambarkan dengan **panah dipol** yang ekornya bertanda silang di ujung $\delta+$ dan kepalanya menunjuk ke ujung $\delta-$. Besarnya diukur sebagai **momen dipol** (μ) dalam satuan debye (D).

Bahasa sederhana · Bayangkan setiap ikatan sebagai regu tarik tambang. Atom yang lebih rakus elektron menarik lebih kuat. Kalau regu-regu itu menarik ke arah yang sama, molekulnya punya "sisi negatif" dan "sisi positif": molekul itu polar. Kalau tarikannya sama kuat ke segala arah, semuanya seimbang: molekul itu nonpolar.

ATURAN · POLAR ATAU NONPOLAR?

Momen dipol molekul adalah **jumlah vektor** semua dipol ikatannya. Molekul disebut **molekul polar** bila jumlah vektornya tidak nol, dan nonpolar bila jumlahnya nol. Jalan pintas: bila atom pusat **tidak punya PEB** dan **semua atom tetangganya sama** (AX_2, AX_3, AX_4, AX_5, AX_6), molekul itu nonpolar. Dua pengecualian yang tetap nonpolar karena simetris sempurna: AX_2E_3 (XeF_2) dan AX_4E_2 (XeF_4).

Untuk molekul bengkok dengan dua ikatan sama, penjumlahan vektornya bisa dihitung dengan trigonometri sederhana. Mainkan sudutnya sampai 180° dan lihat apa yang terjadi pada dipol bersih.

RUMUS HIDUP

Dipol bersih molekul tiga atom

$$\mu_{\text{bersih}} = 2\,\mu_{\text{ikatan}}\,\cos\frac{\theta}{2}$$

Dua panah dipol ikatan yang sama besar dijumlahkan. Makin lebar sudut di antara keduanya, makin banyak yang saling meniadakan. Pada 180°, hasilnya nol.

- μ_{ikatan} Dipol satu ikatan D
- θ Sudut ikatan °
- μ_{bersih} Dipol bersih D

DIPOL BERSIH

1,84

D

molekul polar · **mendekati air (data: 1,85 D)**

Dua ikatan masing-masing **1,5** D dengan sudut **104,5°** menghasilkan dipol bersih **1,84** D.

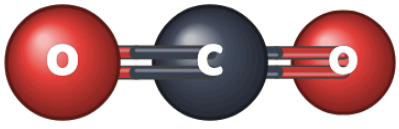
Cek satuan: D (debye); 1 D = 3,336 × 10^{-30} C·m

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-DIPOL-BERSIH

MOLEKUL 3D

Panah dipol: siapa yang saling meniadakan?

nonpolar (dipol saling meniadakan)



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

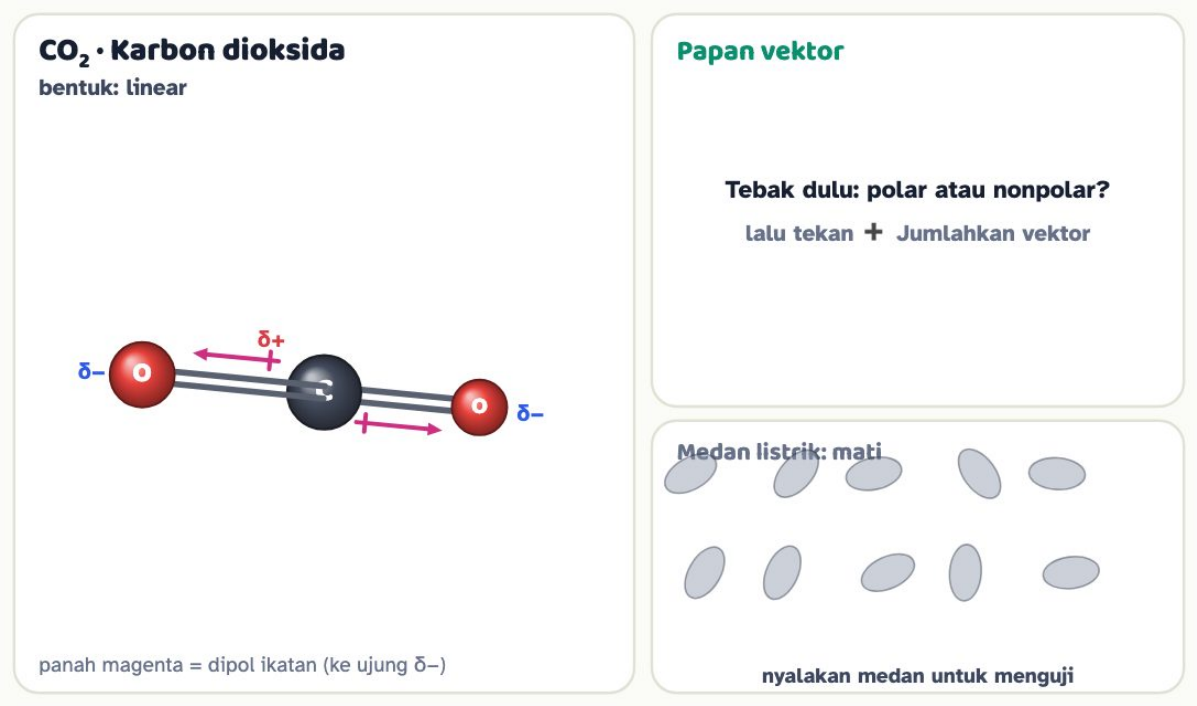
Karbon dioksida CO_2 · Mr ≈ 44,01 · PubChem ↗

Linear (180°), nonpolar walau ikatannya polar. Keluar dari napas kita dan diserap tumbuhan.

Panah magenta menunjukkan arah dipol bersih (ke ujung $\delta-$). Bandingkan pasangan "kembar": CO_2 dan SO_2 (sama-sama tiga atom), CCl_4 dan $CHCl_3$ (beda satu atom saja), BF_3 dan NH_3 (sama-sama empat atom). Apa yang membuat salah satunya polar?

LAB MINI **Detektif Kepolaran: jumlahkan panahnya!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-12



Ikatan (Δχ)	Bentuk	Dipol bersih (data)	Kesimpulan	Tebakan benar
C–O 0,89	linear	? (tebak dulu)	?	0 dari 0

Pilih molekul (atau tekan 🎲), tebak dulu: **polar** atau **nonpolar**? Lalu tekan ➕ Jumlahkan vektor. Panah-panah dipol ikatan disusun ujung-ke-pangkal di papan vektor: kalau kembali ke titik awal, dipol bersihnya nol. Nyalakan medan listrik dan amati: molekul polar berbaris mengikuti medan, molekul nonpolar tetap berputar acak.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Ikatan polar tidak menjamin molekul polar. CO_2, BF_3, dan CCl_4 semuanya punya ikatan polar, tetapi bentuknya simetris sehingga dipol-dipolnya saling meniadakan. Sebaliknya, ganti satu Cl pada CCl_4 dengan H, dan $CHCl_3$ langsung menjadi polar.

MITOS

"Molekul yang ikatannya polar pasti polar."

FAKTA

Belum tentu. Yang menentukan adalah **jumlah vektor** dipolnya. CO_2 dan CCl_4 berikatan polar tetapi nonpolar karena bentuknya simetris.

MITOS

"Bentuk molekul ditentukan oleh semua pasangan elektron, jadi NH_3 itu tetrahedral."

FAKTA

Semua pasangan menentukan **susunan domain** (tetrahedral), tetapi **bentuk molekul** dinamai dari posisi atom saja: NH_3 piramida trigonal, H_2O bengkok.

MITOS

"Ikatan rangkap dua mendorong dua kali lebih kuat, jadi dihitung dua domain."

FAKTA

Ikatan rangkap tetap **satu domain**, meski sedikit lebih gemuk. Karena itu CO_2 linear (2 domain) dan SO_3 segitiga datar (3 domain).

KERJAKAN BERSAMA **BCl_3 atau PCl_3: siapa yang polar?**

Boron triklorida, BCl_3, dan fosforus triklorida, PCl_3, sama-sama punya tiga ikatan dengan klorin. Tentukan bentuk dan kepolaran masing-masing.

1. BCl_3: B punya 3 elektron valensi, $D = \frac{1}{2}(3+3) = 3$, tanpa PEB → AX_3, **segitiga datar**.
2. Tiga dipol B–Cl sama besar dan bersudut 120°. Jumlahkan ujung-ke-pangkal: membentuk segitiga tertutup → dipol bersih nol.
3. PCl_3: P punya 5 elektron valensi, $D = \frac{1}{2}(5+3) = 4$, PEB = 1 → AX_3E, **piramida trigonal**.
4. Ketiga dipol P–Cl sama-sama condong ke bawah (menjauhi PEB), sehingga jumlahnya tidak nol.

BCl_3 nonpolar (segitiga datar simetris), PCl_3 polar (piramida trigonal). Satu PEB mengubah segalanya!

KIMIA NUSANTARA · KAIN BASAH PARA PENAMBANG IJEN

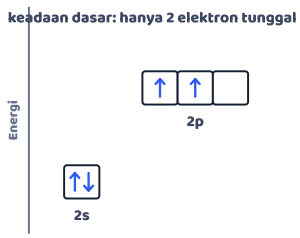
Di Kawah Ijen, Jawa Timur, penambang belerang memikul bongkahan kuning menembus asap gunung api yang menyesakkan. Banyak di antara mereka menutup hidung dengan kain basah. Mengapa air membantu? Gas utama yang perih itu, belerang dioksida SO_2, berbentuk **bengkok** (AX_2E) sehingga **polar**, dan mudah larut dalam air yang juga polar: $SO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2SO_3$. Kain basah tidak menyaring semuanya (masker khusus jauh lebih aman), tetapi kepolaran SO_2 menjelaskan mengapa air kawah dan hujan di sekitarnya sangat asam, dan mengapa malam hari tampak "api biru" saat gas belerang terbakar.

12.5 Hibridisasi: orbital yang "diaduk"

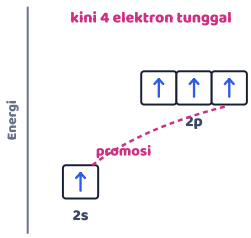
VSEPR meramalkan bentuk dengan sangat baik, tetapi ada teka-teki. Konfigurasi elektron karbon adalah $1s^2\,2s^2\,2p^2$: hanya ada **dua** elektron tunggal di orbital 2p, yang saling tegak lurus. Kalau begitu, karbon mestinya hanya membentuk dua ikatan bersudut 90°. Kenyataannya, metana punya **empat** ikatan C–H yang sama persis panjangnya, bersudut 109,5°. Bagaimana orbital 2s yang bulat dan tiga orbital 2p yang seperti balon panjang bisa menghasilkan empat ikatan identik?

DEFINISI · HIBRIDISASI

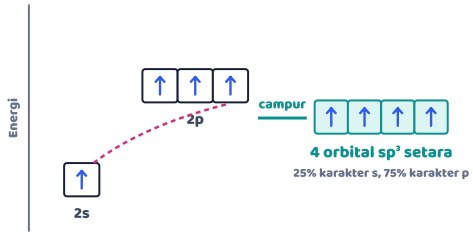
Hibridisasi adalah pencampuran orbital-orbital atom dalam satu atom (misalnya satu orbital s dan beberapa orbital p) menjadi sejumlah **orbital hibrida** yang setara, dengan arah yang sesuai bentuk molekul. Jumlah orbital hibrida sama dengan jumlah orbital yang dicampur.



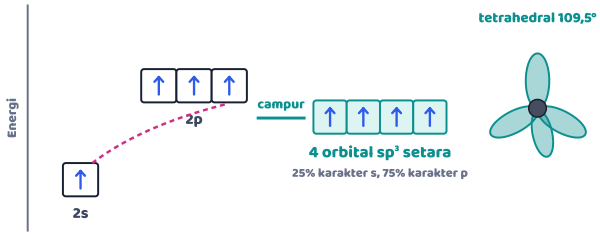
Langkah 1. Keadaan dasar karbon: $2s^2\,2p^2$. Hanya ada dua elektron tunggal, padahal metana punya empat ikatan C–H yang identik. Ada yang janggal!



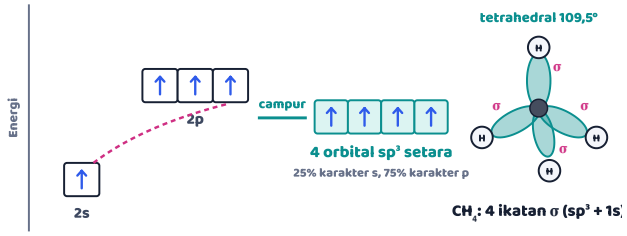
Langkah 2. Promosi: satu elektron 2s naik ke orbital 2p yang kosong. Kini ada empat elektron tunggal. Energi untuk promosi ini terbayar kembali karena karbon bisa membentuk dua ikatan tambahan.



Langkah 3. Hibridisasi: satu orbital 2s dan tiga orbital 2p "diaduk" menjadi empat orbital **sp³** yang setara. Energinya di antara 2s dan 2p, dan setiap orbital berkarakter 25% s dan 75% p.



Langkah 4. Keempat orbital sp³ saling menjauh, mengarah ke pojok-pojok tetrahedron dengan sudut 109,5°, cocok dengan ramalan VSEPR!



Langkah 5. Setiap orbital sp³ bertumpang tindih ujung-ke-ujung dengan orbital 1s atom H, membentuk empat **ikatan σ** C–H yang identik. Lahirlah $\mathrm{CH_4}$.

Hibridisasi lain mengikuti pola yang sama. Jumlah orbital hibrida selalu sama dengan jumlah domain elektron, karena setiap domain (PEI maupun PEB) menempati satu orbital hibrida.

Domain	Orbital yang dicampur	Hibridisasi	Geometri domain	Sudut	Contoh atom pusat
2	s + p	**sp**	linear	180°	Be dalam $\mathrm{BeCl_2}$; C dalam $\mathrm{CO_2}$, $\mathrm{C_2H_2}$
3	s + 2p	**sp²**	segitiga datar	120°	B dalam $\mathrm{BF_3}$; C dalam $\mathrm{C_2H_4}$; S dalam $\mathrm{SO_2}$

4	s + 3p	**sp³**	tetrahedral	109,5°	C dalam CH_4; N dalam NH_3; O dalam H_2O
5	s + 3p + d	**sp³d**	bipiramida trigonal	90°, 120°	P dalam PCl_5; S dalam SF_4; Xe dalam XeF_2
6	s + 3p + 2d	**sp³d²**	oktahedral	90°	S dalam SF_6; Xe dalam XeF_4

✏️ **TRIK KAK TIRTA · DOMAIN = JUMLAH HURUF**

Hitung domain, lalu tulis huruf orbitalnya sebanyak itu: 2 domain → s + p = **sp**; 3 → s + p + p = **sp²**; 4 → **sp³**; 5 → **sp³d**; 6 → **sp³d²**. Jangan lupa: PEB juga menempati orbital hibrida. N dalam NH_3 (4 domain) adalah sp³, bukan sp².

Hibridisasi juga menjelaskan *mengapa* sudut 109,5°, 120°, dan 180° muncul. Makin besar porsi orbital p di dalam orbital hibrida sp^n, makin sempit sudut di antara dua orbital itu. Hubungannya ditemukan oleh kimiawan Inggris Charles Coulson:

RUMUS HIDUP **Sudut antara dua orbital hibrida sp^n**

$$\cos\theta = -\frac{1}{n}$$

Makin banyak 'rasa p' dalam orbital hibrida (n makin besar), makin sempit sudut di antara orbital-orbitalnya. sp memberi 180°, sp² memberi 120°, sp³ memberi 109,5°.

n Pangkat hibrida (sp^n) — θ Sudut antarorbital °

SUDUT ANTARORBITAL

109,5

°

sp³: cos θ = −1/3 → 109,47°, tetrahedral

Orbital sp^n dengan n = **3** berisi **25**% karakter s dan membentuk sudut **109,5**°.

Cek satuan: cos θ tak bersatuan → θ dalam derajat ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-SUDUT-HIBRIDA

⚠️

AWAS JEBAKAN

Hibridisasi tidak menyebabkan bentuk molekul; hibridisasi menjelaskan bentuk yang sudah ada. Urutan berpikir yang benar: tentukan dulu jumlah domain dan bentuknya (dari data percobaan atau VSEPR), baru pilih hibridisasi yang cocok. Jangan berkata "$\mathrm{CH_4}$ tetrahedral karena sp^3"; lebih tepat "C dalam $\mathrm{CH_4}$ punya 4 domain tetrahedral, sehingga digambarkan sebagai sp^3".

🕰️

TAMU DARI MASA LALU

Gagasan orbital hibrida diperkenalkan oleh **Linus Pauling** pada 1931 untuk menjelaskan ikatan tetrahedral karbon. Pauling meraih Nobel Kimia 1954 atas karyanya tentang ikatan kimia, lalu Nobel Perdamaian 1962 atas kampanyenya menentang uji coba senjata nuklir. Ia satu-satunya orang yang meraih dua Nobel tanpa berbagi dengan orang lain.

🚀

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BENARKAH ORBITAL D IKUT DIADUK?

Notasi sp^3d dan sp^3d^2 sangat praktis untuk ujian, tetapi perhitungan kimia kuantum modern menunjukkan bahwa orbital 3d belerang atau fosforus terlalu tinggi energinya untuk banyak berperan. Ikatan pada molekul "hipervalen" seperti $\mathrm{SF_6}$ dan $\mathrm{PCl_5}$ lebih tepat dijelaskan dengan **ikatan tiga-pusat empat-elektron** dan sumbangan karakter ion: atom-atom F yang sangat elektronegatif menarik elektron menjauh dari S.

Pelajarannya: model adalah alat, bukan kenyataan itu sendiri. VSEPR meramalkan bentuk $\mathrm{SF_6}$ dengan tepat; label sp^3d^2 hanyalah cara singkat untuk mencatatnya.

COBA SENDIRI **Bedah lengkap belerang tetrafluorida**

Untuk SF_4, tentukan: (a) jumlah domain dan notasi VSEPR, (b) bentuk molekul dan perkiraan sudutnya, (c) kepolaran, (d) hibridisasi atom S. Coba kerjakan sendiri dulu sebelum membuka langkahnya.

1. (a) S golongan 16: 6 elektron valensi; empat F menyumbang 4. $D = \frac{1}{2}(6 + 4) = 5$. PEI = 4, PEB = 1 → AX_4E.
2. (b) Lima domain tersusun bipiramida trigonal. PEB memilih posisi ekuatorial, sehingga atom-atomnya membentuk **jungkat-jungkit**. PEB menekan: $F_{ekuatorial}$–S–$F_{ekuatorial}$ < 120° (data ±102°) dan F_{aksial}–S–F_{aksial} < 180° (data ±173°).
3. (c) Ada PEB dan bentuknya tidak simetris, sehingga dipol-dipol S–F tidak saling meniadakan → **polar** (data ±0,63 D).
4. (d) Lima domain → lima orbital hibrida → **sp^3d**.

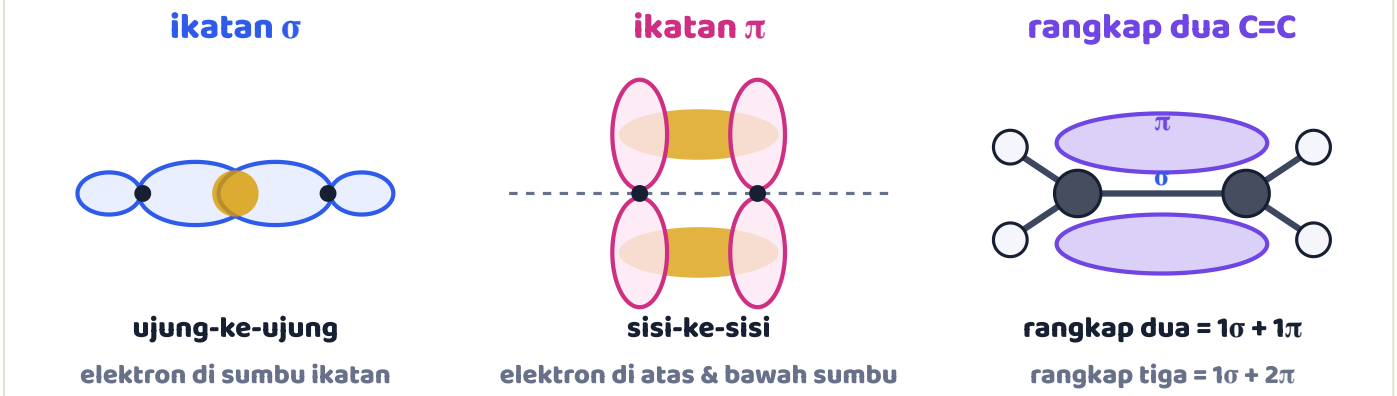
SF_4: AX_4E, jungkat-jungkit, sudut ±102° dan ±173°, polar, S terhibridisasi sp^3d. Periksa bentuknya di Galeri VSEPR (Subbab 12.2).

12.6 Ikatan sigma (σ) dan pi (π)

Orbital-orbital dapat bertumpang tindih dengan dua cara. Cara tumpang tindih inilah yang membedakan ikatan tunggal, rangkap dua, dan rangkap tiga.

DEFINISI · IKATAN Σ DAN Π

Ikatan sigma (σ) terbentuk dari tumpang tindih orbital **ujung-ke-ujung** di sepanjang sumbu ikatan; rapatan elektronnya paling besar tepat di antara kedua inti. **Ikatan pi (π)** terbentuk dari tumpang tindih **sisi-ke-sisi** dua orbital p yang sejajar; rapatan elektronnya berada di atas dan di bawah sumbu ikatan.



Tumpang tindih ujung-ke-ujung menghasilkan ikatan σ (kuning: daerah tumpang tindih). Tumpang tindih sisi-ke-sisi dua orbital p menghasilkan ikatan π. Ikatan rangkap dua terdiri atas satu σ dan satu π.

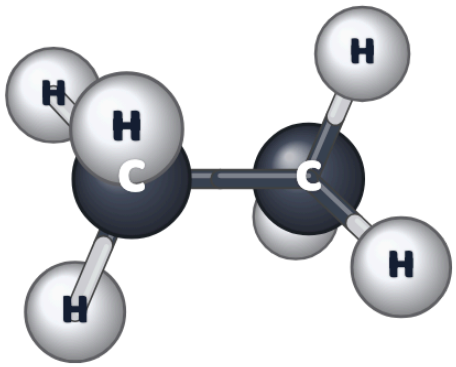
Setiap ikatan tunggal adalah ikatan σ. Ikatan rangkap dua terdiri atas 1σ + 1π, dan rangkap tiga 1σ + 2π. Ikatan π hanya bisa terbentuk dari orbital p yang **tidak ikut berhibridisasi**. Karena itu karbon berikatan rangkap dua bersifat sp^2 (masih menyisakan satu orbital p), dan karbon berikatan rangkap tiga bersifat sp (menyisakan dua orbital p).

Ikatan C–C	Contoh	Hibridisasi C	Sudut di C	Susunan	Panjang ikatan C–C
tunggal	etana C_2H_6	sp^3	109,5°	1σ	±154 pm
rangkap dua	etena C_2H_4	sp^2	±120°	1σ + 1π	±134 pm
rangkap tiga	etuna C_2H_2	sp	180°	1σ + 2π	±120 pm

Ikatan π punya satu sifat penting: ia "mengunci" putaran. Ikatan σ seperti poros roda yang bisa berputar bebas, tetapi ikatan π seperti dua tangan yang saling berpegangan di atas dan di bawah poros. Memutar salah satu atom karbon akan memutus pegangan itu. Akibatnya, gugus-gugus di sekitar ikatan C=C terkunci dalam satu bidang datar, dan muncullah isomer cis–trans yang akan kamu temui di Bab 32.

MOLEKUL 3D

Tunggal, rangkap dua, rangkap tiga: ukur sudut di sekitar karbon



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etana C_2H_6 Mr ≈ 30,07 PubChem ↗

Alkana dengan dua karbon; komponen gas alam.

Ketuk tiga atom (H–C–H atau H–C–C) untuk mengukur sudutnya. Etana memberi ±109,5° (sp^3), etena dan benzena ±120° (sp^2), etuna 180° (sp). Ketuk dua atom karbon untuk membandingkan panjang ikatan tunggal, rangkap dua, dan rangkap tiga. Pada benzena, semua ikatan C–C ternyata sama panjang: elektron π-nya menyebar di seluruh cincin!

✏️ **TRIK KAK TIRTA · MENGHITUNG Σ DAN Π**

Hitung semua garis ikatan dalam rumus struktur sebagai σ (satu per pasangan atom yang berikatan). Lalu tambahkan π: **+1** untuk setiap rangkap dua dan **+2** untuk setiap rangkap tiga. Jumlah σ = jumlah pasangan atom yang terhubung.

CONTOH **Menghitung σ dan π**

Hitung jumlah ikatan σ dan π dalam etena ($H_2C{=}CH_2$) dan hidrogen sianida ($H{-}C{\equiv}N$).

1. Etena: ada 4 ikatan C–H dan 1 ikatan C=C, jadi 5 pasangan atom terhubung → **5 σ**. Satu rangkap dua → **1 π**.
2. HCN: ada ikatan H–C dan C≡N, jadi **2 σ**. Satu rangkap tiga → **2 π**.

Etena: 5σ dan 1π. HCN: 2σ dan 2π (atom C dalam HCN bersifat sp, sehingga molekulnya linear).

KERJAKAN BERSAMA

Hibridisasi setiap karbon dalam propena

Propena, $CH_2{=}CH{-}CH_3$, adalah bahan baku plastik polipropilena (wadah makanan, tali rafia). Tentukan hibridisasi setiap atom C serta jumlah ikatan σ dan π.

1. C1 (karbon ujung pada rangkap dua, mengikat 2 H): 3 domain (2 H dan C2; rangkap dua dihitung satu) → sp^2.
2. C2 (karbon tengah, mengikat 1 H): 3 domain (1 H, C1, C3) → sp^2.
3. C3 (gugus metil, mengikat 3 H): 4 domain (3 H dan C2) → sp^3.
4. σ: 6 ikatan C–H + 2 ikatan C–C = 8. π: satu rangkap dua = 1.

C1 dan C2 sp^2, C3 sp^3; total 8σ dan 1π. Bagian $CH_2{=}CH^-$ datar, sedangkan gugus CH_3 tetrahedral.

KIMIA NUSANTARA · KARBIT DAN BUAH YANG CEPAT MATANG

Di beberapa pasar tradisional, pedagang memeram pisang atau mangga dengan **karbit** (kalsium karbida). Karbit bereaksi dengan uap air menghasilkan gas etuna (asetilena): $CaC_2 + 2\,H_2O \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2$. Etuna yang linear (C sp, rangkap tiga) meniru kerja **etena** yang datar (C sp^2), hormon pematang alami yang dilepaskan buah itu sendiri. Namun karbit teknis sering mengandung pengotor berbahaya, sehingga pemeraman alami (misalnya dibungkus bersama buah yang sudah matang) jauh lebih aman.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TEORI ORBITAL MOLEKUL: MENGAPA OKSIGEN TERTARIK MAGNET?

Struktur Lewis $O{=}O$ menempatkan semua elektron berpasangan. Zat dengan elektron berpasangan semua bersifat **diamagnetik** (sedikit ditolak magnet). Namun pada 1848 Michael Faraday mendapati bahwa oksigen justru **tertarik** oleh magnet. Oksigen cair yang dituang di antara kutub magnet kuat bahkan menggantung di sana! Zat yang tertarik magnet karena punya elektron tak berpasangan disebut **paramagnetik**.

Teori orbital molekul (OM) menjelaskannya. Orbital atom kedua atom O bergabung menjadi orbital molekul milik seluruh molekul: orbital **ikatan** (energi lebih rendah, menstabilkan) dan orbital **antiikatan** (bertanda *, energi lebih tinggi, melemahkan). Dua belas elektron valensi mengisinya dari bawah, mengikuti aturan Hund.

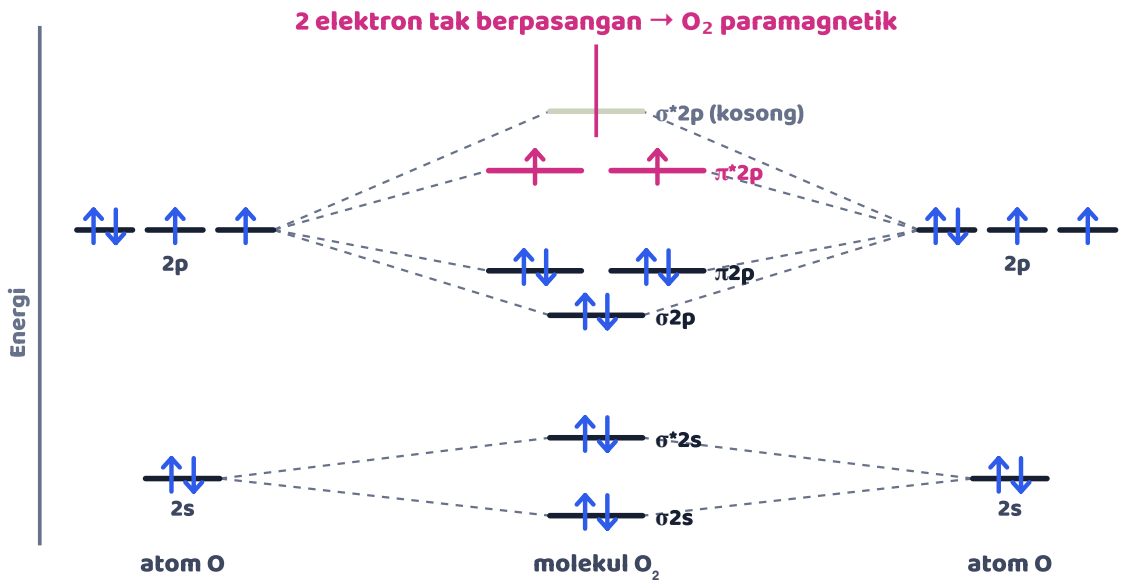


Diagram orbital molekul O_2 (elektron valensi saja). Dua elektron terakhir menempati dua orbital π* yang setara secara terpisah (aturan Hund), sehingga O_2 paramagnetik.

Elektron di orbital ikatan: σ2s (2) + σ2p (2) + π2p (4) = 8. Elektron di orbital antiikatan: σ*2s (2) + π*2p (2) = 4. Hasilnya orde ikatan 2, sesuai ikatan rangkap dua, sekaligus dua elektron tak berpasangan. Teori OM menjelaskan dua hal sekaligus, sesuatu yang tidak bisa dilakukan struktur Lewis.

RUMUS HIDUP

Orde ikatan dari teori orbital molekul

$$\text{orde} = \frac{1}{2}\left(n_{\text{ikatan}} - n_{\text{antiikatan}}\right)$$

Setiap pasangan elektron di orbital ikatan menambah 'separuh lem dua kali', setiap pasangan di orbital antiikatan mengurangi. Orde ikatan 0 berarti molekul tidak terbentuk.

- n_{ikatan} Elektron di orbital ikatan
- $n_{\text{antiikatan}}$ Elektron di orbital antiikatan
- orde Orde ikatan

ORDE IKATAN

2

O_2: orde 2, paramagnetik

8 elektron ikatan dan **4** elektron antiikatan memberi orde ikatan **2**.

Cek satuan: elektron ÷ 2 = jumlah ikatan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ORDE-IKATAN-OM

Kimia di sekitarmu

Oven gelombang mikro

Gelombang mikro membuat molekul air yang polar terus berputar mengikuti medan listrik yang bolak-balik. Gesekan antarmolekul itu memanaskan sayur dan nasi dari dalam.

Es yang mengapung

Setiap O dalam es dikelilingi empat "lengan" tetrahedral (dua O–H dan dua PEB). Susunan ini membentuk kisi berongga, sehingga es lebih ringan daripada air dan mengapung di gelas es teh.

Obat yang pas

Molekul obat bekerja seperti anak kunci yang harus pas dengan "lubang kunci" pada enzim atau reseptor tubuh. Bentuk tiga dimensi yang sedikit berbeda dapat membuat obat tidak bekerja.

Gas di gardu listrik

Belerang heksafluorida SF_6 yang oktahedral, nonpolar, dan sangat stabil dipakai sebagai gas penyekat di gardu induk. Sayangnya ia gas rumah kaca yang sangat kuat, jadi kebocorannya harus dicegah.

CO_2 dan pemanasan global

CO_2 nonpolar, tetapi saat molekulnya bergetar menekuk, untuk sesaat ia punya dipol. Getaran inilah yang menyerap sinar inframerah dari Bumi dan menahan panas di atmosfer.

Aroma dan rasa

Reseptor di hidung dan lidah mengenali molekul antara lain dari bentuk dan kepolarannya. Itulah sebabnya mentol terasa dingin dan aroma pandan begitu khas.

Cek Cepat

Gas berilium klorida, $BeCl_2$, berbentuk ...

- bengkok
- segitiga datar
- linear
- tetrahedral

Hibridisasi atom C dalam CO_2 adalah ...

- sp
- sp^2
- sp^3
- sp^3d

Manakah molekul yang polar?

- CO_2
- BF_3
- CCl_4
- NH_3

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: model VSEPR dari balon

Bahan: 8 balon tiup bulat (2 warna; boleh juga balon panjang), pompa balon tangan, benang atau karet gelang, busur derajat, spidol, 1 bola plastisin, beberapa tusuk gigi.

1. Tiup balon dengan pompa sampai sebesar kepalan tangan dan usahakan ukurannya sama. Ikat simpulnya.
2. Ikat 2 balon pada simpulnya menjadi satu, lalu lepaskan. Amati bentuknya. Ulangi dengan 3, 4, 5, dan 6 balon (ikat berpasangan dulu, lalu gabungkan pasangan-pasangan itu).
3. Untuk kelompok 4 balon, ganti satu balon dengan balon warna lain yang ditiup lebih besar (pemeran PEB). Lalu coba dua balon besar.
4. Ukur sudut di antara dua balon kecil dengan busur derajat yang ditempelkan di simpul.
5. Buat versi mini: tusukkan tusuk gigi ke bola plastisin untuk membuat model CH_4, NH_3, dan H_2O.

Keselamatan: pakai pompa, bukan mulut, dan jangan meniup berlebihan dekat wajah karena balon bisa meletus. Bila ada yang alergi lateks, pakai balon nonlateks. Balon kempis dan pecahan balon berbahaya bila tertelan anak kecil: segera buang ke tempat sampah. Patahkan ujung tusuk gigi yang runcing dan kerjakan bersama orang dewasa.

Pertanyaan: Apakah sudut di antara balon kecil menyempit ketika ada balon besar? Bentuk apa yang terlihat bila balon besar "disembunyikan" (bayangkan tidak ada)?

RINGKASAN KILAT **Bab 12 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menghitung **jumlah domain elektron** atom pusat dan menuliskan **notasi VSEPR AX_nE_m**
- meramalkan **bentuk molekul** (dari linear sampai oktahedral beserta turunannya) dan sudut ikatannya
- menjelaskan mengapa **pasangan elektron bebas** menyempitkan sudut: 109,5° → 107° → 104,5°

- menentukan **kepolaran molekul** dari bentuk dan arah dipol ikatannya
- menjelaskan **hibridisasi** sp, sp^2, sp^3, sp^3d, sp^3d^2 serta membedakan **ikatan sigma (σ) dan pi (π)**, termasuk sekilas teori orbital molekul O_2

🔑 Istilah kunci

VSEPR · domain elektron · pasangan elektron ikatan (PEI) · pasangan elektron bebas (PEB) · notasi VSEPR AX_nE_m · geometri domain · momen dipol · molekul polar · Hibridisasi · Ikatan sigma (σ) · Ikatan pi (π) · paramagnetik

🧮 Rumus penting

$$D = \tfrac{1}{2}\left(V + L - q\right)$$

Jumlah domain elektron atom pusat. Elektron valensi atom pusat ditambah sumbangan atom tetangga, dikurangi muatan ion, lalu dibagi dua: itulah banyaknya 'balon' di sekitar atom pusat. Kurangi dengan jumlah atom terikat untuk mendapatkan pasangan bebas.

$$\mu_{\text{bersih}} = 2\,\mu_{\text{ikatan}}\,\cos\frac{\theta}{2}$$

Dipol bersih molekul tiga atom. Dua panah dipol ikatan yang sama besar dijumlahkan. Makin lebar sudut di antara keduanya, makin banyak yang saling meniadakan. Pada 180°, hasilnya nol.

$$\cos\theta = -\frac{1}{n}$$

Sudut antara dua orbital hibrida sp^n. Makin banyak 'rasa p' dalam orbital hibrida (n makin besar), makin sempit sudut di antara orbital-orbitalnya. sp memberi 180°, sp^2 memberi 120°, sp^3 memberi 109,5°.

$$\text{orde} = \tfrac{1}{2}\left(n_{\text{ikatan}} - n_{\text{antiikatan}}\right)$$

Orde ikatan dari teori orbital molekul. Setiap pasangan elektron di orbital ikatan menambah 'separuh lem dua kali', setiap pasangan di orbital antiikatan mengurangi. Orde ikatan 0 berarti molekul tidak terbentuk.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Ikatan rangkap tidak dihitung sebagai dua atau tiga domain.
- Geometri domain tidak sama dengan bentuk molekul.
- Ikatan polar tidak menjamin molekul polar.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=12

Teka-teki untuk Bab 13

Air (M_r 18) mendidih pada 100 °C, sedangkan hidrogen sulfida, $\mathrm{H_2S}$ (M_r 34), yang hampir dua kali lebih berat sudah berupa gas pada suhu kamar (titik didihnya sekitar −60 °C). Keduanya sama-sama molekul bengkok. Siapa yang "curang"?

▼ **Intip petunjuk**

Ingat ukuran keelektronegatifan dan bentuknya: O jauh lebih elektronegatif daripada S, sehingga molekul air sangat polar, dan atom H-nya yang sangat positif tertarik kuat ke PEB molekul air tetangganya. Tarikan khusus antarmolekul ini disebut **ikatan hidrogen**, bintang utama Bab 13.

13 Gaya Antarmolekul & Ikatan Logam: Lem Tak Kasatmata

Air (Mr 18) mendidih pada 100 °C, padahal H_2S (Mr 34) yang hampir dua kali lebih berat sudah menjadi gas jauh di bawah suhu kamar. Sendok logam bisa dibengkokkan, tetapi garam batu pecah saat dipukul. Rahasianya ada pada "lem" tak kasatmata di antara partikel dan pada lautan elektron di dalam logam.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **ikatan** (di dalam molekul) dari **gaya antarmolekul** (di antara molekul), lalu menjelaskan gaya London, dipol-dipol, dan ikatan hidrogen;
- menentukan gaya antarmolekul terkuat dari struktur molekul dan **meramalkan urutan titik didih**, termasuk anomali H_2O, HF, dan NH_3;
- menjelaskan tegangan permukaan, kelarutan, kekentalan, dan **es yang mengapung** pada tingkat partikel;
- menjelaskan **ikatan logam** dengan model lautan elektron, sifat-sifat logam, dan mengapa **paduan** (perunggu gamelan, kuningan) lebih keras;
- membandingkan **struktur kovalen raksasa** (intan, grafit, grafena, silika) dengan zat molekuler seperti fulerena C_{60}.

KLIP YANG TIDAK MAU TENGGELAM

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Saat air di panci mendidih, muncul gelembung-gelembung besar dari dasar panci. Gelembung itu berisi apa?

- Gas hidrogen dan gas oksigen, karena panas memutus ikatan O–H dalam molekul air.
- Udara yang tadinya terperangkap di dasar panci.
- Uap air, yaitu molekul $\mathrm{H_2O}$ utuh yang saling berjauhan.
- Tidak berisi apa-apa (ruang hampa).

Jawabannya: uap air. Saat mendidih, molekul air hanya saling *melepaskan diri dari tetangganya*. Ikatan O–H di dalam molekul tetap utuh: untuk memutusnya dibutuhkan suhu ribuan derajat. Kalau gelembungnya berisi hidrogen dan oksigen, setiap dapur akan meledak! Yang diputus saat mendidih adalah "lem" lemah di antara molekul, tokoh utama bab ini.

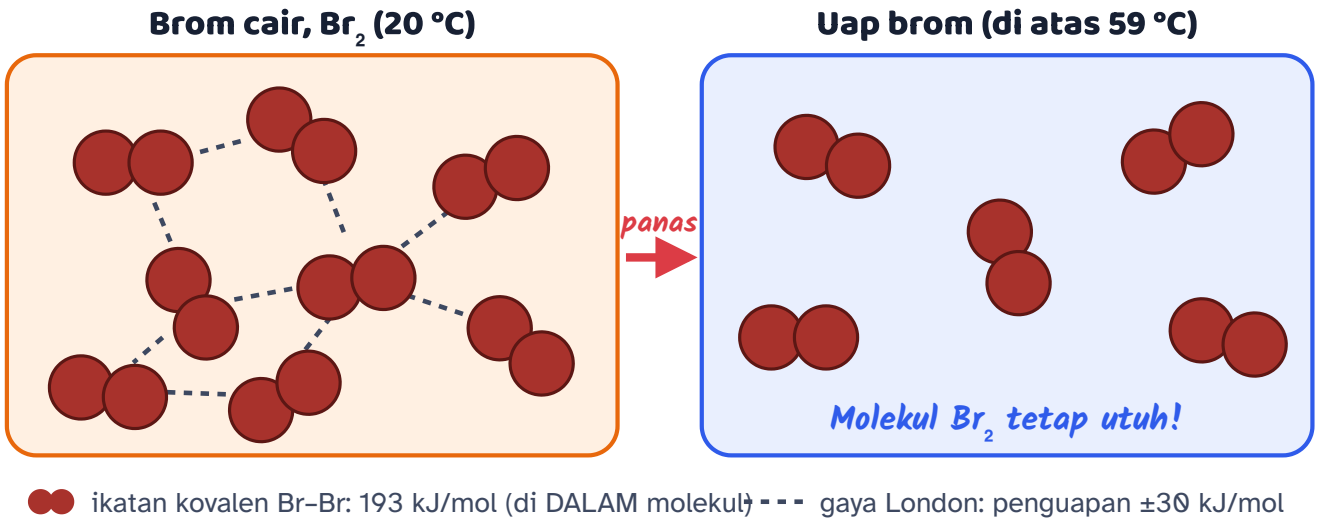
13.1 Ikatan di dalam, gaya di antara: gaya London

Di Bab 11 kamu belajar bahwa atom-atom di dalam molekul diikat oleh **ikatan kovalen** yang kuat. Namun, air, minyak, dan lilin bukan sekadar tumpukan molekul yang lepas satu sama lain. Ada sesuatu yang membuat molekul-molekul itu saling menempel, sehingga air bisa cair dan lilin bisa padat.

Bahasa sederhana · Bayangkan setiap molekul seperti sebuah kalung manik-manik. Benang yang mengikat manik-manik adalah **ikatan**: sangat kuat. Kalung-kalung itu juga saling menempel lemah, seperti perekat pada sepatu. Saat air mendidih, yang terlepas hanya perekatnya, bukan benang kalungnya.

DEFINISI · GAYA ANTARMOLEKUL

Gaya antarmolekul adalah gaya tarik-menarik yang relatif lemah **di antara** molekul-molekul yang berdekatan. Gaya ini berbeda dari **ikatan** (intramolekul) yang mengikat atom-atom **di dalam** molekul. Tiga jenis utamanya: **gaya London** (gaya dispersi), **gaya dipol-dipol**, dan **ikatan hidrogen**. Gaya London dan dipol-dipol sering disebut bersama sebagai **gaya van der Waals**.



Saat brom mendidih, yang dikalahkan hanyalah gaya London di antara molekul (garis putus-putus). Ikatan Br–Br yang enam kali lebih kuat tetap utuh. (Brom beracun dan berbau tajam, jadi hanya kita lihat dari gambar.)

AWAS JEBAKAN

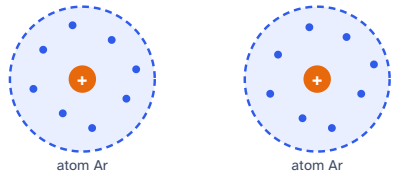
Saat zat molekuler meleleh atau mendidih, yang diputus hanyalah gaya antarmolekul, bukan ikatan kovalen di dalam molekul. Uap air tetap H_2O, bukan campuran gas H_2 dan O_2. Jadi titik didih yang tinggi berarti **gaya antarmolekulnya** kuat, bukan ikatannya.

Jenis tarikan	Terjadi di antara	Kekuatan kira-kira (kJ/mol)
Ikatan kovalen (O–H, C–C)	atom-atom di dalam molekul	150–1.100 (O–H: 463)
Ikatan ion / ikatan logam	ion-ion dalam kisi / ion logam dan lautan elektron	ratusan sampai ribuan
Ikatan hidrogen	molekul dengan H–F, H–O, atau H–N	±10–40
Dipol-dipol	molekul polar	±5–25

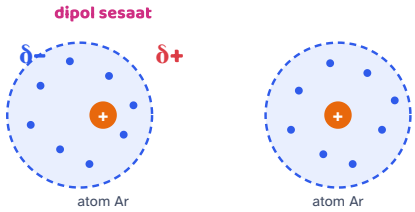
Gaya London	**semua** molekul dan atom	±0,1–40 (makin besar molekul, makin kuat)

Gaya London: dipol sesaat yang menular

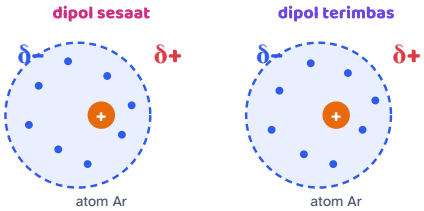
Molekul nonpolar seperti Br_2, CH_4, atau atom gas mulia tidak bermuatan dan tidak punya kutub. Lalu mengapa brom bisa cair dan argon bisa mencair bila didinginkan? Kuncinya: elektron selalu bergerak. Pada suatu saat, awan elektron bisa lebih banyak di satu sisi. Lahirlah **dipol sesaat** yang lalu "menular" ke tetangganya.



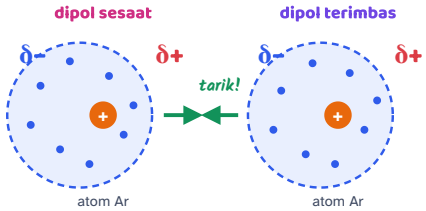
Langkah 1. Dua atom argon yang netral. Rata-rata, awan elektron tersebar merata di sekeliling inti.



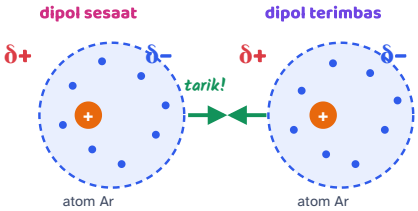
Langkah 2. Pada suatu saat, elektron atom kiri kebetulan berkumpul di sisi kiri. Atom itu menjadi **dipol sesaat**: sisi kiri δ^-, sisi kanan δ^+.



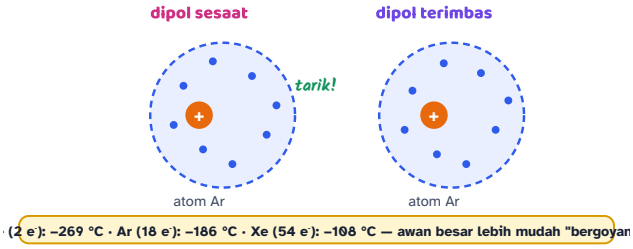
Langkah 3. Sisi δ^+ menarik elektron atom kanan. Awan atom kanan ikut bergeser, menjadi **dipol terimbas**.



Langkah 4. Ujung δ^+ dan δ^- yang berhadapan saling tarik. Inilah **gaya London**, tarikan yang sangat singkat tetapi terjadi terus-menerus.



Langkah 5. Sesaat kemudian, arahnya berbalik, tetapi kedua dipol tetap berhadapan dengan kutub yang berlawanan. Rata-rata, hasilnya selalu tarik-menarik.



Langkah 6. Makin banyak elektron, awan makin besar dan mudah berubah bentuk (polarisabilitas besar), sehingga gaya London makin kuat dan titik didih makin tinggi.

ATURAN · KEKUATAN GAYA LONDON

Gaya London ada pada **semua** molekul dan atom. Kekuatannya bertambah bila:

1. **jumlah elektron bertambah** (biasanya sejalan dengan Mr yang lebih besar), karena awan elektron yang besar lebih mudah terdistorsi;
2. **bidang sentuh antarmolekul lebih luas**: molekul panjang dan lurus saling menempel lebih banyak daripada molekul yang bulat atau bercabang.

Zat	Jumlah elektron	Titik didih	Wujud pada 25 °C
He / Ar / Xe	2 / 18 / 54	–269 / –186 / –108 °C	gas
F_2	18	–188 °C	gas kuning pucat
Cl_2	34	–34 °C	gas kuning kehijauan
Br_2	70	59 °C	cair merah cokelat
I_2	106	184 °C (meleleh 114 °C)	padat ungu kehitaman

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1873, **Johannes Diderik van der Waals** dari Belanda menulis disertasi yang menduga ada tarikan lemah di antara partikel gas. Dugaannya menjelaskan mengapa gas nyata bisa dicairkan, dan ia meraih Nobel Fisika 1910. Asal-usul tarikan antara molekul nonpolar baru dijelaskan pada 1930 oleh fisikawan Jerman **Fritz London** memakai mekanika kuantum. Namanya kini melekat pada gaya itu.

Tebak Dulu!

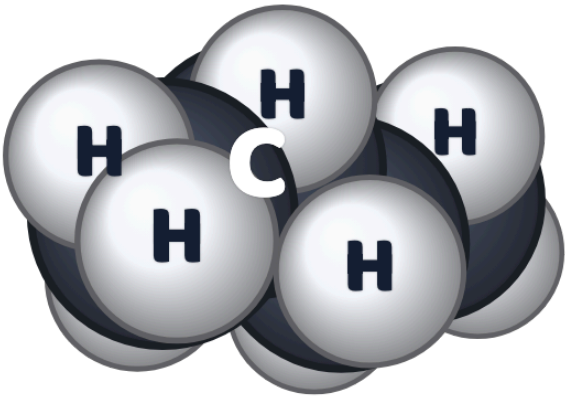
n-Pentana (rantai lurus) dan neopentana (berbentuk bulat) sama-sama C_5H_{12}, Mr 72, dan jumlah elektronnya sama. Mana yang titik didihnya lebih tinggi?

- Sama, karena rumus molekul dan Mr-nya sama.
- n-Pentana (36 °C), jauh di atas neopentana (9,5 °C).
- Neopentana, karena molekul yang bulat lebih padat.
- Tidak bisa diramalkan tanpa percobaan.

Jawabannya: n-pentana. Molekul lurus seperti **sosis**: bisa saling menempel di sepanjang badannya. Neopentana seperti **bakso**: hanya bersentuhan di satu titik kecil. Bidang sentuh yang lebih luas berarti gaya London lebih kuat, sehingga n-pentana butuh suhu lebih tinggi untuk mendidih.

MOLEKUL 3D

Sosis vs bakso: bentuk molekul dan gaya London



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Butana (n-butana) C_4H_{10}

Mr ≈ 58,12 · PubChem ↗

Isi korek gas dan LPG. Isomernya: isobutana.

Pakai model **isi ruang** dan bandingkan pasangan isomer. Butana yang memanjang mendidih pada –0,5 °C, isobutana yang bercabang pada –12 °C. n-Oktana mendidih pada 126 °C, sedangkan isooktana (2,2,4-

trimetilpentana) pada 99 °C. Putar molekulnya: mana yang punya "badan" lebih panjang untuk bersentuhan dengan tetangganya?

Pada alkana rantai lurus, setiap tambahan satu gugus $\mathrm{CH_2}$ menambah 8 elektron dan memperpanjang molekul. Titik didihnya naik teratur, tetapi kenaikannya makin lama makin kecil. Ahli kimia minyak bumi merangkumnya dalam rumus empiris berikut.

RUMUS HIDUP **Titik didih alkana rantai lurus (perkiraan)**

$$T_b \approx 745{,}42 \log(n + 4{,}4) - 689{,}46$$

Setiap tambahan satu atom C memperpanjang 'sosis' molekul sehingga gaya London bertambah; tambahannya makin lama makin kecil.

n Jumlah atom C `atom`

T_b Titik didih `°C`

TITIK DIDIH

36

°C

cair dan mudah menguap: rentang bensin (±C5–C12)

Alkana rantai lurus dengan **5** atom C mendidih pada sekitar **36** °C, atau **309,079** K.

Cek satuan: rumus empiris (persamaan Egloff); log berbasis 10; hasil dalam °C

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-DIDIH-ALKANA-EGLOFF

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA GAYA LONDON CEPAT MELEMAH?

Energi tarik London antara dua partikel kira-kira sebanding dengan kuadrat **polarisabilitas** α (seberapa mudah awan elektron terdistorsi) dan berbanding terbalik dengan pangkat enam jarak:

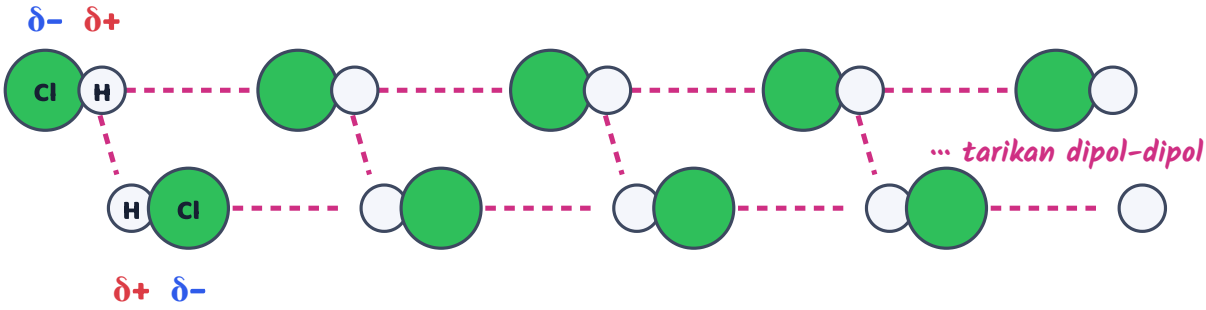
$$E_{\text{London}} \propto -\frac{\alpha^2}{r^6}$$

Jika jarak dijadikan dua kali lipat, tarikannya tinggal $1/2^6 = 1/64$. Itulah sebabnya gaya antarmolekul hampir tidak berarti dalam gas (molekul berjauhan, lihat Bab 14), tetapi sangat penting dalam cairan dan padatan. Selain dipol sesaat–dipol terimbas (London), ada juga tarikan **dipol permanen–dipol terimbas** (gaya Debye) dan **dipol permanen–dipol permanen** (gaya Keesom).

13.2 Gaya dipol-dipol: magnet-magnet kecil

Di Bab 12 kamu menemukan bahwa molekul seperti HCl bersifat **polar**: atom Cl yang lebih elektronegatif menarik pasangan elektron ikatan, sehingga ujung Cl bermuatan parsial negatif (δ^-) dan ujung H positif (δ^+). Dipol ini **permanen**, tidak datang dan pergi seperti dipol sesaat.

Bahasa sederhana · Molekul polar mirip magnet batang kecil. Bila banyak magnet ditaruh berdekatan, mereka berputar sendiri supaya kutub yang berlawanan saling berhadapan, lalu menempel. Molekul polar juga begitu.



Molekul HCl dalam cairan cenderung menata diri: ujung δ^+ (H) berhadapan dengan ujung δ^- (Cl) molekul tetangga. Tarikan dipol-dipol ini **menambah** gaya London yang tetap ada.

Cara paling adil untuk melihat pengaruh dipol adalah membandingkan zat dengan jumlah elektron (atau Mr) yang hampir sama, sehingga gaya London-nya setara:

Pasangan	Mr	Polar?	Titik didih
$\mathrm{F_2}$ vs HCl	38 vs 36,5	tidak vs ya	–188 °C vs –85 °C

Br_2 vs ICl	159,8 vs 162,4	tidak vs ya	59 °C vs 97 °C
butana vs aseton (propanon)	58 vs 58	tidak vs ya ($C{=}O$)	−0,5 °C vs 56 °C

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Molekul polar tidak selalu mendidih lebih tinggi. HCl lebih polar daripada HI, tetapi HI mendidih pada −35 °C, jauh di atas HCl (−85 °C). HI punya 54 elektron (HCl hanya 18), sehingga gaya London-nya jauh lebih besar dan mengalahkan selisih kepolaran. Bandingkan dipol-dipol hanya bila ukuran molekulnya mirip.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · TIGA PERTANYAAN DETEKTIF**

Untuk setiap zat molekuler, tanyakan berurutan:

1. Adakah atom **H yang menempel langsung pada F, O, atau N**? Jika ya → ada **ikatan hidrogen**.
2. Apakah molekulnya **polar** (bentuknya tidak simetris)? Jika ya → ada **dipol-dipol**.
3. Selalu ada **gaya London**. Makin banyak elektron dan makin panjang molekulnya, makin kuat.

Saat membandingkan titik didih: jika Mr mirip, jenis gaya yang menentukan; jika jenis gayanya sama, ukuran dan bentuk yang menentukan.

CONTOH **Detektif gaya antarmolekul**

Tentukan gaya antarmolekul terkuat di antara molekul-molekul zat berikut: (a) metana CH_4, (b) hidrogen klorida HCl, (c) metanol CH_3OH, (d) karbon dioksida CO_2.

1. CH_4: H menempel pada C (bukan F, O, N); molekul tetrahedral simetris sehingga nonpolar → hanya **gaya London**.
2. HCl: H menempel pada Cl (bukan F, O, N); molekul polar → **dipol-dipol** (plus London).
3. CH_3OH: ada H yang menempel langsung pada O → **ikatan hidrogen** (plus dipol-dipol dan London).
4. CO_2: ikatan C=O polar, tetapi molekulnya lurus sehingga dipolnya saling meniadakan → hanya **gaya London**.

(a) London, (b) dipol-dipol, (c) ikatan hidrogen, (d) London. Perhatikan jebakan pada CO_2: ikatan polar belum tentu menghasilkan molekul polar.

13.3 Ikatan hidrogen: si "curang" pada air

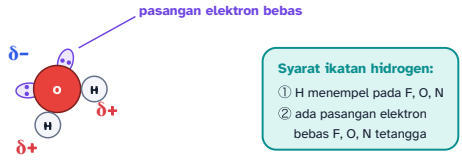
Kembali ke teka-teki Bab 12: air (Mr 18) mendidih pada 100 °C, sedangkan H_2S (Mr 34) sudah mendidih pada −60 °C. Menurut gaya London, H_2S yang lebih berat seharusnya mendidih lebih tinggi. Air "curang" karena punya tarikan istimewa yang tidak dimiliki H_2S.

DEFINISI · IKATAN HIDROGEN

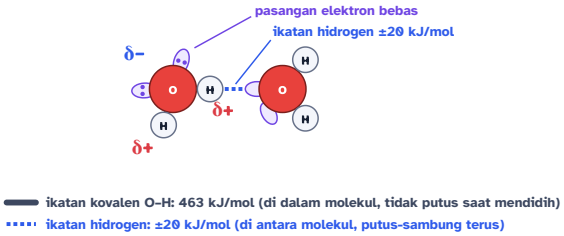
Ikatan hidrogen adalah tarikan antarmolekul yang kuat antara atom **H yang terikat kovalen pada atom sangat elektronegatif (F, O, atau N)** dan **pasangan elektron bebas pada atom F, O, atau N** lain. Ditulis dengan titik-titik: $O{-}H\cdots O$, $N{-}H\cdots O$, $F{-}H\cdots F$.

Mengapa hanya F, O, dan N? Ketiganya sangat elektronegatif dan kecil. Mereka menarik elektron ikatan begitu kuat sehingga atom H, yang tidak punya elektron lain, tinggal seperti **proton yang hampir telanjang**. Ujung δ^+ yang mungil dan pekat ini dapat mendekat sangat rapat ke pasangan elektron bebas molekul tetangga.

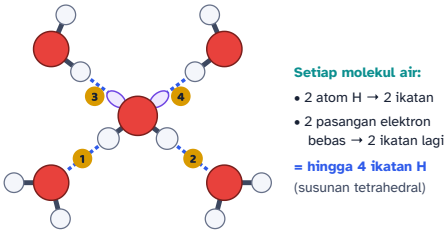
Bahasa sederhana · Pada air, setiap molekul punya dua "tangan" (dua atom H) dan dua "kantong" (dua pasangan elektron bebas pada O). Tangan satu molekul bisa memegang kantong molekul lain. Akibatnya, molekul-molekul air saling bergandengan membentuk jaringan besar, seperti anak-anak yang bergandengan tangan dalam permainan ular naga.



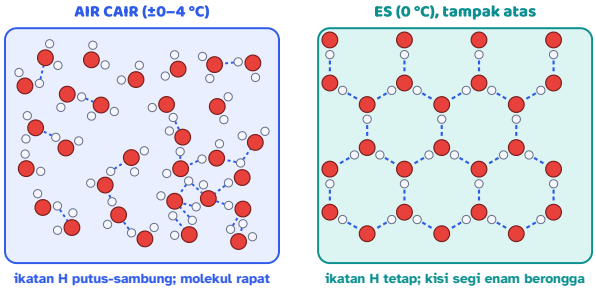
Langkah 1. Satu molekul air: O bermuatan parsial negatif (δ^-) dan punya dua pasangan elektron bebas; kedua H bermuatan parsial positif (δ^+).



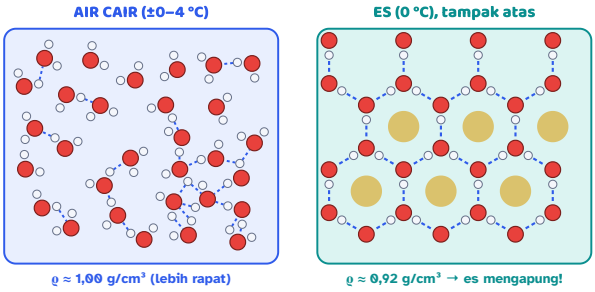
Langkah 2. Atom H molekul kiri tertarik ke pasangan elektron bebas O molekul kanan: terbentuk **ikatan hidrogen** (garis putus-putus). Kuat untuk ukuran gaya antarmolekul, tetapi ±20 kali lebih lemah daripada ikatan kovalen O–H.



Langkah 3. Setiap molekul air dapat membentuk hingga **empat** ikatan hidrogen: dua lewat atom H-nya, dua lewat pasangan elektron bebasnya. Susunannya tetrahedral.



Langkah 4. Dalam air cair, ikatan hidrogen terus putus dan tersambung, sehingga molekul bisa saling mendekat. Dalam es, setiap molekul terkunci dalam kisi segi enam (ikatan keempat mengarah ke depan atau belakang layar).



Langkah 5. Kisi es menyisakan ruang kosong (kuning), sehingga volume es ±9% lebih besar daripada air asalnya. Massa jenis es lebih kecil, maka **es mengapung**.

TRIK KIMO · HIDROGEN NAIK "FON"

Ingat kata **FON**: **F**luorin, **O**ksigen, **N**itrogen. Ikatan hidrogen hanya terjadi jika H "menumpang" langsung pada salah satu anggota FON, lalu "menelepon" pasangan elektron bebas anggota FON lain. H pada C (seperti di CH_4) tidak bisa menelepon siapa pun.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Ikatan hidrogen bukan ikatan kovalen yang mengandung hidrogen. Ikatan O–H di dalam molekul air adalah ikatan kovalen (463 kJ/mol), sedangkan ikatan hidrogen adalah tarikan **antarmolekul** $\mathrm{O{-}H\cdots O}$ (±20 kJ/mol). Waspadai juga molekul yang punya O dan H tetapi H-nya menempel pada C, seperti dimetil eter $\mathrm{CH_3OCH_3}$: molekul-molekulnya tidak berikatan hidrogen satu sama lain.

Sekarang lihat data titik didih hidrida (senyawa unsur dengan hidrogen) golongan 14 sampai 17. Untuk setiap golongan, titik didih biasanya naik dari periode 3 ke 5 karena jumlah elektron bertambah. Namun, tiga anggota periode 2 melompat keluar dari tren.

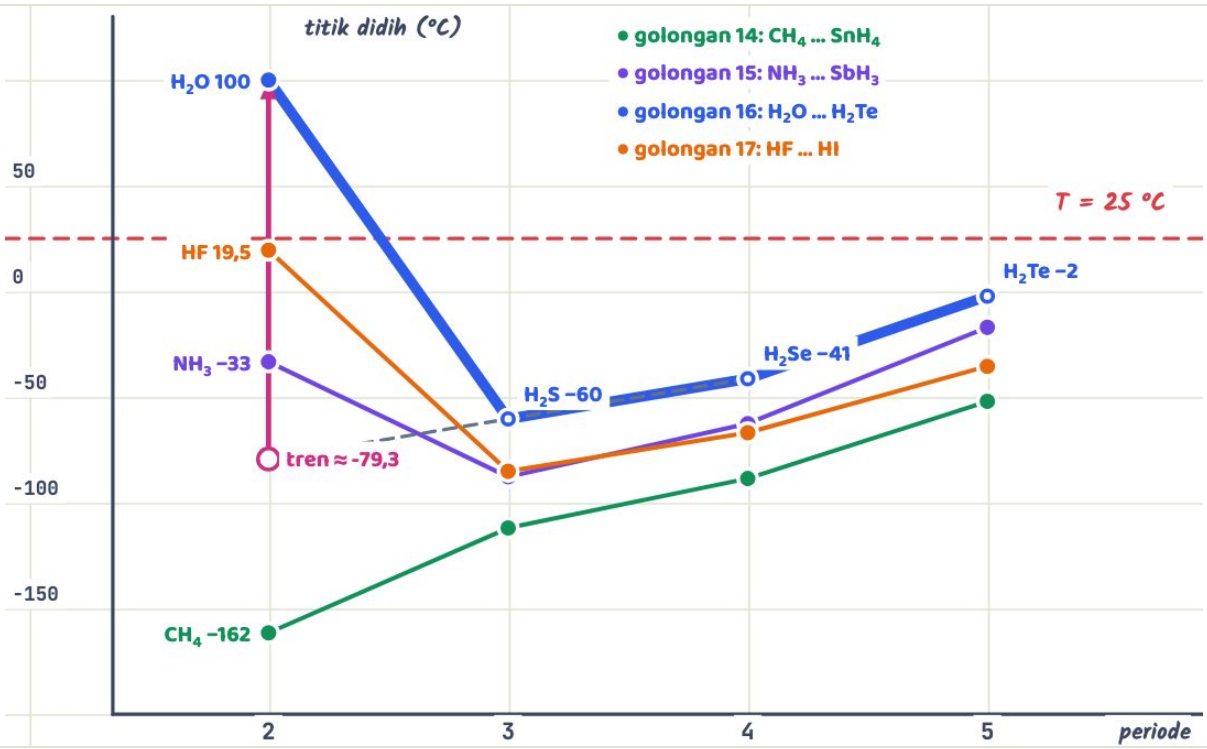
GRAFIK HIDUP

Titik didih hidrida golongan 14–17: siapa yang curang?

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-13

$$T_b = f(\text{periode})$$

$$T_b^{\text{nyata}} = 100\ ^\circ\text{C}, \quad T_b^{\text{tren}} \approx -79{,}3\ ^\circ\text{C}$$



H_2O ±180 °C di atas tren: tiap molekul air bisa membentuk hingga 4 ikatan hidrogen

pada suhu ini, dari 16 hidrida hanya H_2O yang belum mendidih

zat periode 2	titik didih nyata	perkiraan dari tren	selisih
H_2O	100 °C	-79 °C	179 °C

hidrida yang belum mendidih pada T
1 dari 16

Geser **golongan** untuk menyorot satu garis. Garis putus-putus memperpanjang tren periode 3–4 ke periode 2: itulah titik didih "seharusnya" tanpa ikatan hidrogen. Panah magenta menunjukkan sumbangan ikatan hidrogen. Lalu geser **suhu lingkungan** ke 25 °C: berapa hidrida yang masih cair?

Grafik itu memperlihatkan tiga "pencurang": H_2O, HF, dan NH_3. Ketiganya punya H yang menempel pada F, O, atau N. CH_4 tidak curang sama sekali. Tanpa ikatan hidrogen, air diperkirakan mendidih sekitar −80 °C, dan Bumi tidak akan punya lautan!

COBA SENDIRI

Mengapa air mengalahkan HF?

Ikatan hidrogen $\mathrm{F{-}H\cdots F}$ secara individu lebih kuat daripada $\mathrm{O{-}H\cdots O}$, karena F lebih elektronegatif. Namun, titik didih HF (19,5 °C) jauh di bawah air (100 °C). Jelaskan. Mengapa $\mathrm{NH_3}$ (–33 °C) paling rendah di antara ketiganya?

1. Hitung "tangan" (H pada F/O/N) dan "kantong" (pasangan elektron bebas) per molekul. $\mathrm{H_2O}$: 2 H dan 2 pasangan bebas. HF: 1 H dan 3 pasangan bebas. $\mathrm{NH_3}$: 3 H dan 1 pasangan bebas.

2. Setiap ikatan hidrogen butuh satu tangan dan satu kantong. Jumlah ikatan dibatasi oleh yang paling sedikit: air bisa memakai semua 2 + 2 (hingga 4 ikatan per molekul, rata-rata 2 ikatan untuk setiap molekul), sedangkan HF dan $\mathrm{NH_3}$ dibatasi oleh angka 1 (rata-rata hanya ±1 ikatan per molekul).

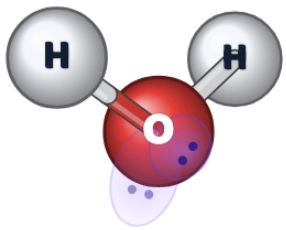
3. HF hanya membentuk rantai zig-zag, bukan jaringan tiga dimensi. Jaringan ikatan hidrogen air jauh lebih luas, sehingga lebih banyak energi diperlukan untuk memisahkan molekulnya.

4. $\mathrm{NH_3}$ juga dibatasi oleh satu pasangan bebas, **dan** N kurang elektronegatif daripada F dan O, sehingga setiap ikatan hidrogennya paling lemah.

Yang menentukan bukan hanya kekuatan satu ikatan hidrogen, tetapi juga jumlahnya per molekul. Urutan titik didih: $\mathrm{H_2O}$ (100 °C) > HF (19,5 °C) > $\mathrm{NH_3}$ (–33 °C).

MOLEKUL 3D

Siapa yang bisa berikatan hidrogen?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Air $\mathrm{H_2O}$ Mr ≈ 18,02 PubChem ↗

Molekul bengkok dengan sudut ±104,5°. Dua pasang elektron bebas pada O membuatnya polar dan mampu berikatan hidrogen.

Pasangan elektron bebas sudah dinyalakan. Untuk setiap molekul, cari atom H yang menempel langsung pada F, O, atau N. Bandingkan **etanol** dan **dimetil eter**: rumusnya sama, C_2H_6O, tetapi hanya etanol yang punya gugus O–H. Etanol mendidih pada 78 °C, dimetil eter pada –24 °C. Nyalakan juga panah dipol!

KERJAKAN BERSAMA **Kembar rumus, beda nasib**

Urutkan titik didih propana $CH_3CH_2CH_3$ (Mr 44), dimetil eter CH_3OCH_3 (Mr 46), dan etanol CH_3CH_2OH (Mr 46) dari yang terendah. Jelaskan.

1. Mr ketiganya hampir sama, jadi gaya London-nya setara. Yang membedakan adalah jenis gaya lainnya.
2. Propana: nonpolar, hanya London → paling rendah.
3. Dimetil eter: bentuknya bengkok di O sehingga polar → London + dipol-dipol. Semua H menempel pada C, jadi tidak ada ikatan hidrogen antarmolekul.
4. Etanol: ada gugus O–H → ikatan hidrogen + dipol-dipol + London → paling tinggi.

Propana (–42 °C) < dimetil eter (–24 °C) < etanol (78 °C). Satu gugus O–H menaikkan titik didih lebih dari 100 °C!

Es yang mengapung: keanehan yang menyelamatkan kehidupan

Hampir semua zat lebih rapat dalam wujud padat daripada cair, sehingga padatannya tenggelam. Lilin padat tenggelam dalam lilin cair, mentega beku tenggelam dalam mentega cair. Air adalah pengecualian terkenal: kisi es yang dibangun oleh ikatan hidrogen berongga, sehingga massa jenis es (0,917 g/cm^3) lebih kecil daripada air (1,000 g/cm^3).

RUMUS HIDUP

Bagian es yang menyembul

$$f = \left(1 - \frac{\rho_{\text{es}}}{\rho_{\text{cair}}}\right) \times 100\%$$

Benda yang mengapung tercelup sebanyak perbandingan massa jenisnya dengan cairan; sisanya menyembul di atas permukaan.

- ρ_{es} Massa jenis es g/cm³
- ρ_{cair} Massa jenis cairan g/cm³
- f Volume yang menyembul %

VOLUME YANG MENYEMBUL

8,3

%

es batu di segelas es teler

Es bermassa jenis **0,917** g/cm³ dalam cairan **1** g/cm³: **8,3** % volumenya berada di atas permukaan.

Cek satuan: (g/cm³ ÷ g/cm³) × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ES-MENYEMBUL

Karena es mengapung, danau di negeri bermusim dingin membeku dari atas. Lapisan es menjadi selimut yang melindungi air di bawahnya, sehingga ikan tetap hidup sepanjang musim dingin. Sebaliknya, pemuaian saat membeku bisa merusak: botol kaca berisi air penuh dapat pecah di dalam freezer.

KIMIA NUSANTARA · EMBUN UPAS DI DIENG

Pada puncak musim kemarau (sekitar Juli–Agustus), suhu dini hari di Dataran Tinggi Dieng (±2.000 m) bisa turun di bawah 0 °C. Embun di daun kentang membeku menjadi kristal es yang oleh warga disebut **embun upas** ("embun racun"). Es itu sebenarnya tidak beracun. Air di dalam sel daun ikut membeku dan memuai ±9%, sehingga dinding sel rusak dan daun menghitam. Wisatawan menyukai pemandangannya, tetapi petani kentang merugi.

TAMU DARI MASA LALU

Istilah ikatan hidrogen dipopulerkan oleh **Linus Pauling** dalam bukunya *The Nature of the Chemical Bond* (1939). Empat belas tahun kemudian, **James Watson** dan **Francis Crick** (1953), dengan bantuan foto difraksi sinar-X karya **Rosalind Franklin**, menyimpulkan bahwa dua untai DNA dirapatkan oleh ikatan hidrogen antara pasangan basa: adenin–timin (2 ikatan) dan guanin–sitosin (3 ikatan). Saat tes PCR, DNA dipanaskan ±95 °C agar kedua untainya terpisah. Yang putus hanya ikatan hidrogennya, sedangkan untainya tetap utuh.

MITOS

"Es mengapung karena di dalamnya ada gelembung udara."

FAKTA

Es yang bening tanpa gelembung pun mengapung. Penyebabnya kisi heksagonal ikatan hidrogen yang berongga, sehingga es ±9% lebih renggang daripada air cair.

MITOS

"Saat air mendidih, molekulnya pecah menjadi hidrogen dan oksigen."

FAKTA

Mendidih hanya memisahkan molekul H_2O yang utuh dari tetangganya. Memecah air menjadi H_2 dan O_2 butuh elektrolisis (Bab 31) atau suhu ribuan derajat.

MITOS

"Semua senyawa yang mengandung H dan O pasti berikatan hidrogen."

FAKTA

H harus menempel langsung pada F, O, atau N. Dimetil eter CH_3OCH_3 punya O dan H, tetapi semua H-nya menempel pada C, sehingga molekul-molekulnya tidak berikatan hidrogen satu sama lain.

13.4 Dari partikel ke dunia nyata: titik didih, kelarutan, kekentalan, tegangan permukaan

Sekarang kita punya tiga "lem" dengan kekuatan berbeda. Semua sifat fisik zat molekuler di sekitarmu bisa dijelaskan dengan pertanyaan yang sama: *seberapa kuat molekul-molekulnya saling menempel?*

ATURAN · URUTAN KEKUATAN (UNTUK MOLEKUL BERUKURAN MIRIP)

$$\text{ikatan hidrogen} > \text{dipol-dipol} > \text{gaya London}$$

Makin kuat gaya antarmolekul → titik didih dan titik leleh makin tinggi, kalor penguapan makin besar, tekanan uap makin rendah (zat makin sulit menguap), tegangan permukaan dan kekentalan umumnya makin besar. Ingat: molekul yang sangat besar (lilin, oli) bisa punya gaya London yang mengalahkan ikatan hidrogen molekul kecil.

Zat (Mr ±58–60)	Gaya terkuat	Titik didih
butana $\mathrm{C_4H_{10}}$	London	−0,5 °C (gas pada suhu kamar)
aseton $\mathrm{CH_3COCH_3}$	dipol-dipol	56 °C
1-propanol $\mathrm{CH_3CH_2CH_2OH}$	ikatan hidrogen	97 °C

Titik didih dan energi penguapan

Untuk menguapkan cairan, setiap molekul harus melepaskan diri dari semua tetangganya. Energi per mol yang dibutuhkan disebut **kalor penguapan molar**, ΔH_{vap}. Nilainya menjadi "termometer" kekuatan gaya antarmolekul: air 40,7 kJ/mol, etanol 38,6 kJ/mol, aseton 29,1 kJ/mol, dan metana hanya 8,2 kJ/mol.

RUMUS HIDUP

Energi untuk menguapkan zat

$$Q = n\,\Delta H_{\text{vap}} = \frac{m}{M_r} \times \Delta H_{\text{vap}}$$

Energi penguapan = banyaknya mol molekul yang harus dilepas dari gandengannya dikali energi pelepasan per mol.

- m Massa zat `g`
- M_r Massa molar `g/mol`
- ΔH_{vap} Kalor penguapan molar `kJ/mol`
- Q Energi yang diperlukan `kJ`

ENERGI YANG DIPERLUKAN

40,7

kJ

air pada 100 °C

Menguapkan **18** g zat (**1** mol) memerlukan **40,7** kJ. Energi sebesar itu cukup untuk memanaskan **129,825** g air dari 25 °C sampai 100 °C.

Cek satuan: g ÷ (g/mol) × kJ/mol = kJ ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KALOR-UAP-MOL

KERJAKAN BERSAMA

Merebus air sampai habis

Kak Tirta lupa mematikan kompor: 1 L air (1.000 g) di panci sudah mendidih dan terus menguap sampai habis. Berapa energi untuk menguapkan semua air itu pada 100 °C? Bandingkan dengan energi untuk memanaskan 1 L air dari 25 °C ke 100 °C (kalor jenis air 4,18 J/g·°C). (ΔH_{vap} = 40,7 kJ/mol; Mr air = 18)

1. Mol air: $n = 1.000/18 = 55{,}6$ mol.
2. Energi penguapan: $Q = 55{,}6 \times 40{,}7 = 2.261$ kJ $\approx 2{,}26$ MJ.
3. Energi pemanasan: $Q = m\,c\,\Delta T = 1.000 \times 4{,}18 \times 75 = 313.500$ J ≈ 314 kJ.
4. Perbandingan: $2.261/314 \approx 7{,}2$.

Menguapkan air butuh ±2.260 kJ, sekitar 7 kali energi untuk memanaskannya dari suhu kamar sampai mendidih. Ikatan hidrogen air itu mahal! Maka merebus air terlalu lama memboroskan gas LPG.

ADU CEPAT

Energi penguapan air

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-13

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Ubah gram ke mol (÷ 18), lalu kalikan 40,7 kJ/mol.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ATURAN TROUTON DAN "KETERATURAN" CAIRAN BERIKATAN HIDROGEN

Pada titik didih, cairan dan uapnya setimbang ($\Delta G = 0$), sehingga entropi penguapan $\Delta S_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{vap}}/T_b$. Aturan Trouton menyatakan bahwa banyak cairan "normal" punya $\Delta S_{\text{vap}} \approx 85$–$88$ J mol^{-1} K^{-1}.

- Benzena: $30.700/353 = 87$ J mol^{-1} K^{-1} (normal)
- n-Heksana: $28.900/342 = 84$ J mol^{-1} K^{-1} (normal)
- Air: $40.700/373 = 109$ J mol^{-1} K^{-1}; etanol: $38.600/351 = 110$ J mol^{-1} K^{-1} (menyimpang!)

Penyimpangan pada air dan etanol terjadi karena jaringan ikatan hidrogen membuat cairannya lebih teratur dari biasanya. Saat menguap, keteraturan itu runtuh, sehingga kenaikan entropinya lebih besar. Entropi dan energi bebas dibahas di Bab 20.

Kelarutan: "yang sejenis melarutkan yang sejenis"

ATURAN · LIKE DISSOLVES LIKE

Zat polar dan zat yang berikatan hidrogen cenderung larut dalam pelarut polar (air). Zat nonpolar cenderung larut dalam pelarut nonpolar (minyak, bensin, heksana). Zat larut bila tarikan baru antara zat terlarut dan pelarut kira-kira sebanding dengan tarikan lama yang harus diputus.

Gula pasir punya delapan gugus O–H, sehingga molekulnya membentuk banyak ikatan hidrogen dengan air dan mudah larut. Minyak goreng tersusun atas rantai hidrokarbon panjang yang nonpolar. Jika minyak masuk ke air, molekul air "lebih suka" tetap bergandengan dengan sesamanya lewat ikatan hidrogen, sehingga minyak terdesak keluar dan mengapung. Garam dapur larut di air karena ion $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$ ditarik kuat oleh ujung-ujung dipol air (**gaya ion–dipol**).

KIMIA NUSANTARA · SANTAN DAN MINYAK KELAPA

Santan adalah emulsi: butiran lemak kelapa yang nonpolar tersebar dalam air, dijaga oleh protein kelapa yang bekerja seperti "jembatan" antara bagian polar dan nonpolar. Jika santan dipanaskan terlalu lama tanpa diaduk, proteinnya rusak dan lemaknya memisah ("santan pecah"). Pengolah minyak kelapa tradisional justru sengaja memanaskan santan berjam-jam sampai minyaknya terpisah dari ampas cokelat yang disebut *blondo*. Minyak yang nonpolar itu lalu dituang dari atas air.

Kekentalan, tegangan permukaan, dan kapilaritas

Viskositas (kekentalan) adalah hambatan cairan untuk mengalir. Molekul yang saling menempel kuat, atau molekul panjang yang saling membelit, membuat cairan kental. **Tegangan permukaan** muncul karena molekul di permukaan hanya ditarik ke samping dan ke dalam, tidak ke atas. Permukaan cairan pun berperilaku seperti kulit elastis tipis: inilah yang menahan anggang-anggang dan klip kertas di komik.

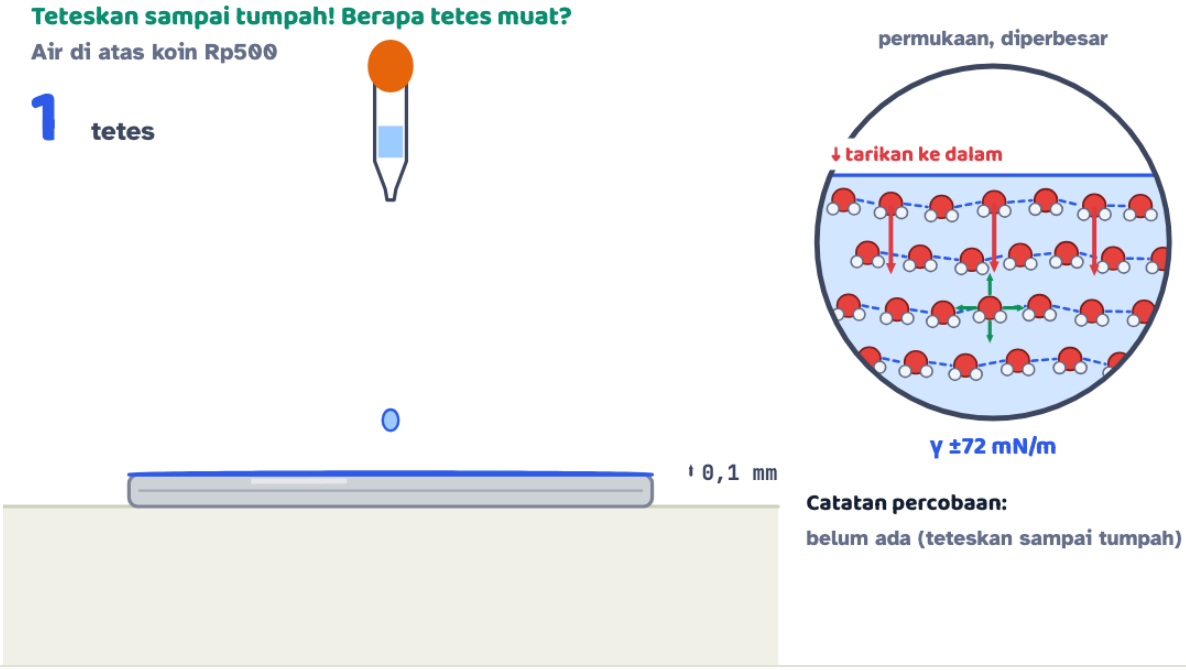
Cairan (20 °C)	Gaya antarmolekul utama	Tegangan permukaan (mN/m)	Viskositas (mPa·s)
air	ikatan hidrogen (jaringan 3D)	72,8	1,0
etanol	ikatan hidrogen (satu O–H)	22	1,2
aseton	dipol-dipol	24	0,3
n-heksana	London	18	0,3
gliserol (gliserin)	ikatan hidrogen (tiga O–H)	63	±1.400
minyak goreng	London (rantai panjang)	±32	±50–80

Kohesi adalah tarikan antarmolekul sejenis, sedangkan **adhesi** adalah tarikan ke permukaan lain. Air menempel kuat pada kaca (adhesi > kohesi), sehingga permukaannya dalam tabung melengkung cekung dan air naik di pipa sempit: **kapilaritas**. Raksa justru melengkung cembung karena kohesinya jauh lebih kuat. Kapilaritas membuat minyak tanah merambat naik pada sumbu lampu teplok dan air naik dari akar ke daun.

LAB MINI

Kubah air di atas koin: berapa tetes muat?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-13



Tetes yang tertampung	Volume	Tinggi kubah	Tegangan permukaan
1	0,05 mL	0,1 mm	±72 mN/m

Keadaan: kubah menggembung…

Pilih cairan dan koin, lalu tekan **1 tetes** berkali-kali atau ▶ **Jalankan** untuk meneteskan terus sampai tumpah. Bandingkan air dengan air sabun dan alkohol 70%. Lingkaran kanan memperbesar permukaan: panjang panah menunjukkan tarikan ke dalam yang membentuk "kulit" cairan. Model ini disederhanakan; hasil nyata bergantung pada pipet dan kebersihan koin.

Sabun dan deterjen adalah **surfaktan**: molekulnya punya kepala polar dan ekor nonpolar panjang. Molekul sabun berkumpul di permukaan air dan menyisip di antara molekul air, sehingga banyak ikatan hidrogen di permukaan terputus. Tegangan permukaan pun turun drastis. Itulah sebabnya setetes sabun menenggelamkan klip kertas Bima, dan kolam yang tercemar deterjen dapat menenggelamkan anggang-anggang.

13.5 Ikatan logam: ion positif di tengah lautan elektron

Logam tidak tersusun atas molekul. Atom logam punya sedikit elektron valensi dan energi ionisasi rendah. Dalam padatan logam, elektron valensi itu dilepaskan ke "kolam bersama" dan bebas berkelana di seluruh kristal. Yang tertinggal adalah ion-ion positif yang tersusun rapi dalam kisi.

Bahasa sederhana · Bayangkan bola-bola pingpong bermuatan positif yang direndam dalam lautan madu bermuatan negatif. Madu itu (elektron) menempel pada semua bola sekaligus dan bisa mengalir ke mana saja. Bola-bola tidak saling lepas, tetapi bisa digeser tanpa putus.

DEFINISI · IKATAN LOGAM

Ikatan logam adalah gaya tarik elektrostatik antara kisi ion-ion logam positif dan **lautan elektron** valensi yang **terdelokalisasi** (tidak dimiliki satu atom tertentu dan bebas bergerak di seluruh kisi). Ikatan ini tidak berarah, sehingga lapisan ion dapat bergeser tanpa memutus ikatan.

Tebak Dulu!

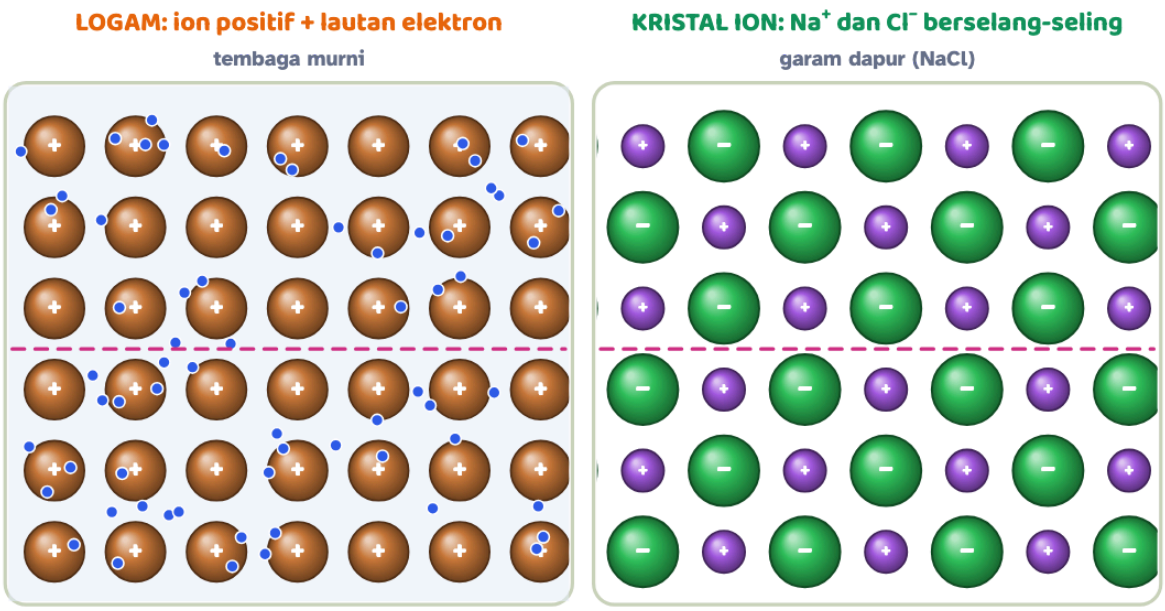
Sebuah lempeng tembaga dan sebongkah kristal garam batu (NaCl) masing-masing dipukul dengan palu. Apa yang terjadi?

- Keduanya penyok karena sama-sama padatan kristal.
- Keduanya pecah karena sama-sama tersusun atas ion.
- Tembaga penyok (berubah bentuk tanpa patah), garam pecah berkeping-keping.
- Garam penyok, tembaga pecah, karena garam lebih lunak.

Jawabannya: tembaga penyok, garam pecah. Saat lapisan ion tembaga bergeser, lautan elektron ikut mengalir dan tetap merekatkan semuanya. Saat lapisan kristal garam bergeser sejauh satu ion, ion bermuatan sama tiba-tiba berhadapan dan saling tolak, sehingga kristalnya terbelah. Buktikan di Lab Mini di bawah!

LAB MINI Lautan elektron: logam ditempa vs kristal ion dipukul

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-13



Nyalakan "Hubungkan baterai" untuk menguji daya hantar listrik.

Logam	Kristal ion	Arus listrik
utuh	utuh	baterai belum terhubung

Geser **lapisan atas** perlahan, atau tekan 🔨 **Pukul palu!** Amati kedua kristal: apakah ion bermuatan sama pernah berhadapan? Ganti logam menjadi **perunggu** untuk melihat atom timah yang lebih besar mengganjal lapisan. Nyalakan **baterai**: di kristal mana muatan bisa mengalir?

Sifat logam	Penjelasan tingkat partikel
Menghantar listrik (padat maupun cair)	Elektron terdelokalisasi bebas bergerak dan mengalir saat diberi beda potensial.
Menghantar panas	Elektron bebas dan ion yang bergetar meneruskan energi kinetik dengan cepat.
Dapat ditempa dan ditarik menjadi kawat	Lapisan ion dapat bergeser; lautan elektron tetap merekatkan, sehingga logam tidak patah.
Mengilap	Elektron bebas menyerap lalu memancarkan kembali cahaya yang datang.
Titik leleh umumnya tinggi	Tarikan antara ion positif dan lautan elektron kuat ke segala arah.

ATURAN · KEKUATAN IKATAN LOGAM

Ikatan logam makin kuat bila **jumlah elektron terdelokalisasi per atom** makin banyak (muatan ion makin besar) dan **jari-jari ion** makin kecil. Contoh: titik leleh Na 98 °C < Mg 650 °C < Al 660 °C, dan dalam golongan 1 titik leleh turun dari Li (181 °C) ke K (63 °C) karena ion makin besar.

COBA SENDIRI **Natrium, magnesium, aluminium**

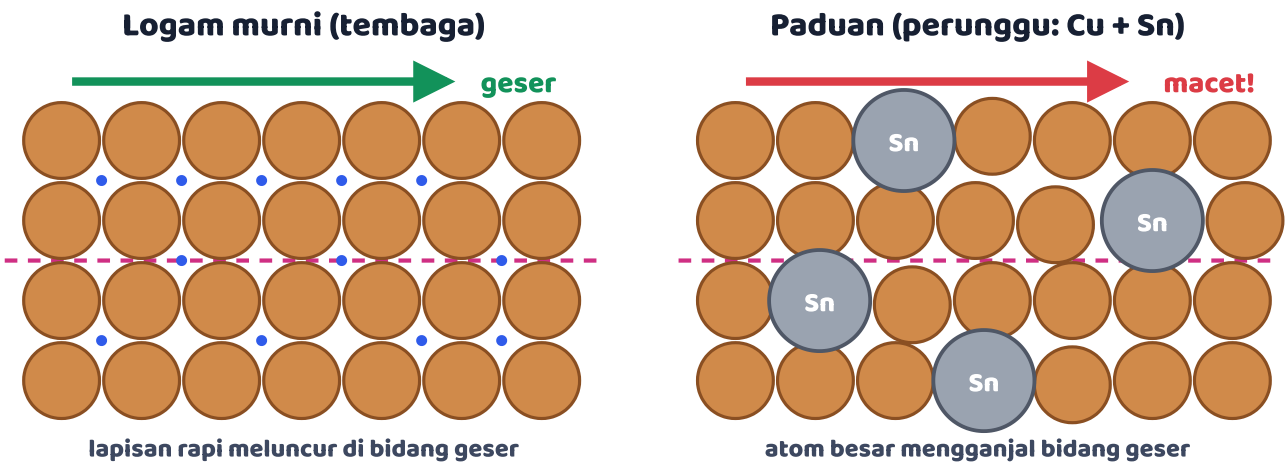
Titik didih natrium 883 °C, magnesium 1.090 °C, dan aluminium 2.519 °C. Jelaskan urutan ini dengan model lautan elektron. Mengapa kalium (titik didih 759 °C) lebih rendah daripada natrium?

1. Elektron valensi yang dilepas ke lautan: Na 1 (ion Na^{+}), Mg 2 (Mg^{2+}), Al 3 (Al^{3+}).
2. Makin besar muatan ion dan makin banyak elektron terdelokalisasi, makin kuat tarikan elektrostatik antara kisi dan lautan elektron.
3. Jari-jari ion juga mengecil dari Na^{+} ke Al^{3+}, sehingga lautan elektron berada lebih dekat dengan inti ion. Tarikan makin kuat lagi.
4. K dan Na sama-sama melepas 1 elektron, tetapi ion K^{+} lebih besar (punya satu kulit lebih banyak), sehingga tarikan terhadap lautan elektron lebih lemah.

Kekuatan ikatan logam: Al > Mg > Na > K. Titik didih logam lebih menggambarkan kekuatan ikatan logam daripada titik leleh, karena saat mendidih ikatan logam benar-benar diputus.

Paduan: logam campuran yang lebih keras

Paduan (aloi) adalah campuran logam dengan unsur lain. Logam murni sering terlalu lunak: emas 24 karat mudah tergores dan bengkok. Atom tambahan yang ukurannya berbeda mengacaukan barisan kisi, sehingga lapisan ion lebih sulit bergeser. Hasilnya: paduan lebih keras dan kuat.



Kiri: semua ion sama besar, sehingga lapisan meluncur mulus (logam lunak dan mudah ditempa). Kanan: atom timah yang lebih besar menjadi "polisi tidur" di bidang geser, sehingga paduan lebih keras.

Paduan	Komposisi utama	Contoh pemakaian
Perunggu	Cu + Sn	gamelan, patung, medali, lonceng
Kuningan	Cu + Zn	kunci, keran, kerajinan kuningan, alat musik tiup
Baja	Fe + C (< 2%)	rangka gedung, jembatan, rel
Baja nirkarat (*stainless steel*)	Fe + Cr (≥ 10,5%) + Ni	sendok, panci, peralatan rumah sakit
Emas perhiasan 22 karat	Au (91,7%) + Cu/Ag	cincin dan gelang yang tidak mudah bengkok

KIMIA NUSANTARA · GAMELAN PERUNGGU DAN PAMOR KERIS

Bilah gamelan Jawa dan Bali dibuat dari **perunggu bertimah tinggi**, kira-kira 10 bagian tembaga dan 3 bagian timah. Konon, kata *gangsa* (sebutan perunggu gamelan) berasal dari "tiga sedasa", tiga dan sepuluh. Paduan ini keras dan nyaring, tetapi rapuh bila dingin, sehingga para pande menempanya selagi membara. Tembaganya bisa berasal dari Papua, timahnya dari Bangka Belitung. Pada **keris**, empu menempa berlapis-lapis besi dan bahan pamor yang mengandung nikel. Setelah dibersihkan, lapisan nikel tampak berkilau membentuk pola pamor. Sebagian empu memakai besi meteorit, yang terkenal adalah pamor dari meteorit Prambanan.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1900, fisikawan Jerman **Paul Drude** mengusulkan model "gas elektron" untuk logam: elektron bebas berkeliaran di antara ion seperti partikel gas dalam wadah. Model sederhana ini sudah mampu menjelaskan daya hantar listrik dan panas logam. Tiga tahun sebelumnya, J.J. Thomson baru saja menemukan elektron (Bab 5)!

AWAS JEBAKAN

Tidak semua logam keras dan padat. Raksa (Hg) cair pada suhu kamar (titik leleh –39 °C), galium (Ga) meleleh di genggaman tangan (29,8 °C), dan natrium bisa diiris pisau. Sebaliknya, tidak semua penghantar listrik adalah logam: grafit (karbon) juga menghantar listrik karena punya elektron terdelokalisasi (subbab 13.6).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TEORI PITA: LOGAM, ISOLATOR, SEMIKONDUKTOR

Dalam padatan, orbital atom dari triliunan atom bergabung menjadi **pita energi** yang hampir kontinu. Pada logam, pita berisi elektron valensi hanya terisi sebagian (atau tumpang tindih dengan pita kosong), sehingga elektron mudah naik ke tingkat energi kosong di dekatnya dan mengalir. Pada isolator seperti intan, pita terisi penuh dipisahkan dari pita kosong oleh **celah pita** yang lebar (±5,5 eV). Pada semikonduktor seperti silikon, celahnya kecil (±1,1 eV), sehingga sebagian elektron bisa melompat bila dipanaskan atau disinari. Inilah dasar kerja panel surya dan cip komputer.

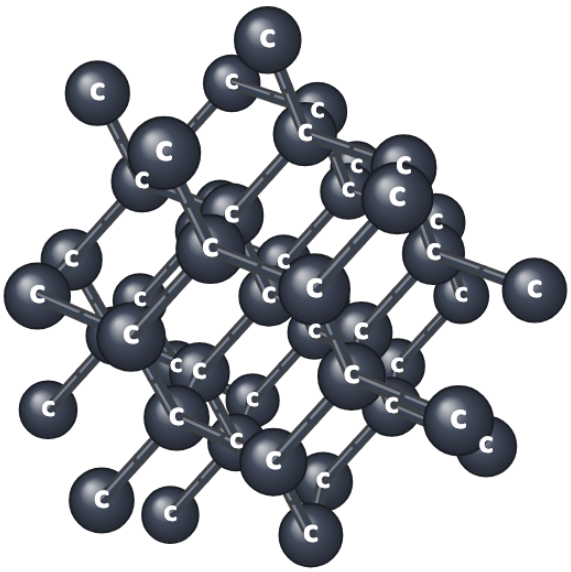
13.6 Struktur kovalen raksasa: intan, grafit, grafena, silika

Beberapa unsur dan senyawa nonlogam tidak membentuk molekul kecil, tetapi **struktur kovalen raksasa** (kisi kovalen): jaringan atom yang semuanya terhubung oleh ikatan kovalen, sampai miliaran miliar atom. Untuk melelehkannya, kita tidak cukup mengalahkan gaya antarmolekul. Ikatan kovalennya harus diputus. Akibatnya, titik lelehnya sangat tinggi.

Bahasa sederhana · Zat molekuler seperti gula itu seperti tumpukan bata lepas: mudah dibongkar. Struktur kovalen raksasa seperti dinding bata yang semuanya disemen: untuk membongkarnya, semennya harus dihancurkan.

Karbon adalah juara bentuk. Unsur yang sama dapat membentuk beberapa **alotrop**, yaitu bentuk unsur yang sama dengan susunan atom berbeda: intan, grafit, grafena, fulerena, nanotabung karbon, dan karbon amorf (arang).

MOLEKUL 3D **Raksasa karbon dan silika**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Intan (kisi kovalen raksasa) C

Setiap atom C berikatan kovalen dengan 4 atom C lain secara tetrahedral. Jaringan 3D ini membuat intan sangat keras.

Pilih **intan**, lalu ketuk satu atom C dan tetangganya: berapa ikatan per atom, dan berapa sudutnya (±109,5°)? Pada **grafit**, ukur jarak C–C dalam lapisan (±142 pm) dan jarak antarlapisan (±335 pm): mengapa lapisannya mudah tergelincir? Bandingkan dengan **fulerena C_{60}**, yang merupakan molekul tunggal. Terakhir, lihat **silika**: setiap Si dikelilingi berapa O?

	Intan	**Grafit**	**Grafena**	**Fulerena C_{60}**	**Silika SiO_2**
Struktur	kisi 3D, tiap C terikat 4 C (tetrahedral)	lapisan segi enam, tiap C terikat 3 C	satu lapisan grafit setebal satu atom	molekul bola 60 atom C	kisi 3D, tiap Si terikat 4 O, tiap O terikat 2 Si
Antarlapisan / antarmolekul	—	gaya London (lemah)	—	gaya London	—
Kekerasan	paling keras (skala Mohs 10)	lunak, licin	sangat kuat	lunak	keras (Mohs 7)
Daya hantar listrik	tidak	ya (elektron terdelokalisasi)	sangat baik	tidak	tidak

Contoh pemakaian	perhiasan, mata bor, pemotong kaca	isi pensil, elektroda, pelumas	riset baterai dan sensor	riset bahan dan obat	pasir, kaca, kuarsa

Mengapa grafit menghantar listrik padahal intan tidak? Pada intan, keempat elektron valensi setiap C dipakai untuk ikatan kovalen, sehingga tidak ada elektron bebas. Pada grafit, setiap C hanya memakai tiga elektron untuk ikatan. Elektron keempat terdelokalisasi di sepanjang lapisan, mirip lautan elektron kecil. Lapisan-lapisannya hanya ditahan gaya London, sehingga mudah tergelincir: goresan pensil adalah jutaan lapisan grafit yang tertinggal di kertas.

KIMIA NUSANTARA · INTAN MARTAPURA DAN PASIR KUARSA

Pendulangan intan tradisional di Cempaka dan Martapura, Kalimantan Selatan, sudah berlangsung turun-temurun. Pada 1965, ditemukan intan besar yang dinamai **Intan Trisakti** (±167 karat). Silika juga melimpah: **pasir kuarsa** dari Bangka Belitung dan Kalimantan dilebur pada suhu sangat tinggi menjadi kaca jendela dan botol.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1772, **Antoine Lavoisier** memanaskan intan dengan lensa pembakar raksasa dan membuktikan bahwa intan terbakar menjadi "udara tetap" (CO_2): intan adalah karbon! Lebih dari dua abad kemudian, pada 1985, **Harold Kroto, Robert Curl, dan Richard Smalley** menemukan fulerena C_{60} dan meraih Nobel Kimia 1996. Pada 2004, **Andre Geim** dan **Konstantin Novoselov** mengelupas grafit memakai pita perekat (selotip) sampai tersisa satu lapisan atom: grafena. Nobel Fisika 2010 pun jatuh ke tangan mereka.

MITOS

"Intan itu abadi dan tidak bisa terbakar."

FAKTA

Intan adalah karbon murni. Dipanaskan kuat dalam oksigen (di atas ±700 °C), intan terbakar menjadi CO_2. Intan hanya sangat keras, bukan kebal api.

MITOS

"Zat dengan ikatan kovalen pasti titik lelehnya rendah."

FAKTA

Itu hanya berlaku untuk zat **molekuler**, yang dilelehkan cukup dengan mengalahkan gaya antarmolekul. Intan dan silika juga berikatan kovalen, tetapi strukturnya raksasa: untuk meleleh, ikatan kovalennya harus diputus.

Sekarang kita bisa merangkum empat jenis struktur zat padat yang telah kamu temui di Bab 10 sampai Bab 13:

Struktur	Contoh	Yang diputus saat meleleh	Titik leleh	Hantaran listrik

Molekul sederhana	air, gula, iodin, C_{60}	gaya antarmolekul	rendah	tidak (padat maupun cair)
Kovalen raksasa	intan, grafit, SiO_2	ikatan kovalen	sangat tinggi	tidak (kecuali grafit dan grafena)
Ion raksasa	NaCl, MgO	ikatan ion	tinggi	hanya saat leleh atau larut
Logam	Cu, Fe, Al	ikatan logam	umumnya tinggi	ya, padat maupun cair

COBA SENDIRI **Detektif struktur dari data**

Empat padatan putih atau abu-abu diberi label P, Q, R, S. Deduksikan jenis strukturnya.
P: meleleh 801 °C; tidak menghantar listrik saat padat, menghantar saat leleh; larut dalam air.
Q: meleleh 186 °C (disertai penguraian); tidak menghantar listrik; larut dalam air.
R: meleleh ±1.700 °C; tidak menghantar listrik, padat maupun cair; tidak larut dalam air.
S: meleleh 660 °C; menghantar listrik saat padat; tidak larut dalam air; mengilap.

1. P menghantar hanya saat leleh → ion baru bebas bergerak setelah kisinya runtuh → **ion raksasa** (contoh: NaCl).
2. Q bertitik leleh rendah dan tidak menghantar → **molekul sederhana**; larut dalam air berarti polar atau berikatan hidrogen (contoh: gula pasir).
3. R sangat tinggi titik lelehnya, tidak menghantar, tidak larut → **kovalen raksasa** (contoh: silika).
4. S menghantar saat padat dan mengilap → **logam** (contoh: aluminium).

P ion raksasa, Q molekul sederhana, R kovalen raksasa, S logam. Kuncinya: hantaran listrik saat padat dan saat cair, lalu besarnya titik leleh.

Kimia di sekitarmu



Cicak di dinding

Telapak kaki cicak punya jutaan rambut sangat halus. Masing-masing hanya memberi gaya London yang kecil, tetapi jumlahnya yang luar biasa membuat cicak bisa menempel di dinding, bahkan di kaca.



Air menggelinding di daun talas

Permukaan daun talas berlapis lilin yang nonpolar dan bertonjolan mikro. Molekul air lebih suka saling menarik (kohesi) daripada menempel pada lilin, sehingga air membulat dan menggelinding.



Sumbu lampu teplok

Minyak tanah merambat naik di sela-sela serat sumbu karena kapilaritas: adhesi minyak pada serat menariknya ke atas melawan gravitasi.



Hand sanitizer terasa dingin

Gaya antarmolekul alkohol lebih lemah daripada air, sehingga alkohol cepat menguap. Molekul yang menguap membawa kalor dari kulitmu.



Kabel tembaga, wajan aluminium

Lautan elektron membuat tembaga menghantar listrik dan aluminium cepat meneruskan panas kompor ke masakan.



Pensil dan kaca

Isi pensil adalah grafit yang lapisannya mudah tergelincir. Kaca jendela dibuat dari pasir kuarsa, struktur kovalen raksasa $\mathrm{SiO_2}$.

Cek Cepat

Gaya antarmolekul terkuat di antara molekul-molekul amonia, $\mathrm{NH_3}$, adalah ...

- gaya London
- gaya dipol-dipol
- ikatan hidrogen
- ikatan logam

Padatan X sangat keras, meleleh di atas 1.500 °C, tidak larut dalam air, dan tidak menghantar listrik baik padat maupun cair. X kemungkinan besar adalah ...

- zat berstruktur kovalen raksasa
- logam
- senyawa ion
- zat molekuler sederhana

Mengapa tembaga bisa ditarik menjadi kawat tipis tanpa putus?

- Atom tembaga saling berikatan kovalen yang berarah.
- Ion tembaga bermuatan negatif sehingga saling tolak.
- Tembaga mempunyai titik leleh yang rendah.
- Lapisan ion positif dapat bergeser, sementara lautan elektron tetap merekatkannya.

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: merica yang kabur dan klip yang mengapung

Bahan: mangkuk atau piring cekung, air keran, merica bubuk, sabun cuci piring cair, beberapa klip kertas, selembar tisu, garpu, dan tusuk gigi.

1. Isi mangkuk dengan air dan biarkan tenang. Taburkan sedikit merica merata di permukaan.
2. Celupkan ujung tusuk gigi bersih ke tengah air. Lalu oleskan sedikit sabun pada ujung tusuk gigi dan celupkan lagi. Amati mericanya!
3. Ganti airnya. Letakkan selembar kecil tisu di permukaan air, taruh klip kertas di atasnya, lalu tunggu sampai tisu tenggelam. (Cara lain: turunkan klip perlahan memakai garpu.)
4. Setelah klip mengapung, teteskan satu tetes sabun di tepi mangkuk.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Jangan menghirup merica (bisa membuat bersin dan perih). Jaga agar sabun tidak masuk ke mata; bila terkena, bilas dengan air mengalir. Jangan meminum air percobaan. Lap tumpahan air sabun agar lantai tidak licin, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Mengapa merica langsung "kabur" ke tepi saat sabun menyentuh air? Mengapa klip tenggelam setelah sabun diteteskan? Jelaskan dengan kata "ikatan hidrogen" dan "tegangan permukaan".

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 13 dalam 3 menit

☑️ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **ikatan** (di dalam molekul) dari **gaya antarmolekul** (di antara molekul), lalu menjelaskan gaya London, dipol-dipol, dan ikatan hidrogen
- menentukan gaya antarmolekul terkuat dari struktur molekul dan **meramalkan urutan titik didih**, termasuk anomali $\mathrm{H_2O}$, HF, dan $\mathrm{NH_3}$
- menjelaskan tegangan permukaan, kelarutan, kekentalan, dan **es yang mengapung** pada tingkat partikel
- menjelaskan **ikatan logam** dengan model lautan elektron, sifat-sifat logam, dan mengapa **paduan** (perunggu gamelan, kuningan) lebih keras
- membandingkan **struktur kovalen raksasa** (intan, grafit, grafena, silika) dengan zat molekuler seperti fulerena $\mathrm{C_{60}}$

🔑 Istilah kunci

Gaya antarmolekul · gaya London · gaya dipol-dipol · ikatan hidrogen · gaya van der Waals · dipol sesaat · Ikatan hidrogen · kalor penguapan molar · Viskositas · Tegangan permukaan · Kohesi · adhesi · kapilaritas · Ikatan logam · lautan elektron · Paduan

🧮 Rumus penting

$$T_b \approx 745{,}42\ \log(n + 4{,}4) - 689{,}46$$

Titik didih alkana rantai lurus (perkiraan). Setiap tambahan satu atom C memperpanjang 'sosis' molekul sehingga gaya London bertambah; tambahannya makin lama makin kecil.

$$f = \left(1 - \frac{\rho_{\text{es}}}{\rho_{\text{cair}}}\right) \times 100\%$$

Bagian es yang menyembul. Benda yang mengapung tercelup sebanyak perbandingan massa jenisnya dengan cairan; sisanya menyembul di atas permukaan.

$$Q = n\,\Delta H_{\text{vap}} = \frac{m}{M_r} \times \Delta H_{\text{vap}}$$

Energi untuk menguapkan zat. Energi penguapan = banyaknya mol molekul yang harus dilepas dari gandengannya dikali energi pelepasan per mol.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Saat zat molekuler meleleh atau mendidih, yang diputus hanyalah gaya antarmolekul, bukan ikatan kovalen di dalam molekul.
- Molekul polar tidak selalu mendidih lebih tinggi.
- Ikatan hidrogen bukan ikatan kovalen yang mengandung hidrogen.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=13

Teka-teki untuk Bab 14

Bima memompa ban motornya pagi hari. Siang harinya, setelah motor diparkir di bawah terik matahari, bannya terasa jauh lebih keras, padahal tidak ada udara yang ditambahkan. Di dalam ban, molekul gas hampir tidak saling tarik-menarik. Lalu apa yang sebenarnya dilakukan partikel-partikel gas itu?

▼ **Intip petunjuk**

Dalam gas, molekul berjauhan sehingga gaya antarmolekul hampir bisa diabaikan. Saat dipanaskan, molekul bergerak lebih cepat, lebih sering menabrak dinding ban, dan setiap tabrakannya lebih keras. Tabrakan-tabrakan itulah yang kita rasakan sebagai **tekanan**. Di Bab 14 kamu akan menghitungnya dengan hukum-hukum gas.

BAB 14 · IKATAN & WUJUD ZAT

14 Wujud Gas: Pasukan Partikel yang Tak Pernah Diam

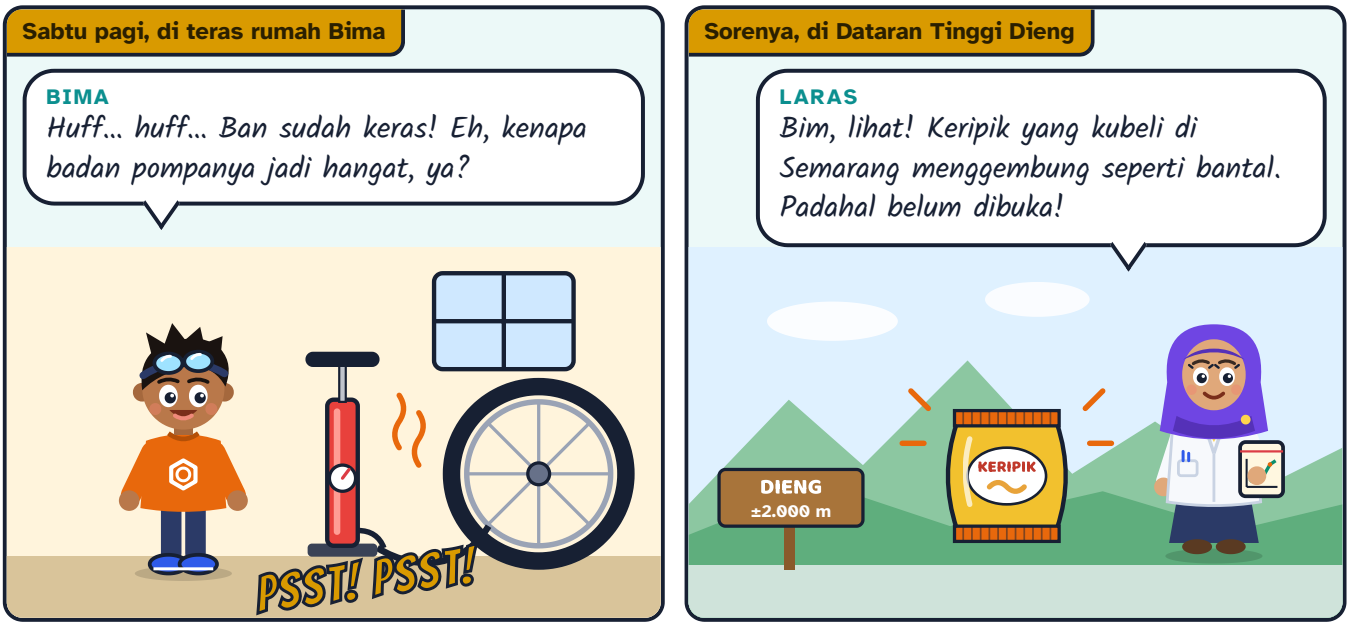
Kemasan keripik menggembung di Dieng, ban motor mengeras di siang terik, dan pompa sepeda terasa hangat. Semuanya ulah miliaran miliar partikel gas yang berlari secepat peluru dan menabrak dinding tanpa henti.

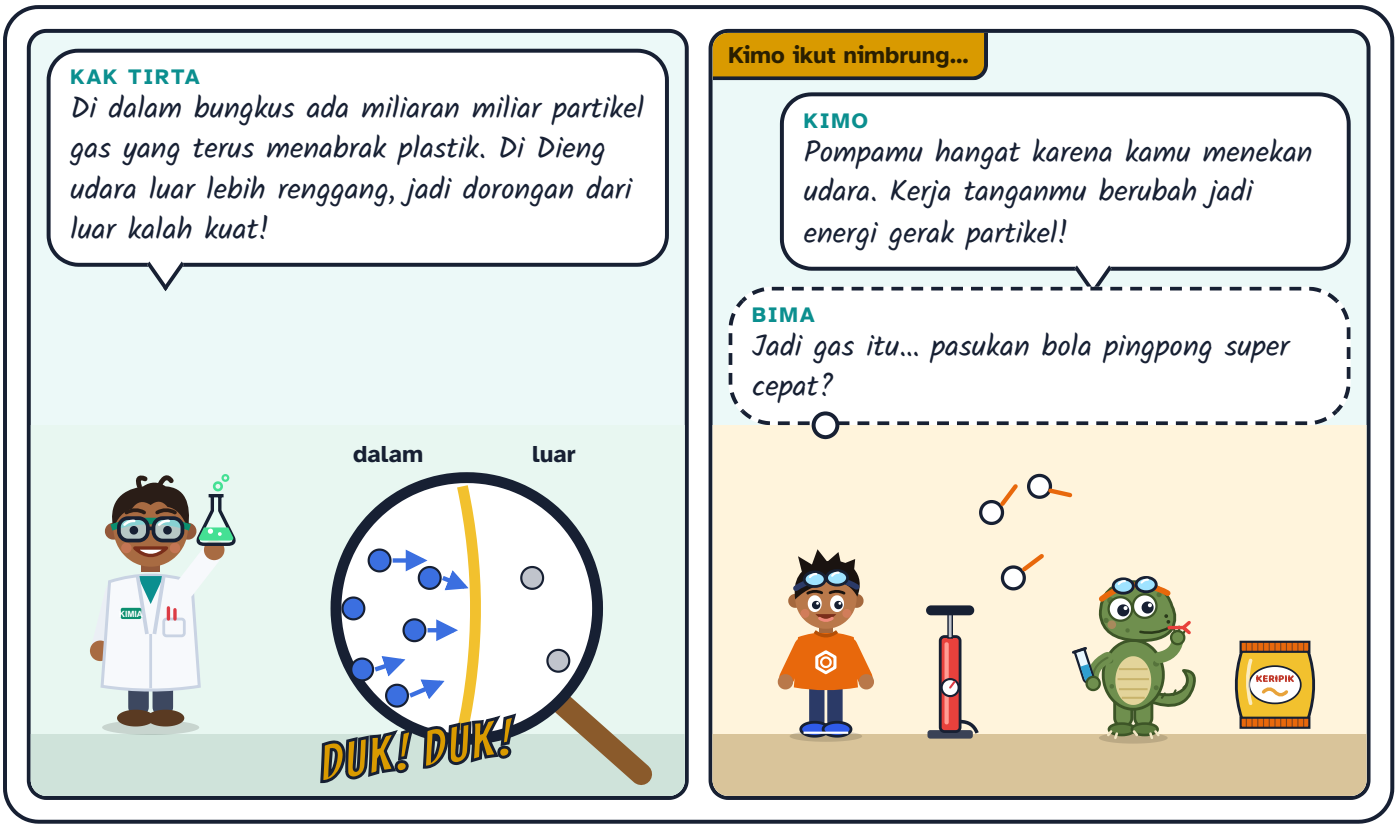
Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **tekanan gas** dengan **teori kinetik** (tumbukan partikel) dan memakai skala **suhu mutlak** (kelvin);
- menerapkan **hukum Boyle**, **Charles**, **Gay-Lussac**, dan hukum gas gabungan pada peristiwa sehari-hari;
- memakai **hukum Avogadro** dan **persamaan gas ideal** $PV = nRT$ untuk menghitung tekanan, volume, M_r, dan massa jenis gas;
- menghitung **tekanan parsial** (hukum Dalton) dan membandingkan laju **efusi** gas (hukum Graham);
- menjelaskan penyimpangan **gas nyata** (van der Waals), **kecepatan rms**, dan **distribusi Maxwell–Boltzmann**.

KERIPIK YANG MENGGEMBUNG

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Balon yang ditiup penuh dimasukkan ke dalam lemari es. Setengah jam kemudian balon tampak lebih kempis. Apa yang terjadi pada partikel udara di dalamnya?

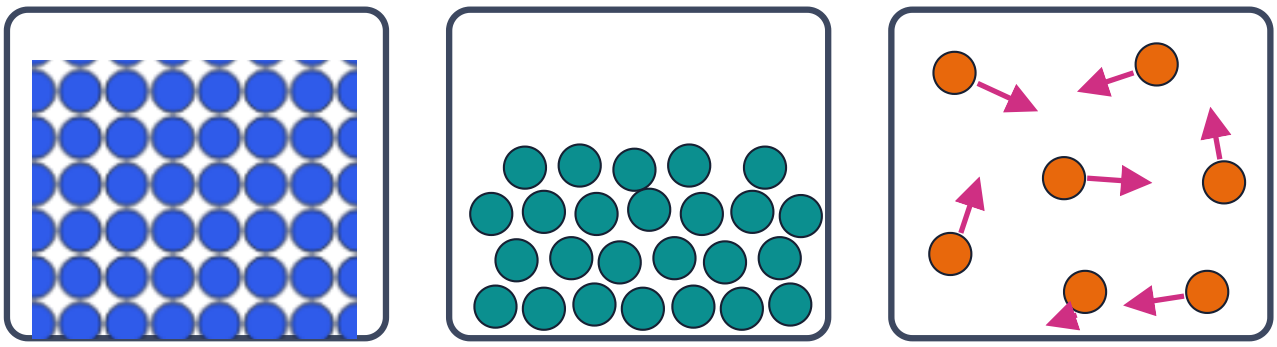
- Setiap partikel udara menyusut menjadi lebih kecil karena dingin.
- Sebagian partikel udara keluar menembus karet karena kedinginan.
- Partikel bergerak lebih lambat, sehingga menumbuk dinding balon lebih jarang dan lebih lemah.
- Udaranya berubah menjadi air karena dingin.

Jawabannya: partikel bergerak lebih lambat. Ukuran partikel tidak berubah. Saat didinginkan, partikel kehilangan energi gerak, sehingga dorongannya pada dinding melemah dan udara luar menekan balon hingga mengecil. Dari 27 °C ke 4 °C, volume udara turun ±8%. Nitrogen dan oksigen baru mencair jauh di bawah −180 °C, jadi tidak ada udara yang menjadi cair di lemari es.

14.1 Tekanan gas: hujan tumbukan yang tak pernah reda

Udara tidak terlihat, tidak berwarna, dan hampir tidak berbau. Namun, saat ini udara menekan setiap sentimeter persegi kulitmu dengan gaya ±10 newton, setara dengan beban 1 kg! Kita tidak merasa tergencet karena cairan dan udara di dalam tubuh menekan balik sama kuatnya.

Bahasa sederhana · Bayangkan sebuah kotak berisi ratusan bola pingpong yang beterbangan tanpa henti. Bola-bola itu terus menabrak dinding kotak: tok, tok, tok! Setiap tabrakan mendorong dinding sedikit. Gas persis seperti itu, hanya saja "bola"-nya sangat kecil, jumlahnya miliaran miliar, dan larinya lebih cepat daripada pesawat jet.



Tiga wujud zat pada tingkat partikel. Pada gas, jarak antarpartikel ±10 kali diameter partikel, sehingga molekulnya hanya mengisi ±0,1% ruang. Sisanya ruang kosong!

Gas berbeda dari zat padat dan cair dalam satu hal penting: **partikelnya sangat berjauhan**. Pada suhu dan tekanan kamar, jarak rata-rata antarmolekul udara sekitar 3 nanometer. Itulah sebabnya gas mudah dimampatkan, mudah bercampur, dan selalu memenuhi seluruh wadahnya. Partikel-partikel itu melesat lurus dengan kelajuan ±500 m/s sampai menabrak partikel lain atau dinding.

DEFINISI · TEKANAN GAS

Tekanan adalah gaya dorong yang bekerja tegak lurus pada setiap satuan luas permukaan:

$$P = \frac{F}{A}$$

Satuan SI-nya **pascal** (Pa), yaitu 1 newton per meter persegi. **Tekanan gas berasal dari tumbukan** partikel-partikel gas dengan dinding wadahnya.

Satuan tekanan	Nilai 1 atm	Sering dipakai di
pascal (Pa)	101.325 Pa	satuan SI, buku sains
kilopascal (kPa)	101,325 kPa	ramalan cuaca, soal sekolah
bar	1,01325 bar (1 bar = 100 kPa)	tabung gas, penyelaman, IUPAC
milimeter raksa (mmHg) = torr	760 mmHg	barometer, tensimeter tekanan darah

psi (pon per inci persegi)	±14,7 psi	pengukur tekanan ban di bengkel

ATURAN · TEORI KINETIK GAS (MODEL GAS IDEAL)

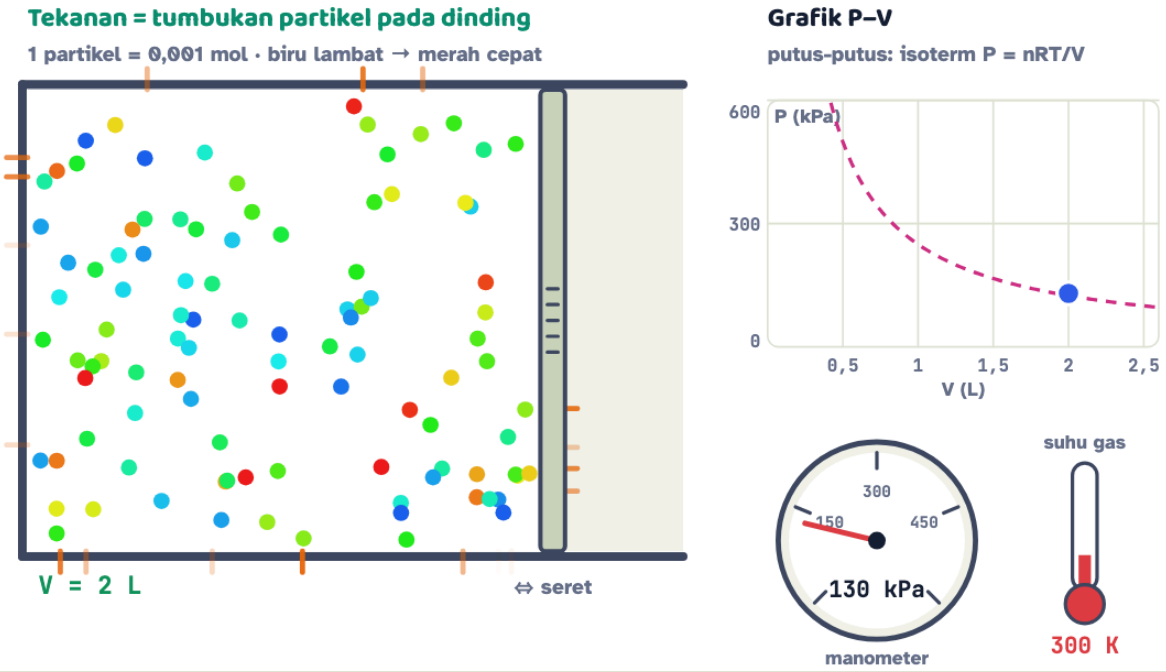
1. Gas terdiri atas partikel-partikel yang **sangat kecil dibandingkan jaraknya**, sehingga volume partikel itu sendiri dapat diabaikan.
2. Partikel bergerak **lurus, acak, dan terus-menerus** ke segala arah.
3. Tumbukan antarpartikel dan dengan dinding bersifat **lenting sempurna** (tidak ada energi yang hilang).
4. Di antara tumbukan, **tidak ada gaya tarik-menarik atau tolak-menolak** antarpartikel.
5. Energi kinetik rata-rata partikel **sebanding dengan suhu mutlak**: $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$.

Ayo buktikan sendiri bahwa tekanan memang lahir dari tumbukan. Di Lab Mini berikut, tekanan **tidak** dihitung dari rumus: komputer menjumlahkan dorongan setiap partikel yang menabrak dinding, lalu membandingkannya dengan rumus gas ideal.

LAB MINI

Kotak Gas: tekanan dari tumbukan

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-14

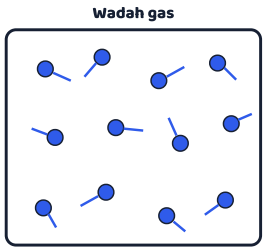


P dari tumbukan	P = nRT/V	Suhu gas	Jumlah gas	P × V
130,2 kPa	124,7 kPa	300 K	0,1 mol	260,4 kPa·L

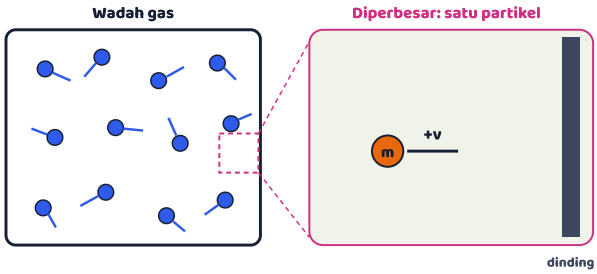
v_rms nyata
517 m/s

Coba: (1) Biarkan suhu tetap, seret piston ke kiri. Apa yang terjadi pada tekanan? Tekan 📌 **Catat titik P–V** di beberapa posisi. (2) Naikkan suhu: partikel memerah dan melaju lebih cepat. (3) Ganti nitrogen dengan helium pada suhu yang sama: partikelnya jauh lebih cepat, tetapi apakah tekanannya berubah? (4) Nyalakan **Pompa cepat**, lalu dorong piston dengan cepat: suhu gas naik, persis seperti pompa sepeda Bima!

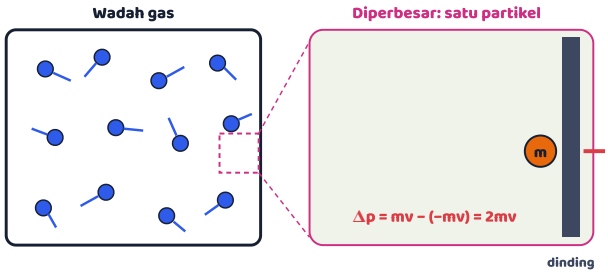
Mengapa satu tumbukan kecil bisa menghasilkan tekanan yang terasa? Ikuti animasi berikut langkah demi langkah.



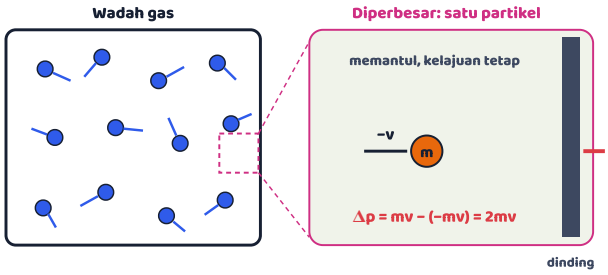
Langkah 1. Gas di dalam wadah: partikel-partikel bergerak lurus, acak, ke segala arah, dengan kelajuan yang berbeda-beda. Di antara partikel ada banyak ruang kosong.



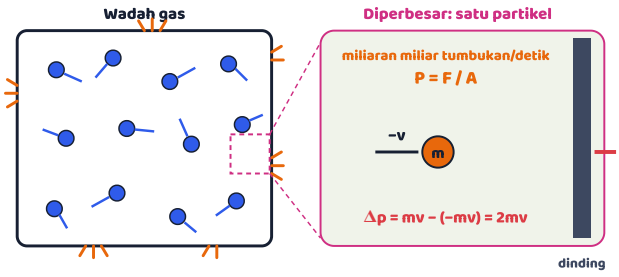
Langkah 2. Kita perbesar satu partikel bermassa m yang melaju ke kanan dengan kecepatan $+v$ menuju dinding.



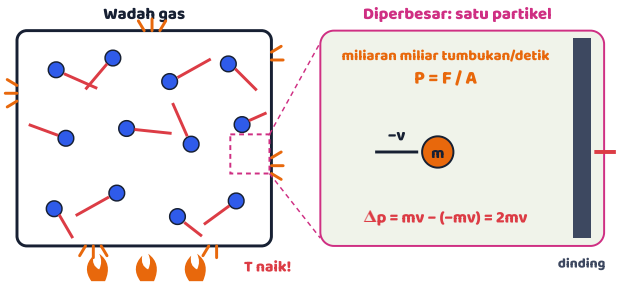
Langkah 3. Partikel menumbuk dinding. Momentumnya berubah dari $+mv$ menjadi $-mv$, jadi perubahannya $\Delta p = 2mv$. Perubahan momentum itu berarti dinding **didorong** ke luar.



Langkah 4. Tumbukannya lenting sempurna: partikel memantul dengan kelajuan yang sama tanpa kehilangan energi, lalu melesat lagi.



Langkah 5. Udara pada 1 atm menumbuk setiap cm² dinding ±3 × 10²³ kali per detik. Dorongan kecil yang sangat banyak itu menjadi gaya rata-rata F, dan tekanannya $P = F/A$.



Langkah 6. Bila gas dipanaskan, partikel melaju lebih cepat: tumbukan menjadi lebih **sering** dan lebih **keras**, sehingga tekanan naik. Itulah yang terjadi di dalam ban motor pada siang terik.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Partikel gas tidak memuai saat dipanaskan dan tidak menyusut saat didinginkan. Ukuran setiap molekul N_2 atau O_2 tetap sama. Yang berubah adalah **kelajuan** partikel dan **jarak rata-rata** antarpartikel. Saat gambar partikelmu untuk gas panas, gambarlah partikel yang sama besar dengan panah yang lebih panjang, bukan bola yang lebih besar.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DARI TUMBUKAN KE RUMUS: $PV = \frac{1}{3}NM\overline{V^2}$

Ambil kubus bersisi L berisi N partikel bermassa m. Satu partikel dengan komponen kecepatan v_x memberi impuls $2mv_x$ pada dinding kanan setiap kali menabraknya, dan kembali lagi setelah menempuh $2L$, yaitu setiap $2L/v_x$ detik. Gaya rata-ratanya $\dfrac{2mv_x}{2L/v_x} = \dfrac{mv_x^2}{L}$.

Jumlahkan untuk N partikel dan bagi dengan luas L^2: $P = \dfrac{Nm\overline{v_x^2}}{L^3}$. Karena gerakannya acak, $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$, sehingga

$$PV = \tfrac{1}{3}Nm\overline{v^2} = \tfrac{2}{3}N\,\overline{E_k}$$

Bandingkan dengan hasil percobaan $PV = NkT$ (dengan $k = R/N_A = 1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K, tetapan Boltzmann). Hasilnya mengejutkan: $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$. **Suhu ternyata adalah ukuran energi kinetik rata-rata partikel**, dan tidak bergantung pada jenis gasnya!

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1643, **Evangelista Torricelli** dari Italia mengisi tabung kaca dengan raksa lalu membaliknya ke dalam mangkuk raksa. Kolom raksa turun dan berhenti pada tinggi ±76 cm: udara di luar menopangnya! Itulah barometer pertama, dan asal satuan 760 mmHg. Lima tahun kemudian, atas saran **Blaise Pascal**, barometer dibawa mendaki gunung Puy de Dôme di Prancis. Di puncak, kolom raksanya lebih pendek. Udara di atas kepala kita ternyata punya berat, dan beratnya berkurang makin tinggi kita mendaki.

KIMIA NUSANTARA · NAIK GUNUNG, TEKANAN TURUN

Makin tinggi tempatnya, makin sedikit udara di atas kepala, makin kecil tekanannya. Karena tekanan turun, air pun mendidih pada suhu lebih rendah. Pantas saja mi rebus di puncak gunung lama sekali empuknya!

Tempat	Ketinggian	Tekanan udara	Titik didih air
Pantai Parangtritis	±0 m	±101 kPa (1,00 atm)	100 °C
Kota Bandung	±770 m	±92 kPa (0,91 atm)	±97 °C
Dataran Tinggi Dieng	±2.000 m	±79 kPa (0,78 atm)	±93 °C
Bibir kawah Bromo	±2.300 m	±76 kPa (0,75 atm)	±92 °C
Puncak Jaya, Papua	4.884 m	±55 kPa (0,54 atm)	±83 °C

Nilai dihitung dengan model atmosfer standar; angka harian sedikit berubah mengikuti cuaca.

MITOS

"Gas itu tidak punya massa."

FAKTA

Satu liter udara bermassa ±1,2 g. Tabung LPG 3 kg yang penuh lebih berat ±3 kg daripada tabung kosong, dan ban yang dipompa sedikit lebih berat daripada ban kempis.

MITOS

"Saat dipanaskan, partikel gas membesar."

FAKTA

Ukuran partikel tetap. Partikel bergerak lebih cepat; bila wadahnya bisa mengembang, **jarak** antarpartikel yang membesar.

MITOS

"Pada 0 °C partikel gas berhenti bergerak."

FAKTA

0 °C hanyalah titik beku air (273,15 K). Gerak partikel baru paling minimum pada nol mutlak, 0 K = −273,15 °C, yang tidak pernah benar-benar tercapai.

MITOS

"Udara panas naik karena panas itu ringan."

FAKTA

Panas bukan zat dan tidak bermassa. Udara panas memuai sehingga massa jenisnya lebih kecil, lalu didorong ke atas oleh udara dingin yang lebih rapat.

14.2 Hukum Boyle: ditekan, gas melawan

Ambil spuit (alat suntik) **tanpa jarum**, tarik penghisapnya, lalu tutup ujungnya dengan jari. Sekarang tekan penghisapnya. Makin jauh ditekan, makin kuat udara di dalamnya melawan. Lepaskan, dan penghisap meloncat kembali seperti pegas!

Pada tingkat partikel, jumlah partikel udara di dalam spuit tidak berubah. Namun, ruangnya menyempit, sehingga partikel lebih berdesakan. Setiap detik lebih banyak partikel menumbuk setiap cm^2 dinding. Karena suhunya tetap, kelajuan partikel tetap, tetapi **frekuensi tumbukannya** naik. Hasilnya: tekanan naik.

Bahasa sederhana · Coba bayangkan sepuluh anak bermain kejar-kejaran di lapangan basket. Mereka jarang menabrak pagar. Sekarang pindahkan kesepuluh anak itu ke kamar kecil. Mereka akan sangat sering menabrak tembok! Ruang yang sempit membuat tabrakan lebih sering. Begitulah gas yang ditekan.

HUKUM BOYLE (1662)

Untuk sejumlah gas tertentu pada **suhu tetap**, tekanan berbanding terbalik dengan volumenya:

$$P \propto \frac{1}{V} \quad \Longleftrightarrow \quad PV = \text{tetap} \quad \Longleftrightarrow \quad P_1V_1 = P_2V_2$$

Volume menjadi setengahnya, tekanan menjadi dua kali lipat. Volume menjadi sepertiganya, tekanan menjadi tiga kali lipat.

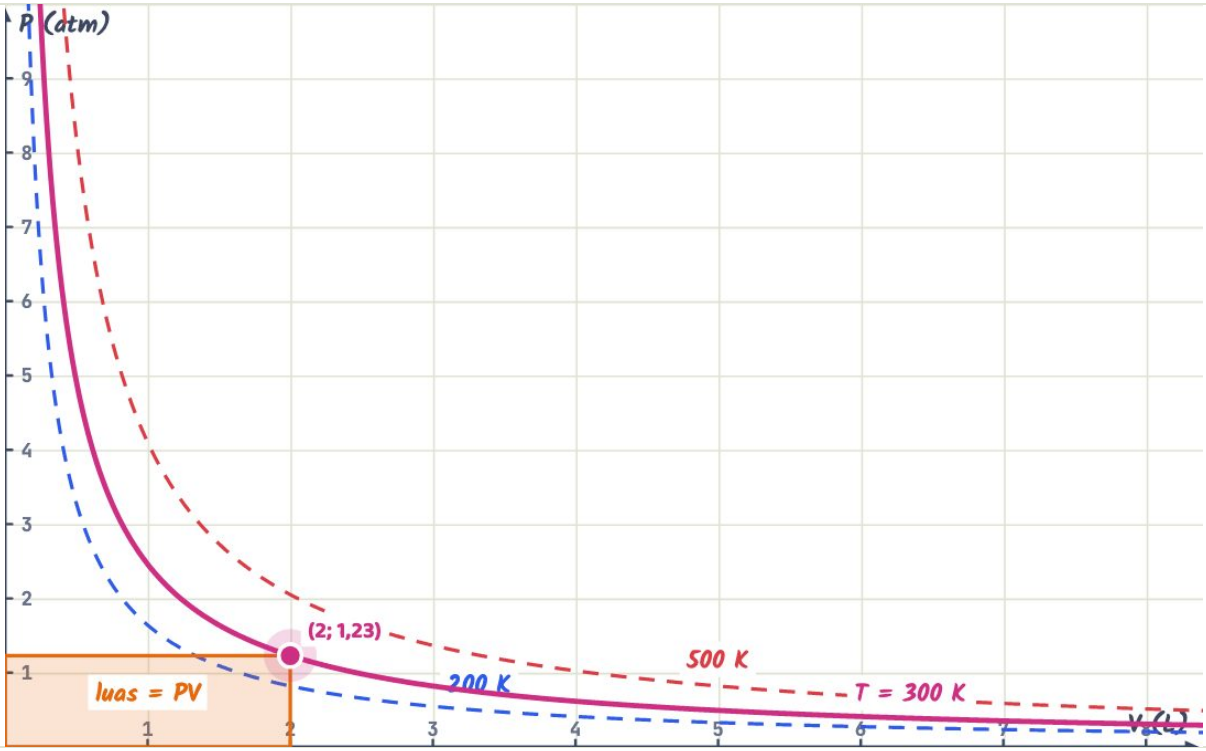
GRAFIK HIDUP

Isoterm Boyle: luas P × V tidak pernah berubah

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-14

$$P = \frac{nRT}{V} \qquad (n = 0{,}10\ \text{mol})$$

$$P = 1{,}23\ \text{atm}, \quad PV = 2{,}46\ \text{L} \cdot \text{atm}$$



P	P	P × V
1,23 atm	124,7 kPa	2,462 L·atm

Seret titik magenta di sepanjang kurva. Perhatikan persegi panjang oranye: bentuknya berubah dari kurus-tinggi menjadi lebar-pendek, tetapi luasnya ($P \times V$) tidak berubah. Lalu naikkan suhu: seluruh isoterm terangkat, karena gas yang lebih panas menekan lebih kuat.

CONTOH **Spuit yang ditekan**

Udara di dalam spuit tertutup bervolume 60 mL pada tekanan 100 kPa. Penghisap ditekan perlahan (suhu tetap) sampai volumenya 20 mL. Berapa tekanannya sekarang?

1. Suhu dan jumlah udara tetap, jadi berlaku hukum Boyle: $P_1V_1 = P_2V_2$.
2. $P_2 = \dfrac{P_1V_1}{V_2} = \dfrac{100\ \text{kPa} \times 60\ \text{mL}}{20\ \text{mL}} = 300\ \text{kPa}.$

Tekanannya 300 kPa, tiga kali semula, karena volumenya tinggal sepertiga. Satuan volume tidak perlu diubah ke liter selama kedua ruas memakai satuan yang sama.

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

Setiap soal hukum gas, buat tabel kecil dua baris: **keadaan 1** dan **keadaan 2**, dengan kolom P, V, n, T. Coret besaran yang tetap; sisanya langsung menunjukkan hukum mana yang dipakai. Satu aturan emas: **suhu selalu dalam kelvin**. Satuan tekanan dan volume bebas, asal sama di kedua keadaan.

ADU CEPAT **Adu Cepat Boyle: tekan & regang**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-14

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$P_1V_1 = P_2V_2$, jadi $P_2 = P_1 \times V_1 \div V_2$. Volume jadi sepertiganya → tekanan jadi tiga kali.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1662, **Robert Boyle** dan asistennya, **Robert Hooke**, menuang raksa ke dalam tabung kaca berbentuk huruf J yang ujung pendeknya tertutup. Setiap kali raksa ditambah, udara yang terkurung di ujung tabung makin mampat. Boyle mencatat panjang kolom udara dan tinggi raksa, lalu menemukan bahwa hasil kali keduanya hampir selalu sama. Di Prancis, hukum yang sama ditemukan sendiri oleh Edme Mariotte pada 1676, sehingga di sana disebut hukum Mariotte.

14.3 Hukum Charles & Gay-Lussac: panas, gas memuai

Pasang balon kempis di mulut botol kosong, lalu celupkan botol ke air hangat. Perlahan balon berdiri dan menggembung! Pindahkan ke air es, balon lunglai lagi. Udara di dalam botol memuai saat dipanaskan dan menyusut saat didinginkan.

Partikel yang dipanaskan bergerak lebih cepat dan menumbuk dinding lebih keras. Bila dindingnya lentur (balon), dorongan ekstra itu mendorong dinding keluar sampai tekanan di dalam kembali sama dengan tekanan luar. Bila dindingnya kaku (ban motor, tabung LPG), volume tidak bisa bertambah, sehingga **tekanannya** yang naik.

HUKUM CHARLES & HUKUM GAY-LUSSAC

Charles (tekanan dan jumlah gas tetap): volume sebanding dengan suhu mutlak,

$$V \propto T \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Gay-Lussac (volume dan jumlah gas tetap): tekanan sebanding dengan suhu mutlak,

$$P \propto T \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Kata kuncinya **suhu mutlak**. Bila volume beberapa sampel gas diukur pada berbagai suhu lalu digambar, kita mendapat garis-garis lurus. Perpanjang garis-garis itu ke kiri (ekstrapolasi), dan semuanya bertemu di satu titik: **–273,15 °C**. Pada suhu itu volume gas ideal akan menjadi nol. Tidak ada yang lebih dingin lagi!

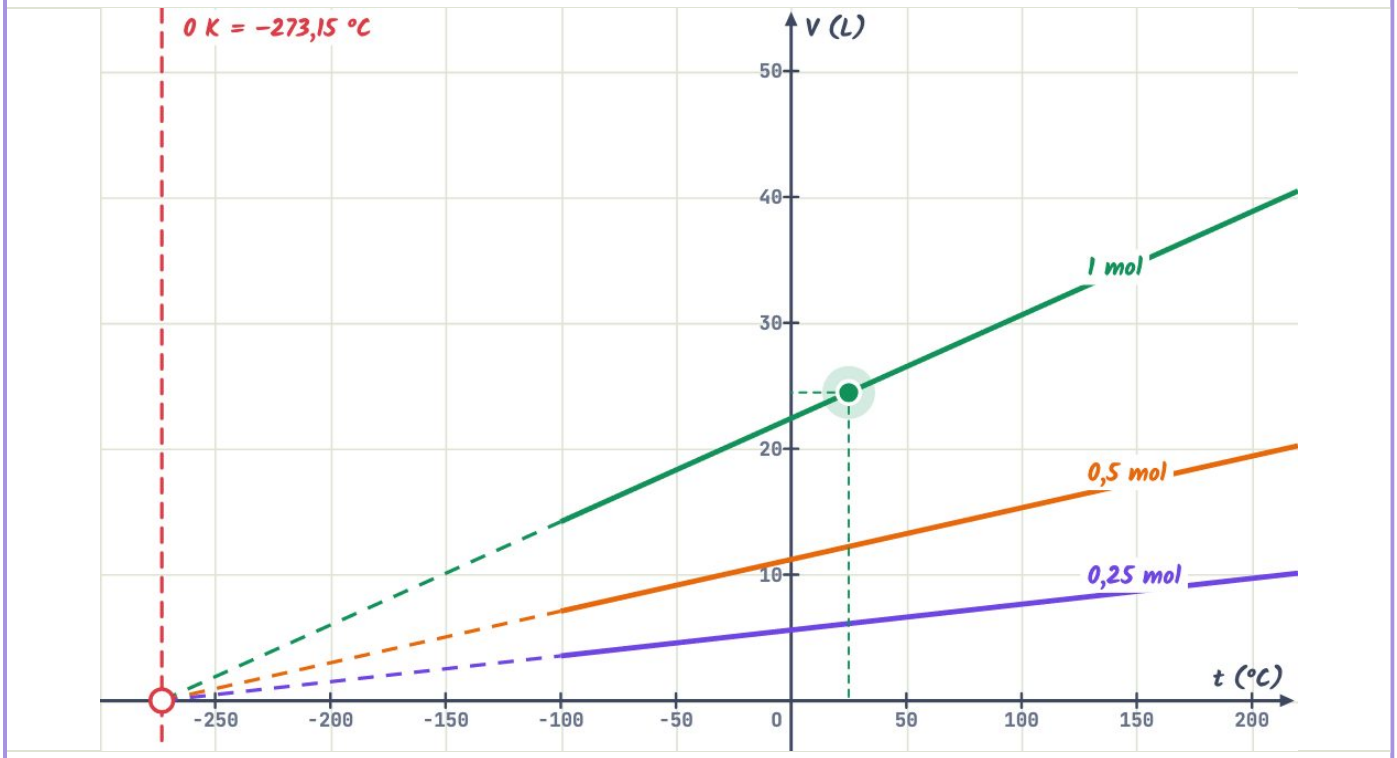
GRAFIK HIDUP

Garis Charles: semua jalan menuju −273,15 °C

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-14

$$V = \frac{nR}{P}\,(t + 273{,}15)$$

$$T = 298{,}15\ \mathrm{K} \;\Rightarrow\; V_{1\,\mathrm{mol}} = 24{,}47\ \mathrm{L}$$



25 °C dan 1 atm: 1 mol ≈ 24,5 L

T	V (1 mol)	V/T
298,15 K	24,47 L	0,0821 L/K

Seret titik hijau. Berapa pun jumlah gasnya dan berapa pun tekanannya (geser slider P), semua garis bertemu di titik merah −273,15 °C. Perhatikan pembacaan V/T: nilainya tetap selama P tidak diubah. Itulah hukum Charles.

DEFINISI · SUHU MUTLAK (KELVIN)

Skala **kelvin** dimulai dari **nol mutlak**, suhu terendah yang mungkin, yaitu −273,15 °C. Besar satu kelvin sama dengan satu derajat Celsius, sehingga

$$T\,(\mathrm{K}) = t\,(^{\circ}\mathrm{C}) + 273{,}15$$

Suhu mutlak tidak pernah negatif dan selalu ditulis tanpa tanda derajat: 300 K, bukan 300 °K.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Hukum Charles dan Gay-Lussac hanya berlaku untuk suhu dalam **kelvin**. Memanaskan gas dari 20 °C ke 40 °C **tidak** menggandakan volumenya: dalam kelvin suhunya naik dari 293 K ke 313 K, jadi volumenya hanya naik ±7%. Kalau memakai °C, gas pada −10 °C akan bervolume negatif. Mustahil!

Hukum Boyle, Charles, dan Gay-Lussac dapat dirangkum menjadi satu hukum untuk sejumlah gas yang sama. Rumus Hidup berikut memakainya untuk kemasan keripik yang dibawa dari pesisir naik ke pegunungan:

☆ **HUKUM GAS GABUNGAN**

Untuk jumlah gas tetap:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Bila T tetap, rumus ini menjadi hukum Boyle; bila P tetap, menjadi hukum Charles; bila V tetap, menjadi hukum Gay-Lussac.

RUMUS HIDUP **Hukum gas gabungan: kemasan keripik naik gunung**

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Untuk sejumlah gas yang sama, P kali V dibagi T selalu bernilai sama, ke mana pun gas itu dibawa.

P_1 Tekanan awal kPa

V_1 Volume awal mL

t_1 Suhu awal °C

P_2 Tekanan akhir kPa

t_2 Suhu akhir °C

V_2 Volume akhir mL

VOLUME AKHIR

363

mL

kemasan menggembung tegang

Volume menjadi **1,211** kali semula (T_1 = **304,15** K, T_2 = **288,15** K).

Cek satuan: kPa × mL ÷ K × K ÷ kPa = mL ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-GAS-GABUNGAN-KERIPIK

KERJAKAN BERSAMA

Ban motor di siang terik

Pagi hari (27 °C), manometer bengkel menunjukkan tekanan ban motor 200 kPa. Siangnya, setelah dipakai di jalan beraspal panas, udara di dalam ban bersuhu 47 °C. Volume ban dianggap tetap. Berapa angka yang akan ditunjukkan manometer?

1. Jebakan penting: manometer ban menunjukkan tekanan **di atas tekanan udara luar** (tekanan relatif). Tekanan mutlaknya $200 + 101 = 301$ kPa.
2. Ubah suhu ke kelvin: $T_1 = 300$ K, $T_2 = 320$ K.
3. Volume tetap → hukum Gay-Lussac: $P_2 = P_1 \times \frac{T_2}{T_1} = 301 \times \frac{320}{300} = 321$ kPa (mutlak).
4. Kembali ke bacaan manometer: $321 - 101 = 220$ kPa.

Manometer menunjukkan ±220 kPa, naik ±10%. Karena itu tekanan ban sebaiknya diperiksa pagi hari saat ban masih dingin. (Kalau lupa mengubah ke tekanan mutlak, hasilnya keliru menjadi 213 kPa.)

TAMU DARI MASA LALU

Pada Desember 1783, fisikawan Prancis **Jacques Charles** terbang dengan balon berisi gas hidrogen di atas kota Paris. Sekitar 1787 ia menemukan bahwa berbagai gas memuai dengan jumlah yang sama untuk setiap kenaikan suhu, tetapi tidak menerbitkannya. **Joseph Louis Gay-Lussac** menerbitkan pengukuran yang lebih teliti pada 1802 dan dengan jujur menyebut temuan Charles. Gay-Lussac juga pemberani: pada 1804 ia naik balon sampai ketinggian ±7.000 m untuk mengambil sampel udara! Lalu pada 1848, **William Thomson** (kelak Lord Kelvin) mengusulkan skala suhu mutlak yang kini memakai namanya.

KIMIA NUSANTARA · BALON UDARA SYAWALAN WONOSOBO

Setiap musim Lebaran, warga Wonosobo dan Pekalongan punya tradisi balon udara raksasa dari kertas. Udara di dalam balon dipanaskan hingga ±100 °C. Menurut hukum Charles, udara itu memuai ±24% (dari ±300 K menjadi ±373 K), sehingga sebagian udara keluar lewat mulut balon. Setiap meter kubik udara panas jadi ±0,23 kg lebih ringan daripada udara sekitar, dan balon pun terangkat. Kini balon-balon itu diterbangkan dengan **ditambatkan tali** dalam festival resmi, karena balon yang lepas bebas dapat membahayakan pesawat terbang.

14.4 Hukum Avogadro & persamaan gas ideal

Tebak Dulu!

Dua balon ditiup sama besar pada suhu dan tekanan yang sama. Balon A berisi helium, balon B berisi karbon dioksida (satu molekulnya 11 kali lebih berat). Balon mana yang berisi lebih banyak molekul?

Balon A, karena molekul helium kecil sehingga muat lebih banyak.

Balon B, karena karbon dioksida lebih berat.

Sama banyak.

Tidak bisa ditentukan tanpa menimbang kedua balon.

Jawabannya: sama banyak. Partikel gas sangat berjauhan, jadi ukuran partikelnya hampir tidak berpengaruh pada volume. Yang menentukan volume hanyalah *berapa banyak* partikelnya. Massanya yang berbeda: balon B ±11 kali lebih berat isinya (44 berbanding 4).

HUKUM AVOGADRO (1811)

Pada suhu dan tekanan yang sama, gas-gas bervolume sama mengandung jumlah partikel yang sama. Jadi, pada P dan T tetap, $V \propto n$:

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$$

Akibatnya, satu mol gas apa pun menempati volume yang sama: **volume molar** 22,4 L pada 0 °C dan 1 atm (STP) atau ±24,5 L pada 25 °C dan 1 atm.

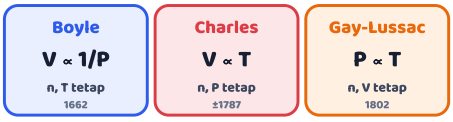
Sekarang kita punya empat hukum yang masing-masing hanya berlaku bila dua besaran dibuat tetap. Ilmuwan senang menyederhanakan. Bisakah keempatnya dilebur menjadi satu?



Langkah 1. Hukum Boyle (1662): pada n dan T tetap, volume berbanding terbalik dengan tekanan, $V \propto 1/P$.



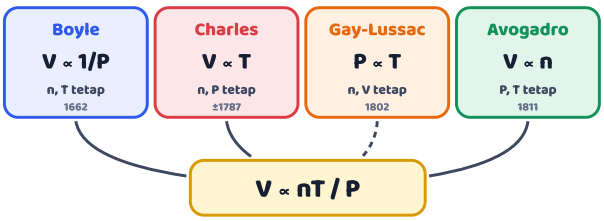
Langkah 2. Hukum Charles (±1787): pada n dan P tetap, volume sebanding dengan suhu mutlak, $V \propto T$.



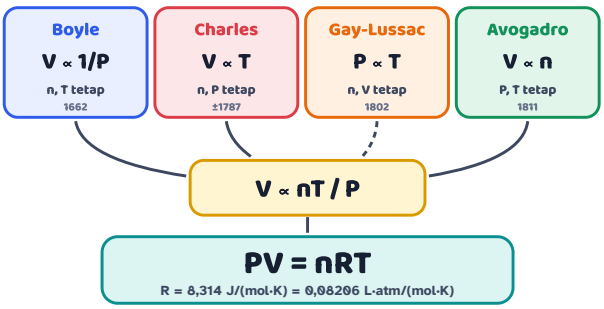
Langkah 3. Hukum Gay-Lussac (1802): pada n dan V tetap, tekanan sebanding dengan suhu mutlak, $P \propto T$.



Langkah 4. Hukum Avogadro (1811): pada P dan T tetap, volume sebanding dengan jumlah mol, $V \propto n$.



Langkah 5. Gabungkan: $V \propto \dfrac{nT}{P}$. Hukum Gay-Lussac (panah putus-putus) sudah ikut terkandung: bila V tetap, $P \propto T$.



Langkah 6. Ganti tanda sebanding dengan sebuah tetapan R: $V = R\dfrac{nT}{P}$, atau $PV = nRT$. Inilah **persamaan gas ideal**.

PERSAMAAN GAS IDEAL

$$PV = nRT$$

P tekanan, V volume, n jumlah mol, T suhu mutlak (K), dan R **tetapan gas** universal. Nilai R bergantung pada satuan yang dipakai:

Nilai R	Pasangan satuan P dan V
8,314 J/(mol·K)	Pa dan m^3 (SI)
8,314 kPa·L/(mol·K)	kPa dan L (karena 1 kPa·L = 1 J)
0,08206 L·atm/(mol·K)	atm dan L (sering dibulatkan 0,082)
62,36 L·mmHg/(mol·K)	mmHg dan L

JEMBATAN KELEDAI DARI KIMO

"**P**ak **V**ino **n**aik **R**akit **T**ua": $PV = nRT$. Lalu, sebelum menghitung, Kimo selalu bertanya tiga hal: apakah suhunya sudah kelvin? apakah satuan P dan V cocok dengan R? apakah mililiter sudah diubah ke liter?

RUMUS HIDUP

Gas ideal: berapa tekanannya?

$$P = \frac{n\,R\,T}{V}$$

Tekanan gas sebanding dengan banyaknya partikel dan suhunya, tetapi berbanding terbalik dengan volume wadahnya.

- n Jumlah gas `mol`
- T Suhu mutlak `K`
- V Volume wadah `L`
- P Tekanan gas `kPa`

TEKANAN GAS

101,3

kPa

≈ 1 atm, seperti udara di tepi pantai

1 mol gas pada **273** K dalam wadah **22,4** L menekan dinding dengan **101,3** kPa = **1** atm.

Cek satuan: kPa·L/(mol·K) × mol × K ÷ L = kPa ✔ (1 J = 1 kPa·L, jadi R = 8,314 kPa·L/(mol·K))

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-GAS-IDEAL-TEKANAN

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Kesalahan paling sering pada $PV = nRT$ adalah satuan yang tidak cocok dengan R. Dengan $R = 0{,}08206$, tekanan harus atm dan volume harus liter. Dengan $R = 8{,}314$ J/(mol·K), pakai Pa dan m³ (1 L = 10^{-3} m³, 1 mL = 10^{-6} m³), atau kPa dan L. Dan jangan pernah memasukkan suhu dalam °C!

KERJAKAN BERSAMA **Menebak gas di dalam korek gas**

Laras mengalirkan gas dari korek gas ke dalam gelas ukur terbalik berisi air. Hasilnya: 0,985 g gas menempati 0,420 L pada 25 °C dan 100 kPa. Hitung massa molarnya dan tebak gasnya.

1. Ubah suhu: $T = 25 + 273{,}15 = 298{,}15$ K. Pakai $R = 8{,}314$ kPa·L/(mol·K) karena P dalam kPa dan V dalam L.
2. $n = \dfrac{PV}{RT} = \dfrac{100 \times 0{,}420}{8{,}314 \times 298{,}15} = 0{,}01694$ mol.
3. $M = \dfrac{m}{n} = \dfrac{0{,}985}{0{,}01694} = 58{,}1$ g/mol.

$M \approx 58$ g/mol, cocok dengan butana, $\mathrm{C_4H_{10}}$ ($4 \times 12 + 10 \times 1 = 58$). Butana memang bahan bakar korek gas. (Dalam percobaan sungguhan, tekanan uap air juga harus dikurangkan; lihat hukum Dalton di 14.5.)

Persamaan gas ideal juga memberi **massa jenis gas**. Ganti $n = m/M$, lalu susun ulang:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT}$$

Pada 25 °C dan 1 atm, massa jenis udara ($M \approx 29$) ±1,18 g/L, helium ($M = 4$) hanya ±0,16 g/L, sedangkan karbon dioksida ($M = 44$) ±1,80 g/L. Itulah sebabnya balon helium melayang, sedangkan $\mathrm{CO_2}$ cenderung mengalir ke tempat rendah seperti air.

KIMIA NUSANTARA · GAS BERAT DI KAWAH SINILA, DIENG

Kawasan vulkanik Dieng mengeluarkan gas karbon dioksida dari celah-celah tanah. Karena $\mathrm{CO_2}$ ±1,5 kali lebih rapat daripada udara, gas itu bisa mengalir menuruni lereng dan berkumpul di cekungan tanpa terlihat dan tanpa bau. Pada Februari 1979, gas dari Kawah Sinila merenggut 149 jiwa warga yang mengungsi. Sejak itu, kadar gas di sekitar kawah-kawah Dieng dipantau, dan pengunjung diminta mematuhi rambu serta tidak masuk ke cekungan yang dilarang.

ADU CEPAT **Adu Cepat gas ideal (R = 0,082)**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-14

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

P = nRT ÷ V. Contoh: 1 mol, 300 K, 24,6 L → P = 1 × 0,082 × 300 ÷ 24,6 = 1 atm.

14.5 Hukum Dalton & Graham: campuran gas dan gas yang kabur

Udara bukan satu gas, melainkan campuran. Setiap gas di dalamnya bergerak seolah-olah gas lain tidak ada, dan setiap gas ikut menumbuk dinding. Tekanan yang disumbangkan satu gas disebut **tekanan parsial**.

HUKUM DALTON TENTANG TEKANAN PARSIAL (1801)

Tekanan total campuran gas yang tidak bereaksi sama dengan jumlah tekanan parsial setiap gas:

$$P_{\text{total}} = p_A + p_B + p_C + \dots \qquad p_A = x_A\,P_{\text{total}}$$

dengan $x_A = n_A / n_{\text{total}}$ adalah **fraksi mol** gas A.

Gas dalam udara kering	% mol (≈ % volume)	Tekanan parsial di pantai (101,3 kPa)	di Puncak Jaya (±55 kPa)
nitrogen, N_2	78,08	79,1 kPa	42,9 kPa
oksigen, O_2	20,95	21,2 kPa	11,5 kPa
argon, Ar	0,93	0,94 kPa	0,51 kPa
karbon dioksida, CO_2	±0,04	±0,04 kPa	±0,02 kPa

Perhatikan kolom terakhir. Di puncak gunung, persentase oksigen tetap 21%, tetapi tekanan parsialnya tinggal separuh. Paru-paru kita menyerap oksigen berdasarkan tekanan parsialnya, sehingga pendaki bisa terserang sakit ketinggian: pusing, mual, dan sesak napas.

RUMUS HIDUP

Tekanan parsial oksigen penyelam

$$p_{O_2} = \frac{\%O_2}{100} \times \left(1 + \frac{h}{10}\right)$$

Setiap turun 10 m di laut, tekanan bertambah ±1 atm, dan bagian oksigen dari tekanan itu ikut naik.

- h Kedalaman m
- $\%O_2$ Kadar oksigen di tabung %
- p_{O_2} Tekanan parsial O_2 atm

TEKANAN PARSIAL O_2

0,59

atm

✅ **oksigen dalam rentang aman**

Tekanan total **2,8** atm; tekanan parsial N_2 **±2,212** atm.

Cek satuan: (% ÷ 100) × atm = atm ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PENYELAM-PO2

ID

KIMIA NUSANTARA · MENYELAM DI RAJA AMPAT

Raja Ampat di Papua Barat Daya terkenal di seluruh dunia karena terumbu karangnya. Penyelam di sana membawa tabung berisi udara yang dimampatkan sampai ±200 bar (hukum Boyle: ±12 L tabung menyimpan ±2.400 L udara!). Pada kedalaman 30 m, tekanan total ±4 atm, sehingga tekanan parsial nitrogen naik menjadi ±3,2 atm. Nitrogen bertekanan tinggi itu membuat sebagian penyelam merasa "mabuk" (narkosis nitrogen). Penyelam yang memakai nitroks (udara kaya oksigen) harus menghitung kedalaman maksimumnya dengan hukum Dalton supaya tekanan parsial oksigen tidak melewati 1,4 atm.

⚠

KESELAMATAN

Penyelam dengan tabung (scuba) tidak boleh menahan napas saat naik ke permukaan. Menurut hukum Boyle, 2 L udara di paru-paru pada kedalaman 20 m (±3 atm) akan memuai menjadi ±6 L di permukaan dan dapat merobek paru-paru. Selalu bernapas normal, naik perlahan, dan menyelamlah hanya bersama pemandu bersertifikat.

COBA SENDIRI **Mengumpulkan oksigen di atas air**

Laras menguraikan larutan hidrogen peroksida dengan ragi: $2\,H_2O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + O_2$. Gas oksigen dikumpulkan di atas air dalam gelas ukur terbalik: 250 mL pada 25 °C, dengan tekanan total 100,0 kPa. Tekanan uap air pada 25 °C adalah 3,2 kPa. Berapa gram O_2 yang terkumpul, dan berapa gram H_2O_2 yang terurai?

1. Gas di gelas ukur adalah campuran O_2 dan uap air. Dalton: $p_{O_2} = 100{,}0 - 3{,}2 = 96{,}8$ kPa.
2. $n_{O_2} = \dfrac{pV}{RT} = \dfrac{96{,}8 \times 0{,}250}{8{,}314 \times 298{,}15} = 9{,}76 \times 10^{-3}$ mol → massa $= 9{,}76 \times 10^{-3} \times 32 = 0{,}312$ g.
3. Perbandingan koefisien $H_2O_2 : O_2 = 2 : 1$ → $n_{H_2O_2} = 1{,}95 \times 10^{-2}$ mol → massa $= 1{,}95 \times 10^{-2} \times 34 = 0{,}664$ g.

Terkumpul ±0,312 g O_2 dari ±0,664 g H_2O_2. Kalau uap air tidak dikurangkan, jumlah oksigen terhitung ±3% terlalu besar.

Sekarang hukum kedua. Bila wadah gas diberi lubang yang sangat kecil, partikel yang kebetulan melaju ke arah lubang akan lolos keluar. Peristiwa ini disebut **efusi**. Bila gas menyebar dan bercampur dengan gas lain (seperti bau rendang yang tercium dari dapur sampai ke ruang tamu), peristiwanya disebut **difusi**.

Tebak Dulu!

Satu balon ditiup dengan udara, satu lagi diisi helium, sampai sama besar. Esok paginya, balon mana yang lebih kempis?

- Balon udara, karena napas kita lembap.
- Balon helium, karena atom helium ringan dan melaju lebih cepat, sehingga lebih cepat lolos lewat pori karet.
- Sama saja, karena volumenya sama.
- Balon helium justru makin besar karena helium terus naik.

Jawabannya: balon helium. Pada suhu yang sama, partikel ringan bergerak lebih cepat. Atom helium ($M = 4$) melaju ±2,7 kali lebih cepat daripada molekul udara ($M \approx 29$), sehingga lebih sering "menemukan" pori-pori kecil di karet balon dan kabur.

HUKUM GRAHAM (EFUSI)

Pada suhu dan tekanan yang sama, laju efusi gas berbanding terbalik dengan akar massa molarnya:

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \qquad \text{dan} \qquad \frac{t_1}{t_2} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

r adalah laju efusi; t adalah waktu yang diperlukan untuk berefusi dengan volume yang sama.

RUMUS HIDUP

Hukum Graham: siapa yang kabur lebih cepat?

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

Gas yang molekulnya lebih ringan berefusi lebih cepat; lajunya berbanding terbalik dengan akar massa molarnya.

M_1 Massa molar gas 1 `g/mol`

M_2 Massa molar gas 2 `g/mol`

r_1/r_2 Perbandingan laju efusi `kali`

PERBANDINGAN LAJU EFUSI

2,693

kali

gas 1 lebih ringan, jadi lebih lincah

helium lolos ±2,7 kali lebih cepat daripada udara

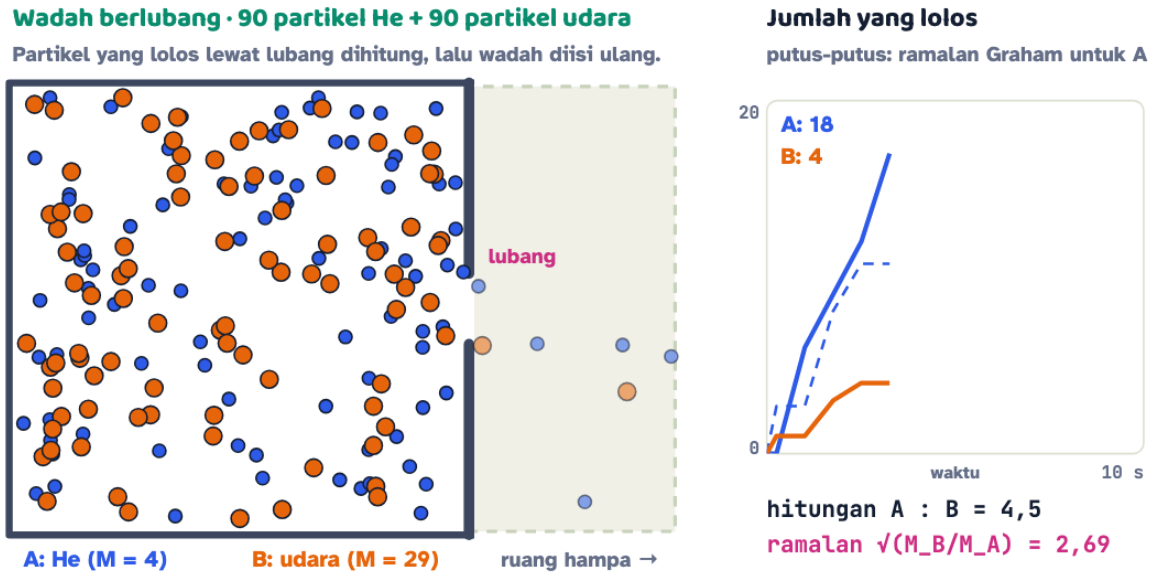
Gas 1 berefusi **2,693** kali secepat gas 2. Untuk volume yang sama, waktunya **0,371** kali waktu gas 2.

Cek satuan: √((g/mol) ÷ (g/mol)) = tanpa satuan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-GRAHAM-EFUSI

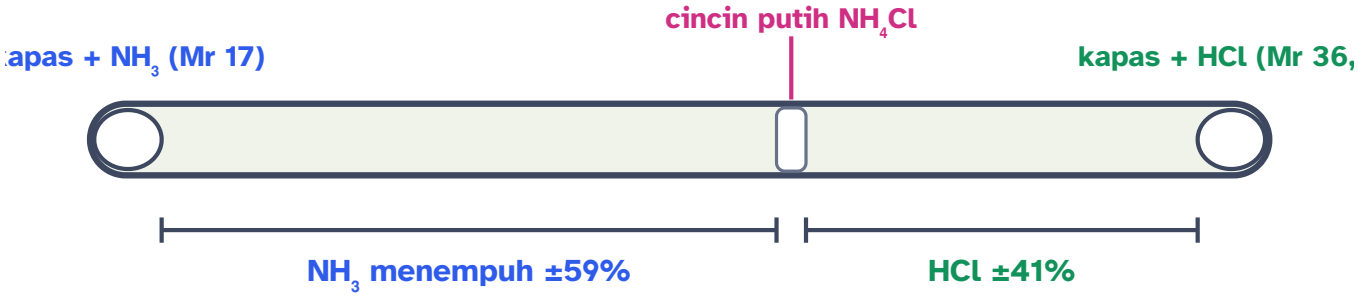
LAB MINI Balapan Efusi: gas mana yang lebih dulu kabur?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-14



A lolos	B lolos	rasio A : B (hitungan)	ramalan Graham √(M_B/M_A)	waktu
18	4	4,5	2,69	3,6 s

Pilih dua gas, lalu tekan ▶ **Jalankan**. Setiap gas punya 90 partikel di wadah kiri. Partikel yang kebetulan melaju ke lubang akan lolos ke ruang hampa (dan wadah diisi ulang supaya jumlahnya tetap). Bandingkan rasio hitungan dengan ramalan Graham. Makin lama dijalankan, makin dekat hasilnya, persis seperti percobaan sungguhan yang diulang berkali-kali. Coba juga dua gas yang sama: rasionya harus mendekati 1.



Demonstrasi guru di lemari asam: amonia dan hidrogen klorida dilepas bersamaan dari kedua ujung tabung. Cincin putih $\mathrm{NH_4Cl}$ muncul lebih dekat ke ujung HCl, karena $\mathrm{NH_3}$ yang lebih ringan bergerak lebih cepat. Graham meramalkan perbandingan jarak $36{,}5/17 = 1{,}47$. Hasil nyata bisa sedikit berbeda karena di dalam tabung molekul berdifusi menembus udara, bukan berefusi lewat lubang kecil.

TRIK KAK TIRTA

"Ringan itu lincah, tetapi akarnya yang dihitung." Gas 16 kali lebih berat hanya 4 kali lebih lambat ($\sqrt{16} = 4$). Hati-hati arah pecahannya: **laju** memakai $\sqrt{M_2/M_1}$, sedangkan **waktu** memakai $\sqrt{M_1/M_2}$. Cek akal sehat: gas yang lebih ringan harus punya laju lebih besar dan waktu lebih singkat.

TAMU DARI MASA LALU

Thomas Graham, kimiawan Skotlandia, meneliti bagaimana gas merembes melalui sumbat gipsum berpori dan lubang-lubang kecil pada 1830–1840-an. Dari data itu ia merumuskan hukumnya. Lebih dari seabad kemudian, prinsip efusi dipakai dalam skala raksasa untuk memisahkan isotop uranium: $^{235}\mathrm{UF}_6$ hanya ±0,4% lebih cepat daripada $^{238}\mathrm{UF}_6$, sehingga gasnya harus dilewatkan ke ribuan tahap penyaring berturut-turut.

14.6 Lanjut: kecepatan molekul, Maxwell–Boltzmann, dan gas nyata

Seberapa cepat sebenarnya partikel gas melaju? Teori kinetik memberi jawabannya. Karena $\overline{E_k} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT$, akar rata-rata kuadrat kecepatannya, disebut **kecepatan rms** (*root mean square*), adalah:

$$v_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \qquad (M \text{ dalam kg/mol})$$

RUMUS HIDUP

Kecepatan rms molekul gas

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Molekul makin cepat bila suhunya tinggi dan makin lambat bila molekulnya berat. Ingat: M dalam kg/mol!

T Suhu mutlak K

M Massa molar g/mol

v_{rms} Kecepatan rms m/s

KECEPATAN RMS

515

m/s

nitrogen, N_2

Itu **1.854,801** km/jam, atau **1,502** kali laju bunyi di udara.

Satuan Nusantara: ≈ 1,5 × bunyi di udara · ≈ 5,3 × kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 7% dari satelit orbit rendah

Cek satuan: √(J/(mol·K) × K ÷ (kg/mol)) = √(J/kg) = √(m²/s²) = m/s ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-VRMS-MOLEKUL

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Dalam $v_{\text{rms}} = \sqrt{3RT/M}$, massa molar harus dalam **kg/mol** karena R = 8,314 J/(mol·K) dan 1 J = 1 kg·m²/s². Untuk nitrogen, tulis $M = 0{,}028$ kg/mol, bukan 28. Kalau memakai 28, hasilnya ±16 m/s, lebih lambat daripada sepeda!

Tentu saja, tidak semua molekul melaju dengan kelajuan yang sama. Tumbukan terus-menerus membuat sebagian molekul lambat dan sebagian sangat cepat. Pada 1860, **James Clerk Maxwell** menghitung bentuk sebaran kelajuan itu, dan **Ludwig Boltzmann** kemudian menyempurnakannya. Grafiknya disebut **distribusi Maxwell–Boltzmann**.

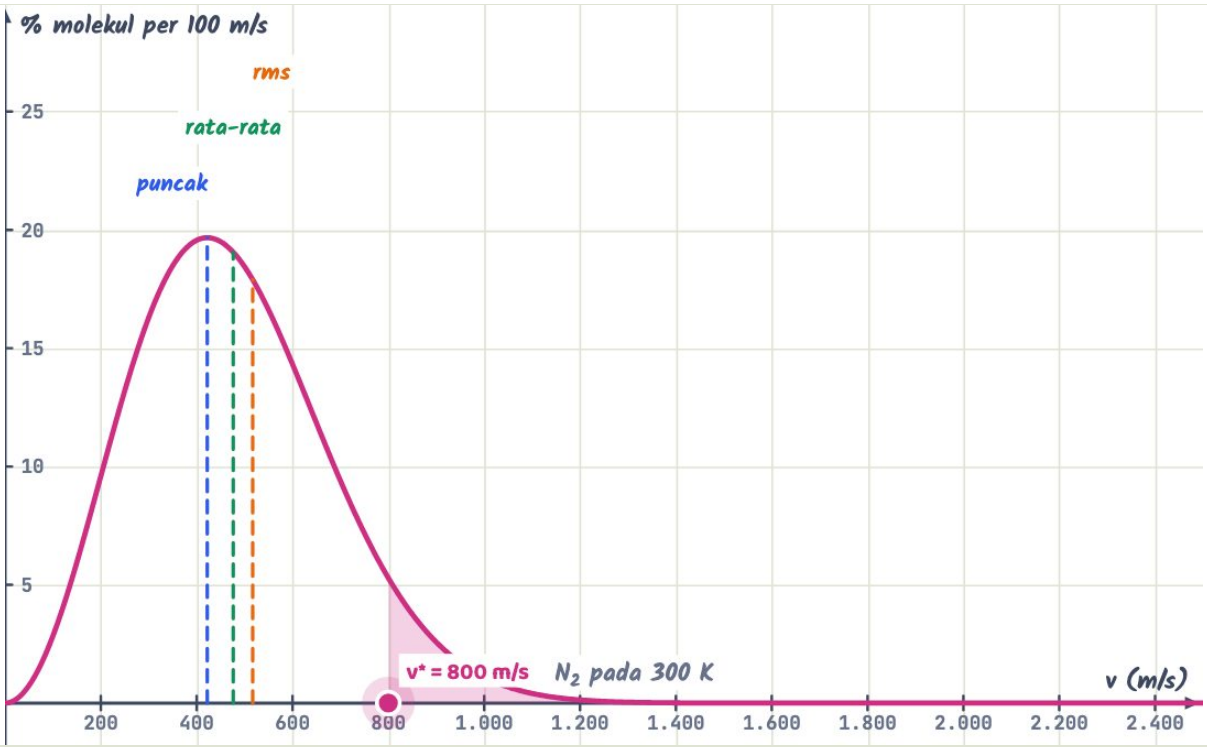
GRAFIK HIDUP

Distribusi Maxwell–Boltzmann: geser suhu dan massa molar

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-14

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{3/2} v^2 \, e^{-Mv^2/2RT}$$

$$v_{\text{rms}} = 516{,}95 \text{ m/s}$$



udara kamar: N_2 rata-rata ±475 m/s

v puncak	v rata-rata	v rms	molekul lebih cepat dari v*
422 m/s	476 m/s	517 m/s	6,6 %

Naikkan suhu: kurva bergeser ke kanan, melebar, dan puncaknya turun (luas di bawah kurva selalu 100%). Lalu ganti massa molar: molekul ringan menyebar ke kelajuan tinggi. Seret titik v* untuk melihat berapa persen molekul yang lebih cepat dari ambang itu. Ide ini akan kembali di Bab 21: hanya molekul yang cukup cepat (berenergi cukup) yang dapat bereaksi.

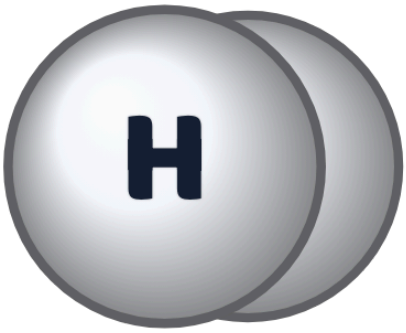
Gas pada 25 °C	M (g/mol)	v_{rms} (m/s)	Pembanding
hidrogen, H_2	2,02	±1.920	±6.900 km/jam
helium, He	4,00	±1.360	4 kali laju bunyi

nitrogen, N_2	28,0	±515	lebih cepat daripada pesawat jet
oksigen, O_2	32,0	±482	±1.700 km/jam
karbon dioksida, CO_2	44,0	±411	sedikit di atas laju bunyi

Teori kinetik menganggap partikel tidak bervolume dan tidak saling tarik. Kenyataannya, molekul punya ukuran (Bab 12) dan saling tarik lewat gaya antarmolekul (Bab 13). Dua anggapan itu baru terasa salah bila partikel dipaksa berdekatan: pada **tekanan tinggi** dan **suhu rendah**. Seberapa jauh gas menyimpang diukur dengan **faktor kompresibilitas** $Z = \frac{PV}{nRT}$. Untuk gas ideal $Z = 1$ persis.

MOLEKUL 3D

Molekul gas: kecil, tetapi tidak nol



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Hidrogen H_2

Mr ≈ 2,02

Molekul paling sederhana: dua proton berbagi sepasang elektron.

Model isi ruang menunjukkan ukuran molekul. Bandingkan H_2 dengan CO_2: makin besar molekulnya, makin besar tetapan b van der Waals. Amonia tidak besar, tetapi tetapan a-nya terbesar di antara molekul ini. Mengapa? (Petunjuk: ikatan hidrogen, Bab 13.)

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERSAMAAN VAN DER WAALS

Pada 1873, **Johannes Diderik van der Waals** memperbaiki persamaan gas ideal dengan dua koreksi, dan untuk itu ia menerima Nobel Fisika 1910:

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

- **b** (volume molekul): ruang bebas bagi gerak partikel lebih kecil daripada volume wadah, jadi V diganti $V - nb$. Efeknya menaikkan tekanan.
- **a** (gaya tarik): partikel yang hendak menumbuk dinding "ditarik mundur" oleh tetangganya, sehingga tumbukannya lebih lemah. Tekanan nyata lebih kecil sebesar an^2/V^2.

Gas	a (L²·atm/mol²)	b (L/mol)
He	0,0341	0,0237
H_2	0,244	0,0266
N_2	1,39	0,0391
O_2	1,36	0,0318
CO_2	3,59	0,0427
NH_3	4,17	0,0371
H_2O	5,46	0,0305

Contoh: 1,00 mol CO_2 dalam tabung 0,500 L pada 300 K. Gas ideal: $P = \frac{1{,}00 \times 0{,}08206 \times 300}{0{,}500} = 49{,}2$ atm. Van der Waals: $P = \frac{24{,}62}{0{,}500 - 0{,}0427} - \frac{3{,}59}{0{,}500^2} = 53{,}8 - 14{,}4 = 39{,}5$ atm. Tekanan nyata ±20% lebih rendah ($Z \approx 0{,}80$): gaya tarik antarmolekul menang. Pada tekanan yang jauh lebih tinggi, volume molekul yang menang dan $Z > 1$.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TIGA KELAJUAN KHAS DAN ATMOSFER YANG BOCOR

Dari distribusi Maxwell–Boltzmann diperoleh tiga kelajuan khas dengan perbandingan tetap:

$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \;<\; \bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \;<\; v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \qquad (1 : 1{,}128 : 1{,}225)$$

Di lapisan teratas atmosfer suhunya dapat melebihi 1.000 K. Sebagian kecil molekul hidrogen dan helium di ekor kanan kurva melaju melebihi kecepatan lepas Bumi, 11,2 km/s, lalu lolos ke antariksa. Selama miliaran tahun, Bumi kehilangan hampir semua hidrogen dan helium bebasnya, sedangkan N_2 dan O_2 yang lebih berat bertahan. Bulan yang gravitasinya lemah bahkan tidak mampu mempertahankan atmosfer sama sekali.

Kimia di sekitarmu

Ban motor di siang terik

Udara di dalam ban memanas sehingga tekanannya naik (hukum Gay-Lussac). Periksa tekanan ban pagi hari saat ban masih dingin.

Keripik "bantal"

Kemasan keripik diisi gas nitrogen supaya keripik tidak cepat tengik dan tidak remuk. Di Dieng atau Bromo, kemasan itu menggembung karena tekanan luar turun.

Tabung LPG 3 kg

Isinya ±60 mol propana–butana. Sebagai gas ideal dalam tabung ±7,3 L tekanannya akan ±200 atm! Untungnya gas itu mencair, sehingga tekanannya hanya ±5–8 bar. Jangan dijemur: tekanan naik bila panas.

Penyelam Raja Ampat

Udara dimampatkan ±200 bar ke dalam tabung (Boyle), dan tekanan parsial oksigen dijaga di bawah 1,4 atm (Dalton).

Balon udara Wonosobo

Udara yang dipanaskan memuai (Charles), sebagian keluar, sehingga isi balon lebih ringan daripada udara di sekitarnya dan balon terangkat.

Panci presto

Uap yang terkurung menaikkan tekanan menjadi ±2 atm, sehingga air baru mendidih pada ±120 °C. Daging rendang empuk dalam waktu jauh lebih singkat.

Cek Cepat

Pada suhu tetap, volume sejumlah gas diperkecil menjadi setengahnya. Tekanannya menjadi ...

- setengahnya
- tetap
- dua kali semula
- empat kali semula

Gas pada 27 °C dipanaskan menjadi 327 °C pada tekanan tetap. Volumenya menjadi ...

- 2 kali semula
- 12 kali semula
- tetap
- setengahnya

Udara kering mengandung 21% oksigen (dalam mol). Pada tekanan total 100 kPa, tekanan parsial oksigen adalah ...

- 100 kPa
- 21 kPa
- 79 kPa
- 4,8 kPa

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. B

Tantangan Rumah: balon yang bernapas

Bahan: botol plastik bekas 600 mL (kosong dan kering), balon karet, dua baskom, air hangat dari termos atau keran (±50 °C, bukan air mendidih), air es, lap, meteran jahit, termometer dapur (bila ada).

1. Pasang mulut balon yang kempis pada mulut botol sampai rapat.
2. Minta orang dewasa mengisi baskom pertama dengan air hangat ±50 °C. Celupkan bagian bawah botol selama 2 menit. Amati balon, lalu ukur kelilingnya dengan meteran jahit.
3. Pindahkan botol ke baskom berisi air es selama 2 menit. Amati dan ukur lagi.
4. Ulangi dua kali. Apakah balon selalu kembali ke ukuran yang sama?
5. Bonus: saat balon menggembung, remas botol perlahan. Apa yang terjadi pada balon, dan hukum gas mana yang berlaku?

Keselamatan: Air panas hanya dituang oleh orang dewasa. Jangan memakai air mendidih: botol plastik dapat melunak dan air panas dapat melukai kulit. Letakkan baskom di lantai atau meja yang stabil, jauh dari jangkauan adik kecil. Bila kamu alergi lateks, ganti balon dengan kantong plastik tipis. Keringkan tumpahan air supaya lantai tidak licin.

Pertanyaan: Bila udara di dalam botol memanas dari 27 °C menjadi 50 °C, berapa persen volumenya bertambah? Berapa mililiter udara yang pindah ke dalam balon? Jelaskan pengamatanmu pada tingkat partikel.

RINGKASAN KILAT

Bab 14 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **tekanan gas** dengan **teori kinetik** (tumbukan partikel) dan memakai skala **suhu mutlak** (kelvin)
- menerapkan **hukum Boyle**, **Charles**, **Gay-Lussac**, dan hukum gas gabungan pada peristiwa sehari-hari
- memakai **hukum Avogadro** dan **persamaan gas ideal** $PV = nRT$ untuk menghitung tekanan, volume, M_r, dan massa jenis gas
- menghitung **tekanan parsial** (hukum Dalton) dan membandingkan laju **efusi** gas (hukum Graham)
- menjelaskan penyimpangan **gas nyata** (van der Waals), **kecepatan rms**, dan **distribusi Maxwell–Boltzmann**

Istilah kunci

Tekanan · pascal · kelvin · nol mutlak · volume molar · tetapan gas · massa jenis gas · tekanan parsial · fraksi mol · efusi · difusi · kecepatan rms · distribusi Maxwell–Boltzmann · faktor kompresibilitas

Rumus penting

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Hukum gas gabungan: kemasan keripik naik gunung. Untuk sejumlah gas yang sama, P kali V dibagi T selalu bernilai sama, ke mana pun gas itu dibawa.

$$P = \frac{n\,R\,T}{V}$$

Gas ideal: berapa tekanannya?. Tekanan gas sebanding dengan banyaknya partikel dan suhunya, tetapi berbanding terbalik dengan volume wadahnya.

$$p_{\mathrm{O_2}} = \frac{\%\mathrm{O_2}}{100} \times \left(1 + \frac{h}{10}\right)$$

Tekanan parsial oksigen penyelam. Setiap turun 10 m di laut, tekanan bertambah ±1 atm, dan bagian oksigen dari tekanan itu ikut naik.

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

Hukum Graham: siapa yang kabur lebih cepat?. Gas yang molekulnya lebih ringan berefusi lebih cepat; lajunya berbanding terbalik dengan akar massa molarnya.

$$v_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Kecepatan rms molekul gas. Molekul makin cepat bila suhunya tinggi dan makin lambat bila molekulnya berat. Ingat: M dalam kg/mol!

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Partikel gas tidak memuai saat dipanaskan dan tidak menyusut saat didinginkan.
- Hukum Charles dan Gay-Lussac hanya berlaku untuk suhu dalam kelvin.
- Kesalahan paling sering pada $PV = nRT$ adalah satuan yang tidak cocok dengan R.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=14

🧩 Teka-teki untuk Bab 15

Kak Tirta membuat bolu kukus. Adonannya diberi sejumput soda kue, lalu mengembang karena gelembung gas karbon dioksida memuai saat dipanaskan (hukum Charles beraksi!). Di label kemasannya tertulis "natrium hidrogen karbonat". Kenapa namanya begitu, tetapi di dapur disebut soda kue? Dan apa bedanya dengan soda api yang berbahaya?

▼ **Intip petunjuk**

Nama kimia disusun dari ion-ionnya: $\mathrm{Na^+}$ (natrium) dan $\mathrm{HCO_3^-}$ (hidrogen karbonat), sehingga rumusnya $\mathrm{NaHCO_3}$. Saat dipanaskan, $2\,\mathrm{NaHCO_3} \longrightarrow \mathrm{Na_2CO_3 + H_2O + CO_2}$. Soda api adalah natrium hidroksida, NaOH, basa kuat yang korosif. Satu kata "soda", dua zat yang sangat berbeda! Di Bab 15 kita belajar membaca dan menyusun nama kimia seperti ini.

BAB 15 · STOIKIOMETRI

15 Bahasa Kimia: Membaca Rumus, Memberi Nama

Soda kue dan soda api sama-sama disebut "soda". Yang satu mengembangkan bolu, yang lain bisa melukai kulit. Bab ini mengajarimu bahasa rahasia kimiawan: rumus dan nama yang tidak pernah tertukar.

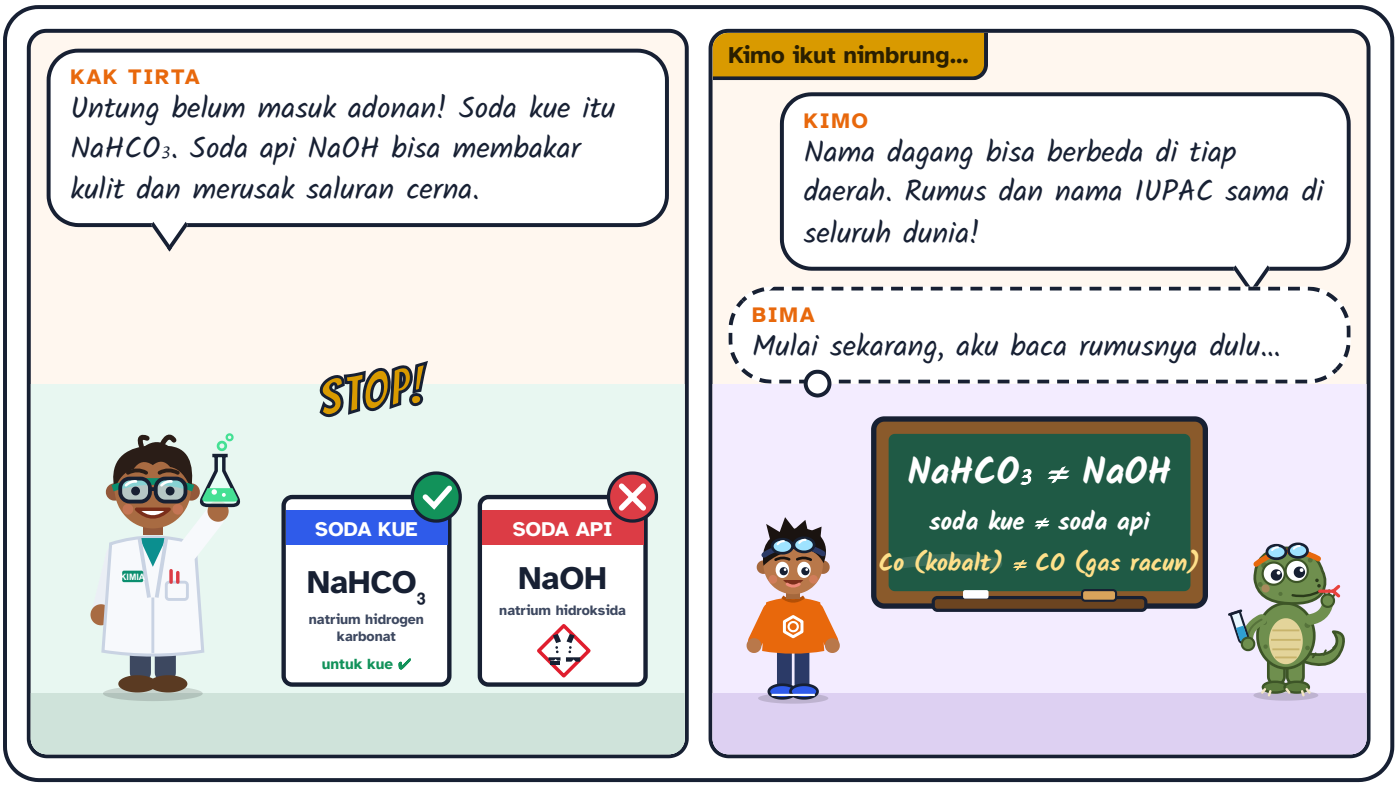
Setelah bab ini, kamu bisa

- membaca **lambang unsur** dan **rumus kimia**, serta membedakan rumus molekul, rumus empiris, dan rumus struktur;
- menentukan **bilangan oksidasi** unsur dalam senyawa dan ion;
- menulis rumus dan **nama IUPAC senyawa ion** (biner dan poliatom), termasuk **angka Romawi** untuk logam bermuatan ganda;
- menamai **senyawa kovalen biner** dengan awalan mono-, di-, tri-, dan seterusnya;
- menamai **asam, basa, garam, dan hidrat**, lalu menerjemahkan **nama dagang** di label produk menjadi nama IUPAC.

SODA YANG SALAH

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Bima menulis Co, Laras menulis CO. Apakah keduanya sama?

- Sama saja, hanya beda gaya tulisan.
- CO adalah "versi besar" dari Co, jadi sifatnya mirip.
- Berbeda total: Co adalah unsur kobalt (logam), CO adalah senyawa karbon monoksida (gas beracun).
- Keduanya sama-sama gas beracun dari knalpot.

Jawabannya: berbeda total. Huruf kecil "o" pada Co berarti satu lambang unsur dua huruf, yaitu kobalt, logam keperakan untuk baterai dan magnet. Huruf besar "O" pada CO berarti dua unsur: karbon dan oksigen, membentuk karbon monoksida yang tidak berbau dan sangat beracun. Dalam bahasa kimia, satu huruf kapital bisa menjadi soal hidup dan mati!

15.1 Lambang unsur dan rumus kimia: alfabet dan kalimat

Bahasa Indonesia punya 26 huruf. Bahasa kimia punya 118 "huruf", yaitu **lambang unsur**. Dari huruf-huruf itu, kimiawan merangkai "kata" yang disebut **rumus kimia**. Rumus kimia bercerita tentang dua hal sekaligus: **unsur apa saja** yang menyusun zat, dan **berapa banyak** atom setiap unsur.

Bahasa sederhana · Coba bayangkan lambang unsur seperti inisial nama teman sekelasmu. Huruf pertama selalu kapital, huruf kedua (kalau ada) selalu kecil. Jadi "Co" itu satu orang bernama kobalt, sedangkan "CO" itu dua orang yang bergandengan: karbon dan oksigen.

ATURAN · MENULIS LAMBANG UNSUR

- Satu atau dua huruf (unsur sangat berat yang baru ditemukan pernah memakai tiga huruf sementara).
- Huruf pertama **kapital**, huruf kedua **kecil**: **C** karbon, **Ca** kalsium, **Cl** klorin, **Co** kobalt, **Cu** tembaga.
- Banyak lambang berasal dari **nama Latin**, sehingga tidak mirip nama Indonesianya.

Lambang	Nama Latin	Nama Indonesia	Ada di sekitar kita
Na	natrium	natrium	garam dapur, soda kue
K	kalium	kalium	pisang, pupuk KCl
Fe	ferrum	besi	paku, pasir besi pantai selatan Jawa
Cu	cuprum	tembaga	kabel listrik, gamelan perunggu
Ag	argentum	perak	kerajinan perak Kotagede
Au	aurum	emas	tambang Grasberg, perhiasan
Sn	stannum	timah	bijih timah Bangka-Belitung
Pb	plumbum	timbal	aki kendaraan (dulu juga bensin bertimbal)
Hg	hydrargyrum ("air perak")	raksa	termometer lama (kini dilarang)

AWAS JEBAKAN

Huruf besar dan kecil mengubah arti. **Co** = kobalt, **CO** = karbon monoksida. **No** = nobelium, **NO** = nitrogen monoksida. **Sn** = timah, sedangkan "SN" bukan apa-apa. Satu lagi: dalam bahasa Indonesia, **timah** (Sn) berbeda dengan **timbal** (Pb), walaupun timbal dulu disebut "timah hitam".

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1808, **John Dalton** menggambar unsur sebagai lingkaran bersimbol: lingkaran dengan titik untuk hidrogen, lingkaran hitam untuk karbon. Cantik, tetapi repot dicetak! Sekitar 1813, kimiawan Swedia **Jöns Jacob Berzelius** mengusulkan memakai huruf awal nama Latin unsur, persis seperti yang kita pakai sekarang. Berzelius menulis jumlah atom sebagai angka di atas (H^2O); kini angka itu ditulis kecil di bawah (H_2O).

Indeks dan koefisien: dua angka, dua makna

Dalam rumus, angka kecil di kanan bawah lambang disebut **indeks**. Indeks menyatakan jumlah atom unsur di depannya dalam **satu** molekul atau satuan rumus. Angka besar di depan rumus disebut **koefisien**, yang menyatakan **berapa banyak** molekul atau satuan rumus.

- H_2O: 2 atom H dan 1 atom O (angka 1 tidak ditulis).
- $3\,H_2O$: tiga molekul air, berisi 6 atom H dan 3 atom O.
- $Ca(NO_3)_2$: indeks 2 di luar kurung mengalikan isi kurung. Ada 1 Ca, 2 N, dan 6 O.
- $CuSO_4 \cdot 5\,H_2O$: titik tengah berarti "beserta". Satu satuan $CuSO_4$ membawa 5 molekul air.

RUMUS HIDUP **Jumlah atom dalam rumus**

$$N = k \times p \times q$$

Jumlah atom suatu unsur sama dengan koefisien dikali indeks di luar kurung dikali indeks di dalam kurung.

k Koefisien (angka di depan rumus)

p Indeks di luar kurung

q Indeks atom di dalam kurung

N Jumlah atom `atom`



$3Ca(NO_3)_2$ → 18 atom O

3 × 2 × 3 = 18 atom. Contoh: atom O dalam $3Ca(NO_3)_2$ = 3 × 2 × 3 = 18 atom.

Cek satuan: hitungan atom, tanpa satuan

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-JUMLAH-ATOM-RUMUS

Tiga cara menulis satu zat

Satu zat bisa ditulis dengan beberapa jenis rumus. **Rumus molekul** menyatakan jumlah atom sebenarnya dalam satu molekul. **Rumus empiris** menyatakan perbandingan atom paling sederhana. **Rumus struktur** menunjukkan cara atom-atom itu tersambung.

Rumus molekul

$C_2H_4O_2$

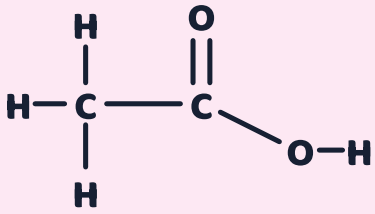
jumlah atom sebenarnya dalam satu molekul

Rumus empiris

CH_2O

perbandingan paling sederhana
2 : 4 : 2 = 1 : 2 : 1

Rumus struktur



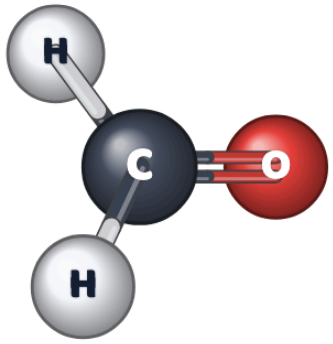
cara atom-atom tersambung

Tiga tulisan, satu zat: asam asetat, penyebab rasa asam pada cuka.

Rumus molekul, rumus empiris, dan rumus struktur asam asetat. Bandingkan dengan Molekul 3D di bawah: model 3D adalah "rumus struktur" yang bisa diputar.

Zat	Rumus molekul	Rumus empiris	Keterangan
Formaldehida	CH_2O	CH_2O	molekulnya sudah paling sederhana
Asam asetat (cuka)	$C_2H_4O_2$	CH_2O	sering ditulis CH_3COOH agar gugus asamnya terlihat
Glukosa	$C_6H_{12}O_6$	CH_2O	gula darah, enam kali rumus empiris
Hidrogen peroksida	H_2O_2	HO	cairan antiseptik luka
Benzena	C_6H_6	CH	cincin di kaus Bima!
Garam dapur	(tidak ada)	$NaCl$	senyawa ion tidak punya molekul; rumusnya disebut **satuan rumus**

MOLEKUL 3D **Satu rumus empiris, banyak wajah**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Formaldehida CH_2O Mr ≈ 30,03 PubChem ↗

Segitiga datar. Larutannya (formalin) mengawetkan jenazah dan DILARANG untuk makanan.

Formaldehida, asam asetat, dan glukosa sama-sama berumus empiris CH_2O, tetapi molekulnya sangat berbeda. Putar setiap molekul, hitung atomnya, lalu tulis rumus molekulnya. Ingat: formalin (larutan formaldehida) **dilarang** untuk mengawetkan makanan!

15.2 Bilangan oksidasi dan valensi: "muatan pura-pura"

Sebelum memberi nama, kita perlu satu alat penting. Bayangkan setiap ikatan sebagai tarik tambang memperebutkan elektron. Atom yang lebih **elektronegatif** (lebih rakus elektron, lihat Bab 8) dianggap **menang telak** dan membawa pulang semua elektron ikatan. Muatan yang "seolah-olah" dimiliki setiap atom setelah perebutan itu disebut **bilangan oksidasi** (biloks).

Bahasa sederhana · Bilangan oksidasi itu seperti skor pertandingan rebutan elektron. Atom yang menang mendapat skor minus (karena elektron bermuatan negatif), atom yang kalah mendapat skor plus. Jumlah skor semua atom dalam satu molekul selalu nol.

DEFINISI · BILANGAN OKSIDASI DAN VALENSI

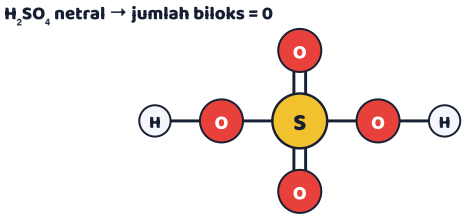
Bilangan oksidasi adalah muatan yang dimiliki sebuah atom bila semua ikatannya dianggap ikatan ion, dengan elektron ikatan diberikan kepada atom yang lebih elektronegatif. **Valensi** adalah daya gabung atom, yaitu banyaknya ikatan yang dapat dibentuknya (H = 1, O = 2, N = 3, C = 4). Valensi selalu berupa bilangan cacah; biloks punya tanda + atau –.

Contoh: karbon bervalensi 4 di metana (CH_4) maupun di karbon dioksida (CO_2). Namun biloks C di CH_4 adalah –4 (C lebih elektronegatif daripada H), sedangkan di CO_2 adalah +4 (O lebih elektronegatif daripada C). Valensi sama, biloks berlawanan!

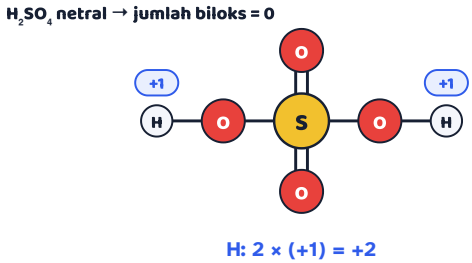
ATURAN · MENENTUKAN BILANGAN OKSIDASI

1. Unsur bebas (Na, Fe, $\mathrm{O_2}$, $\mathrm{H_2}$, $\mathrm{P_4}$, $\mathrm{S_8}$) berbiloks **0**.
2. Ion monoatom berbiloks sama dengan **muatannya**: $\mathrm{Na^+}$ = +1, $\mathrm{Fe^{3+}}$ = +3, $\mathrm{Cl^-}$ = −1.
3. Dalam senyawa, logam golongan 1 selalu **+1**, golongan 2 selalu **+2**, dan aluminium **+3**.
4. Fluorin dalam senyawa selalu **−1**.
5. Hidrogen umumnya **+1**, kecuali dalam hidrida logam (NaH, $\mathrm{CaH_2}$) yang **−1**.
6. Oksigen umumnya **−2**, kecuali dalam peroksida ($\mathrm{H_2O_2}$, $\mathrm{Na_2O_2}$) yang **−1** dan dalam $\mathrm{OF_2}$ yang **+2**.
7. Jumlah biloks semua atom = **0** untuk senyawa netral, dan = **muatan ion** untuk ion poliatom.

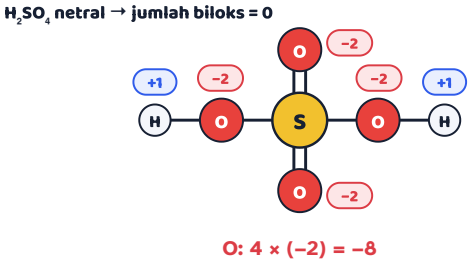
Bila dua aturan bertentangan, aturan dengan nomor lebih kecil yang menang.



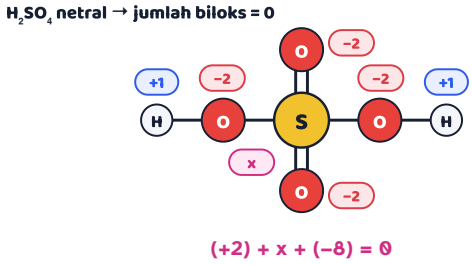
Langkah 1. Asam sulfat, $\mathrm{H_2SO_4}$, adalah molekul netral. Jadi jumlah semua bilangan oksidasinya harus 0.



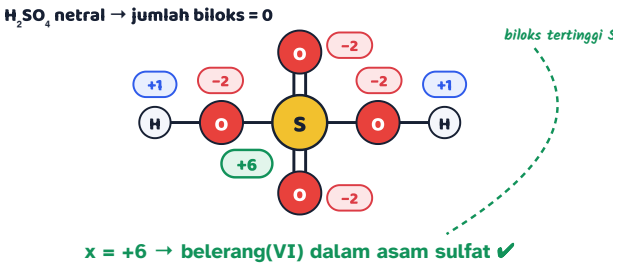
Langkah 2. Aturan 5: H dalam senyawa ini berbiloks +1. Dua atom H menyumbang 2 × (+1) = +2.



Langkah 3. Aturan 6: O berbiloks −2 (bukan peroksida). Empat atom O menyumbang 4 × (−2) = −8.



Langkah 4. Biloks S belum diketahui; sebut saja x. Susun persamaan jumlah nol: $(+2) + x + (-8) = 0$.



Langkah 5. Selesaikan: $x = +6$. Belerang dalam asam sulfat berbiloks +6, nilai tertinggi untuk unsur golongan 16.

TRIK KAK TIRTA

"Tulis di atas, kalikan, jumlahkan." Tulis biloks setiap unsur yang sudah pasti *di atas* lambangnya, kalikan dengan indeksnya, lalu jumlahkan dan samakan dengan muatan total. Untuk $\mathrm{Cr_2O_7^{2-}}$: $2x + 7(-2) = -2$, jadi $x = +6$. Dua menit, tanpa menghafal!

RUMUS HIDUP

Bilangan oksidasi dari jumlah nol

$$x = \frac{q - a\,(+1) - b\,(-2)}{n}$$

Biloks unsur yang dicari sama dengan muatan total dikurangi sumbangan H dan sumbangan O, lalu dibagi jumlah atom unsur itu.

- q Muatan total spesi
- a Jumlah atom H (atau Na, K)
- b Jumlah atom O
- n Jumlah atom unsur X
- x Biloks unsur X

BILOKS UNSUR X

6

H_2SO_4: S = +6

Spesi dengan **2** atom H, **1** atom X, dan **4** atom O, bermuatan **0**: biloks X = **6**.

Cek satuan: biloks tidak bersatuan

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-BILOKS-JUMLAH-NOL

CONTOH **Biloks klorin dalam pemutih**

Label pemutih pakaian menulis "natrium hipoklorit", NaClO. Tentukan bilangan oksidasi Cl.

1. Senyawa netral: jumlah biloks = 0.
2. Na (golongan 1) = +1; O = −2.
3. $(+1) + x + (-2) = 0$, sehingga $x = +1$.

Biloks Cl = +1. Bandingkan dengan Cl dalam garam dapur (NaCl) yang −1. Klorin yang "kekurangan elektron" inilah yang membuat pemutih bersifat oksidator kuat.

ADU CEPAT **Biloks kilat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-15

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Jumlah semua biloks = muatan total. H = +1, O = −2. Contoh: $Cr_2O_7^{2-}$ → 2x − 14 = −2 → x = +6.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BILOKS PECAHAN DAN "PENGECUALIAN" KESUKAAN OLIMPIADE

Biloks yang dihitung dari rumus adalah **rata-rata**. Struktur sebenarnya bisa lebih menarik:

- Magnetit, $\mathrm{Fe_3O_4}$ (pasir besi), memberi rata-rata Fe = +8/3. Sebenarnya isinya satu $\mathrm{Fe^{2+}}$ dan dua $\mathrm{Fe^{3+}}$, sehingga namanya **besi(II,III) oksida**.
- Ion tetrationat, $\mathrm{S_4O_6^{2-}}$, memberi rata-rata S = +2,5. Dari struktur Lewisnya, dua S di ujung (terikat pada O) berbiloks +5, dan dua S di tengah (hanya terikat pada S) berbiloks 0.
- Kalium superoksida, $\mathrm{KO_2}$ (dipakai pada tabung oksigen darurat), memberi O = −½.
- $\mathrm{CrO_5}$ bukan Cr(+10)! Molekulnya berisi dua gugus peroksida (O = −1), sehingga Cr = +6.

Rentang biloks yang dikenal adalah −4 (C dalam $\mathrm{CH_4}$) sampai +8 (Os dalam $\mathrm{OsO_4}$). IUPAC kini menganjurkan menentukan biloks dari struktur Lewis: setiap pasangan elektron ikatan diberikan kepada atom yang lebih elektronegatif, dan ikatan antara dua atom sejenis dibagi rata.

15.3 Senyawa ion: kation dulu, anion kemudian

Ingat Natrium yang royal dan Klorin yang rakus dari Klub Unsur (Bab 10)? Natrium menyerahkan satu elektron menjadi **kation** $\mathrm{Na^+}$, dan klorin menerimanya menjadi **anion** $\mathrm{Cl^-}$. Keduanya saling tarik dan membentuk kisi kristal garam. Senyawa ion diberi nama seperti nama orang Indonesia yang punya nama depan dan nama belakang: **nama kation dulu, lalu nama anion**.

DEFINISI · NAMA SENYAWA ION

Nama senyawa ion = **nama kation** + **nama anion**. Kation logam memakai nama unsurnya (ditambah angka Romawi bila logam itu bisa bermuatan lebih dari satu). Anion monoatom memakai nama unsur dengan akhiran **-ida**: klorida, oksida, sulfida. Ion poliatom punya nama khusus yang perlu dikenali.

Bahasa sederhana · Contoh paling sederhana: natrium + klorida = **natrium klorida** (garam dapur). Kalsium + oksida = **kalsium oksida** (kapur tohor). Mudah, kan? Kation selalu disebut lebih dulu, seperti pemain tuan rumah.

Tabel ion yang paling sering muncul

Kation (ion positif)

Muatan +1	Muatan +2	Muatan +3 dan +4
H^+ hidrogen	Mg^{2+} magnesium	Al^{3+} aluminium
Na^+ natrium	Ca^{2+} kalsium	Fe^{3+} besi(III)
K^+ kalium	Ba^{2+} barium	Cr^{3+} kromium(III)
Ag^+ perak	Zn^{2+} seng	Sn^{4+} timah(IV)
NH_4^+ amonium	Fe^{2+} besi(II)	Pb^{4+} timbal(IV)
Cu^+ tembaga(I)	Cu^{2+} tembaga(II)	
	Sn^{2+} timah(II)	
	Pb^{2+} timbal(II)	
	Mn^{2+} mangan(II)	
	Ni^{2+} nikel(II)	
	Hg^{2+} raksa(II)	

Anion monoatom (akhiran -ida)

Muatan −1	Muatan −2	Muatan −3
F^- fluorida	O^{2-} oksida	N^{3-} nitrida
Cl^- klorida	S^{2-} sulfida	P^{3-} fosfida
Br^- bromida		
I^- iodida		
H^- hidrida		

Ion poliatom	Nama	Ditemukan di …
NH_4^+	amonium	pupuk ZA, nisadar (baterai kering)
OH^-	hidroksida	soda api, kapur sirih, obat maag

CN^-	sianida	dilepaskan singkong pahit dan gadung yang tidak diolah benar (sebagai HCN)
NO_3^-	nitrat	pupuk, sendawa
NO_2^-	nitrit	pengawet daging olahan
SO_4^{2-}	sulfat	terusi, tawas, garam inggris, air aki
SO_3^{2-}	sulfit	pengawet buah kering
HSO_4^-	hidrogen sulfat	pembersih kloset berbentuk serbuk
CO_3^{2-}	karbonat	batu kapur, cangkang telur, soda abu
HCO_3^-	hidrogen karbonat (bikarbonat)	soda kue, air mineral
PO_4^{3-}	fosfat	tulang dan gigi
HPO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$	hidrogen fosfat, dihidrogen fosfat	pupuk fosfat, pengatur keasaman
CH_3COO^-	asetat	cuka
ClO^-, ClO_3^-, ClO_4^-	hipoklorit, klorat, perklorat	pemutih & kaporit, korek api, kembang api
IO_3^-	iodat	garam beryodium
MnO_4^-	permanganat	PK, disinfektan berwarna ungu
CrO_4^{2-}, $Cr_2O_7^{2-}$	kromat, dikromat	larutan kuning dan jingga di laboratorium
$C_2O_4^{2-}$	oksalat	belimbing wuluh, bayam
$S_2O_3^{2-}$	tiosulfat	penetral klorin air akuarium



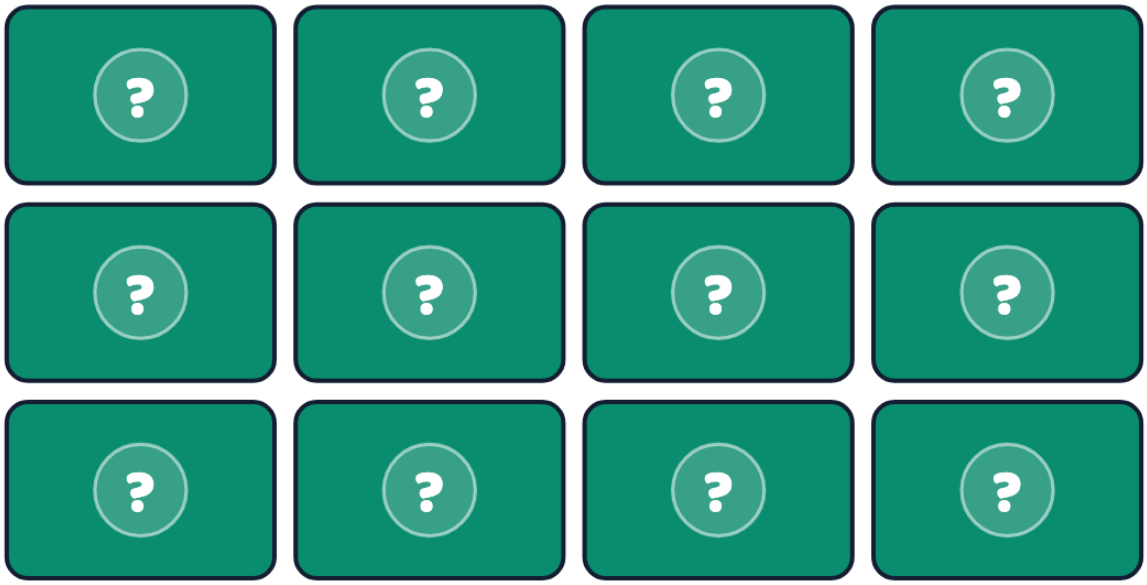
TRIK KAK TIRTA · -AT ATAU -IT?

Akhiran **-it** ada di kata "sed**ikit**": ion berakhiran -it punya oksigen **lebih sedikit** satu daripada pasangan -at-nya. Sulfat SO_4^{2-} → sulfit SO_3^{2-}; nitrat NO_3^- → nitrit NO_2^-. Muatannya tetap sama! Awalan **hipo-** berarti "di bawah" (lebih sedikit lagi), awalan **per-** berarti "melebihi": hipoklorit ClO^- < klorit ClO_2^- < klorat ClO_3^- < perklorat ClO_4^-.

LAB MINI **Kartu Memori Ion Poliatom**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-15

Pasangkan rumus ion dengan namanya



Ketuk dua kartu. Pasangkan rumus ion (biru) dengan namanya (oranye).

Langkah	Pasangan	Waktu	Status
0	0 / 6	0 s	siap

Ketuk dua kartu untuk membukanya. Pasangkan **rumus ion** (biru) dengan **namanya** (oranye). Setiap pasangan yang cocok membuka satu fakta kimia sehari-hari. Coba set "Kembar -at/-it": sanggupkah kamu menyelesaikannya dalam kurang dari 12 langkah?

Dari nama ke rumus: silangkan muatannya

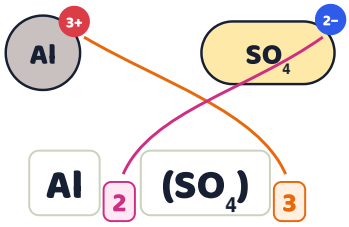
Senyawa ion selalu **netral**. Jadi jumlah muatan positif kation harus tepat menghapus muatan negatif anion. Caranya: angka muatan kation menjadi indeks anion, dan sebaliknya. Lalu sederhanakan.

ATURAN · MENULIS RUMUS SENYAWA ION

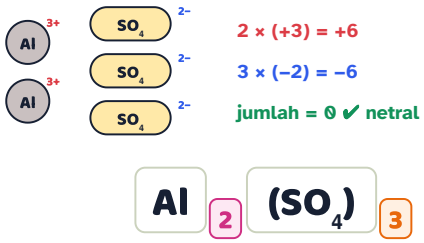
1. Tulis lambang kation dulu, anion kemudian.
2. Pilih jumlah setiap ion sehingga **muatan total = 0** (silangkan angka muatannya).
3. Sederhanakan perbandingannya: $Ca^{2+} + O^{2-} \rightarrow CaO$, bukan Ca_2O_2.
4. Beri **kurung** pada ion poliatom yang jumlahnya lebih dari satu: $Ca(OH)_2$, $(NH_4)_2SO_4$.



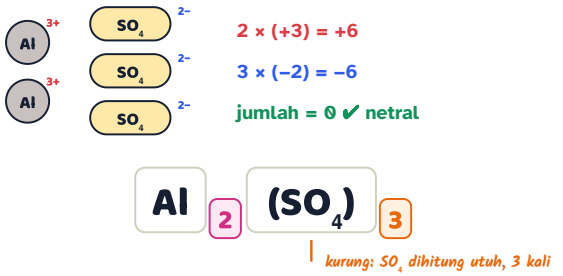
Langkah 1. Ion aluminium, Al^{3+}, dan ion sulfat, $SO_4{}^{2-}$. Muatannya tidak sama besar, jadi perbandingannya tidak bisa 1 : 1.



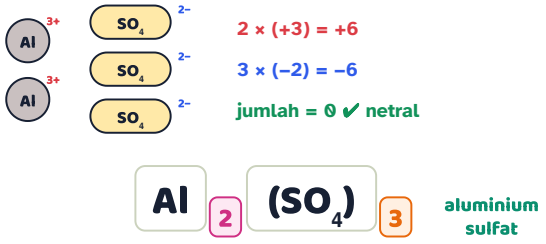
Langkah 2. Silangkan angka muatannya: angka 3 dari Al menjadi indeks sulfat, angka 2 dari sulfat menjadi indeks Al.



Langkah 3. Cek muatan: 2 × (+3) + 3 × (−2) = 0. Senyawa ion selalu netral!



Langkah 4. Karena ada tiga ion sulfat utuh, SO_4 diberi kurung: $Al_2(SO_4)_3$, bukan "Al_2SO_{43}".



Langkah 5. Namanya **aluminium sulfat**: tanpa awalan dan tanpa angka Romawi, karena Al hanya punya satu muatan (+3). Zat inilah yang dipakai PDAM untuk menjernihkan air.

RUMUS HIDUP

Silang muatan: berapa ion yang dibutuhkan?

$$x = \frac{b}{\mathrm{FPB}(a,\, b)}, \qquad y = \frac{a}{\mathrm{FPB}(a,\, b)}$$

Jumlah kation (x) adalah besar muatan anion, dan jumlah anion (y) adalah besar muatan kation, setelah keduanya dibagi faktor persekutuan terbesarnya.

- a Muatan kation (+)
- b Besar muatan anion (–)
- x Jumlah kation dalam rumus

JUMLAH KATION DALAM RUMUS

2

$Al_2(SO_4)_3$, Fe_2O_3

Kation +**3** dan anion –**2**: x = **2** kation, y = **3** anion. Cek: **2** × (+**3**) + **3** × (–**2**) = 0 ✔

Cek satuan: x · a – y · b = 0

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-SILANG-MUATAN-NAMA

Angka Romawi: muatan, bukan jumlah

Tebak Dulu!

Karat besi diberi nama besi(III) oksida. Apa arti angka III?

- Ada tiga atom besi dalam satu satuan rumus.
- Ada tiga atom oksigen dalam satu satuan rumus.
- Muatan (bilangan oksidasi) ion besi adalah +3.
- Besi berada di golongan III tabel periodik.

Jawabannya: muatan ion besi +3. Besi bisa membentuk $\mathrm{Fe^{2+}}$ atau $\mathrm{Fe^{3+}}$, jadi namanya harus memberi tahu yang mana. Rumusnya $\mathrm{Fe_2O_3}$: hanya **dua** atom besi, walaupun angka Romawinya III. Bahwa jumlah O kebetulan tiga hanyalah kebetulan silang muatan, bukan arti angka Romawi.

Logam golongan 1 dan 2, aluminium, seng, dan perak hampir selalu bermuatan tunggal, jadi namanya tidak perlu angka Romawi. Banyak logam transisi (dan timah serta timbal) punya lebih dari satu muatan. Untuk mereka, **muatan ion ditulis dengan angka Romawi dalam kurung**, menempel pada nama logam (sistem Stock).

Ion	Nama IUPAC	Nama lama	Contoh senyawa
$\mathrm{Fe^{2+}}$	besi(II)	fero	$\mathrm{FeSO_4}$ besi(II) sulfat, tablet tambah darah
$\mathrm{Fe^{3+}}$	besi(III)	feri	$\mathrm{Fe_2O_3}$ besi(III) oksida, karat dan hematit
$\mathrm{Cu^{+}}$	tembaga(I)	kupro	$\mathrm{Cu_2O}$ tembaga(I) oksida, endapan merah bata
$\mathrm{Cu^{2+}}$	tembaga(II)	kupri	$\mathrm{CuSO_4}$ tembaga(II) sulfat, terusi
$\mathrm{Sn^{2+}}$	timah(II)	stano	$\mathrm{SnF_2}$ timah(II) fluorida, pasta gigi
$\mathrm{Sn^{4+}}$	timah(IV)	stani	$\mathrm{SnO_2}$ timah(IV) oksida, kasiterit
$\mathrm{Pb^{2+}}$	timbal(II)	plumbo	$\mathrm{PbI_2}$ timbal(II) iodida, "hujan emas"

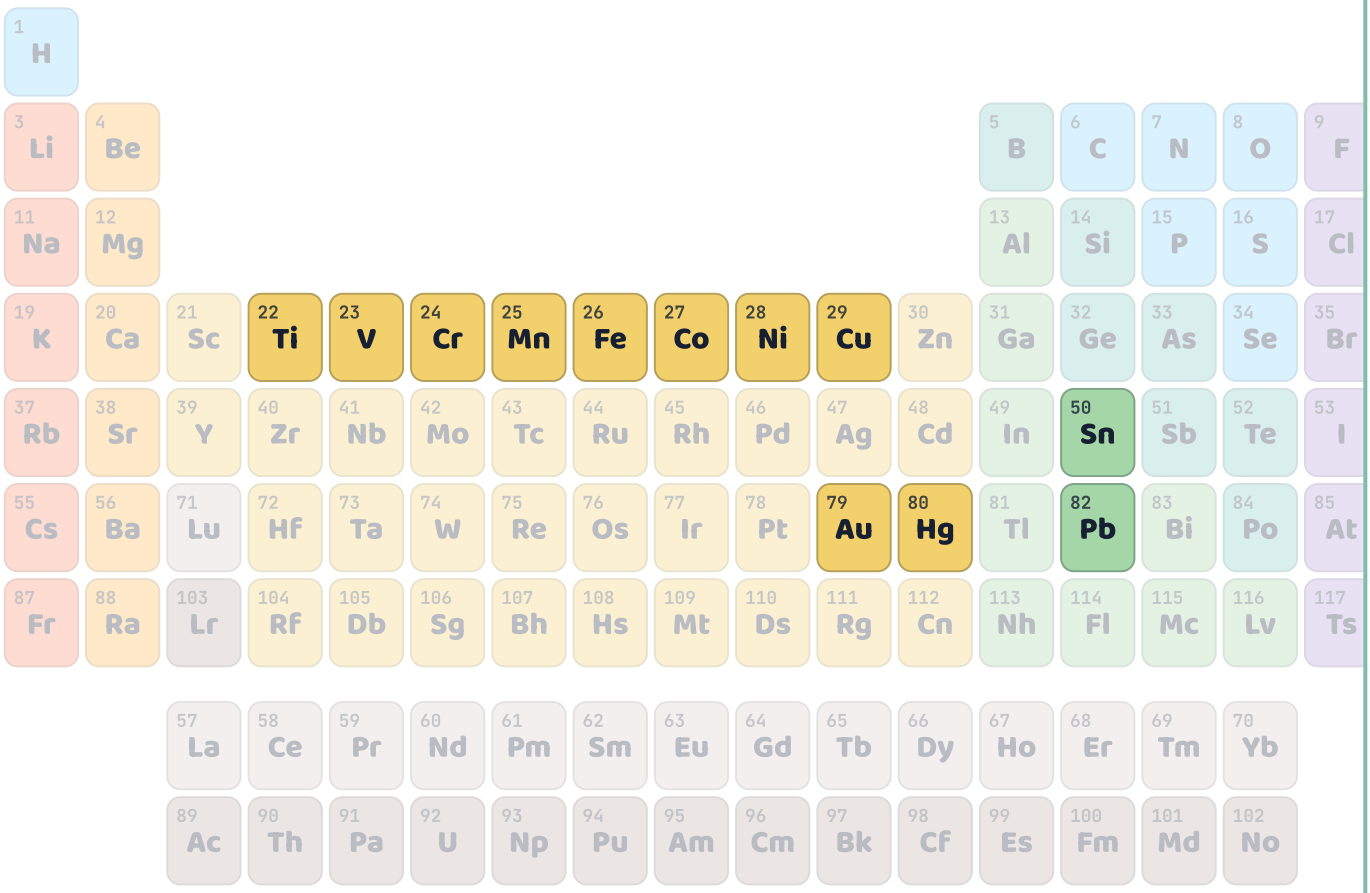
⚠ **AWAS JEBAKAN**

Angka Romawi menunjukkan **muatan ion logam**, bukan jumlah atom. Untuk menemukannya dari rumus, hitung mundur dari anion: dalam $\mathrm{FeCl_3}$, tiga $\mathrm{Cl^-}$ bermuatan total −3, jadi besi +3 → besi(III) klorida. Dalam $\mathrm{Cu_2O}$, satu $\mathrm{O^{2-}}$ diimbangi dua tembaga, masing-masing +1 → tembaga(I) oksida, bukan tembaga(II)!

TABEL PERIODIK HIDUP

Siapa yang butuh angka Romawi?

Warnai menurut Kategori



Logam alkali · Logam alkali tanah · Logam transisi · Logam pascatransisi · Metaloid
Nonlogam · Halogen · Gas mulia · Lantanida · Aktinida

Unsur yang menyala umumnya bisa membentuk lebih dari satu ion, jadi namanya butuh angka Romawi. Ketuk unsurnya dan lihat baris "bilangan oksidasi umum". Bandingkan dengan **Na**, **Mg**, **Al**, dan **Zn** yang muatannya tunggal.

ID

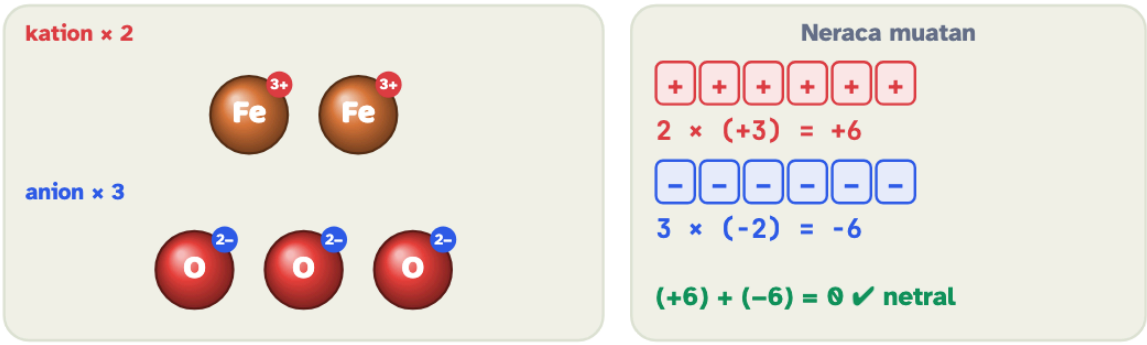
KIMIA NUSANTARA · TIMAH DARI BANGKA

Bangka-Belitung adalah salah satu penghasil timah terbesar di dunia. Bijihnya, **kasiterit**, adalah **timah(IV) oksida**, $\mathrm{SnO_2}$: muatan $\mathrm{Sn^{4+}}$ diimbangi dua $\mathrm{O^{2-}}$. Kasiterit dilebur bersama karbon menjadi logam timah untuk solder elektronik dan pelapis kaleng. Nama IUPAC-nya yang lengkap, timah(IV) oksida, membedakannya dari timah(II) oksida, SnO, yang hitam.

LAB MINI Mesin Nama: rakit kation dan anion

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-15

Rakit ion sampai muatan totalnya nol



Fe_2O_3

besi(III) oksida

nama lama: feri oksida

Karat dan bijih hematit.

Rumus	Nama IUPAC	Skor tebakan
Fe_2O_3	besi(III) oksida	0 / 0

Mode **Rakit**: pilih satu kation dan satu anion. Mesin menyusun ion-ion sampai muatannya nol, lalu menulis rumus dan nama IUPAC-nya (lengkap dengan angka Romawi). Coba Fe^{3+} + O^{2-}, lalu Fe^{2+} + O^{2-}. Mode **Tebak nama** dan **Tebak rumus**: ketuk jawaban yang benar. Bisakah kamu benar lima kali berturut-turut?

CONTOH Memberi nama dari rumus

Tuliskan nama IUPAC: (a) $MgCl_2$, (b) Fe_2O_3, (c) $(NH_4)_2SO_4$.

1. (a) Mg (golongan 2) selalu +2, tidak perlu Romawi. Cl^- = klorida. → **magnesium klorida**.
2. (b) Besi bermuatan ganda, jadi hitung muatannya: 3 × (−2) = −6 dibagi 2 atom Fe → +3. → **besi(III) oksida**.
3. (c) Dua ion poliatom: NH_4^+ amonium dan SO_4^{2-} sulfat. → **amonium sulfat** (pupuk ZA).

Magnesium klorida, besi(III) oksida, amonium sulfat. Perhatikan: tidak ada awalan "di-" atau "tri-" pada nama senyawa ion.

KERJAKAN BERSAMA **Dari nama ke rumus**

Tuliskan rumus kimia: (a) kalsium fosfat, mineral utama tulang; (b) timah(IV) oksida, bijih timah Bangka.

1. (a) Ion: Ca^{2+} dan $PO_4{}^{3-}$. Silangkan: 3 Ca dan 2 PO_4.
2. Cek: 3 × (+2) + 2 × (–3) = 0 ✔. Beri kurung pada fosfat → $Ca_3(PO_4)_2$.
3. (b) Angka Romawi IV berarti Sn^{4+}; oksida = O^{2-}. Silang: Sn_2O_4.
4. Sederhanakan 2 : 4 = 1 : 2 → SnO_2.

(a) $Ca_3(PO_4)_2$; (b) SnO_2. Langkah menyederhanakan sering terlupa. Sn_2O_4 bukan rumus yang benar untuk senyawa ion.

15.4 Senyawa kovalen biner: awalan "satu, dua, tiga" ala Yunani

Tebak Dulu!

CO dinamai karbon monoksida, dengan awalan "mono-". Mengapa NaCl tidak dinamai "natrium monoklorida"?

- Karena natrium adalah logam yang lebih penting daripada karbon.
- Karena NaCl senyawa ion: perbandingan ionnya sudah pasti dari muatan, jadi awalan tidak perlu.
- Karena "monoklorida" terlalu panjang untuk ditulis di label garam.
- Sebenarnya keduanya benar dan sama-sama dipakai IUPAC.

Jawabannya: karena NaCl senyawa ion. Na^+ dan Cl^- hanya bisa bergabung 1 : 1, jadi nama "natrium klorida" sudah cukup jelas. Karbon dan oksigen adalah dua nonlogam yang bisa bergabung dengan banyak cara (CO, CO_2, bahkan C_3O_2), sehingga jumlah atomnya harus disebut lewat awalan.

Senyawa kovalen biner tersusun atas dua unsur nonlogam yang berbagi elektron, misalnya karbon dan oksigen, atau nitrogen dan oksigen. Karena dua nonlogam bisa bergabung dalam berbagai perbandingan, namanya memakai **awalan angka Yunani**.

Jumlah	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Awalan	mono	di	tri	tetra	penta	heksa	hepta	okta	nona	deka

ATURAN · MENAMAI SENYAWA KOVALEN BINER

1. Unsur yang lebih ke kiri/bawah di tabel periodik (kurang elektronegatif) ditulis dan disebut dulu. Urutan IUPAC: B, Si, C, P, N, H, S, I, Br, Cl, O, F.
2. Unsur kedua diberi akhiran **-ida**: oksida, klorida, fluorida, sulfida.
3. Jumlah atom setiap unsur dinyatakan dengan awalan. Awalan **mono- tidak dipakai** untuk unsur pertama: CO = karbon monoksida, bukan monokarbon monoksida.
4. Huruf vokal ganda yang canggung boleh dilebur: mono + oksida = **monoksida**.

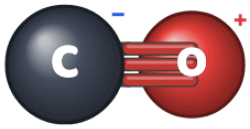
Rumus	Nama IUPAC	Cerita singkat
CO	karbon monoksida	gas tak berbau dari knalpot dan genset; mengikat hemoglobin
CO_2	karbon dioksida	gelembung minuman bersoda, es kering
N_2O	dinitrogen oksida (dinitrogen monoksida)	"gas tawa", pembius ringan
NO_2	nitrogen dioksida	gas cokelat penyebab kabut kota
N_2O_4	dinitrogen tetraoksida	oksidator bahan bakar roket
SO_2	belerang dioksida	gas menyengat dari kawah Ijen
SO_3	belerang trioksida	bahan pembuat asam sulfat
CCl_4	karbon tetraklorida	pelarut lama yang kini dilarang
PCl_5	fosforus pentaklorida	pereaksi di laboratorium organik
SF_6	belerang heksafluorida	gas isolator di gardu listrik
P_4O_{10}	tetrafosforus dekaoksida	pengering yang sangat rakus air
SiO_2	silikon dioksida	pasir kuarsa, bahan kaca

Beberapa senyawa kovalen sudah begitu terkenal sehingga IUPAC tetap memakai nama umumnya: H_2O **air**, NH_3 **amonia**, CH_4 **metana**. Senyawa hidrogen dengan halogen dinamai "hidrogen ...ida": HCl hidrogen klorida (dalam

bentuk gas).

MOLEKUL 3D

Awalan Yunani dalam 3D



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Karbon monoksida CO

Mr ≈ 28,01

Ikatan rangkap tiga (dua kovalen biasa + satu kovalen koordinasi dari O), panjang 113 pm. Gas tak berbau dan beracun dari pembakaran tidak sempurna; mengikat hemoglobin lebih kuat daripada O_2.

Pilih molekul, lalu cocokkan jumlah atomnya dengan awalan pada namanya: karbon **mono**ksida (1 O), **di**nitrogen **tetra**oksida (2 N, 4 O), belerang **heksa**fluorida (6 F). Ketuk tiga atom F pada SF_6 untuk mengukur sudut F–S–F. Berapa derajat?

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Awalan jumlah **hanya** untuk senyawa kovalen dari dua nonlogam. Al_2O_3 adalah aluminium oksida, bukan "dialuminium trioksida". Sebaliknya, N_2O_4 **wajib** berawalan: "nitrogen oksida" saja bisa berarti NO, NO_2, N_2O, atau N_2O_5.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · MENGHAFAL AWALAN**

Kamu sudah mengenal awalan ini dari kata sehari-hari: **mono**rel (satu rel), **di**oda, **tri**sula, **tetra**pod pemecah ombak (4 kaki), **penta**gon (5 sisi), **heksa**gon sarang lebah, **okta**f (8 nada), **deka**de (10 tahun). Kimo menambahkan: "**Hepta** = 7, seperti heptathlon, lomba tujuh cabang!"

KERJAKAN BERSAMA **Kovalen biner: dua arah**

(a) Tuliskan rumus difosforus pentaoksida dan belerang heksafluorida. (b) Beri nama Cl_2O_7 dan CS_2.

1. (a) di = 2 P, penta = 5 O → P_2O_5. Heksa = 6 F, tanpa awalan pada belerang (berarti 1) → SF_6.
2. (b) Cl_2O_7: 2 Cl = di, 7 O = hepta → diklorin heptaoksida.
3. CS_2: 1 C (tanpa mono), 2 S = di, unsur kedua berakhiran -ida → karbon disulfida.

P_2O_5, SF_6, diklorin heptaoksida, karbon disulfida. Cek silang: biloks Cl dalam Cl_2O_7 = +7, sama dengan Cl dalam perklorat.

KIMIA NUSANTARA · API BIRU DAN ASAP KUNING DI IJEN

Di kawah Ijen, Banyuwangi, gas vulkanik yang kaya belerang menyala biru di malam hari. Saat terbakar, belerang menjadi **belerang dioksida**, SO_2, gas menyengat yang membuat mata pedih. Para penambang memikul bongkahan belerang kuning dari pipa-pipa di tepi danau kawah, sering hanya bermasker kain basah. Nama "dioksida" langsung memberi tahu: satu atom S, dua atom O.

15.5 Asam, basa, garam, dan hidrat

Banyak zat di dapur dan di laboratorium termasuk salah satu dari tiga keluarga besar: asam, basa, dan garam. Masing-masing punya pola nama yang khas. (Sifat asam-basa dibahas tuntas di Bab 26.)

Asam: "asam" + nama anionnya

Menurut Arrhenius, **asam** adalah zat yang melepaskan ion H^+ dalam air. Rumusnya biasanya diawali H, dan namanya cukup dibentuk dari kata "asam" ditambah nama anionnya.

Rumus	Anion	Nama asam	Di sekitar kita
HCl	Cl^- klorida	asam klorida	cairan lambung, pembersih porselen
H_2S	S^{2-} sulfida	asam sulfida	bau telur busuk di sumber air panas
HNO_3	NO_3^- nitrat	asam nitrat	bahan pupuk dan bahan peledak tambang
H_2SO_4	SO_4^{2-} sulfat	asam sulfat	air aki
H_3PO_4	PO_4^{3-} fosfat	asam fosfat	pengasam minuman bersoda

H_2CO_3	CO_3^{2-} karbonat	asam karbonat	terbentuk saat CO_2 larut dalam minuman bersoda
CH_3COOH	CH_3COO^- asetat	asam asetat (asam etanoat)	cuka, kuah cuko pempek
$HClO$	ClO^- hipoklorit	asam hipoklorit	pembunuh kuman pada air berkaporit
$H_2C_2O_4$	$C_2O_4^{2-}$ oksalat	asam oksalat	belimbing wuluh, pembersih noda karat

SATU RUMUS, DUA NAMA

$HCl(g)$ berupa gas disebut **hidrogen klorida** (senyawa kovalen). Setelah larut dalam air, $HCl(aq)$ disebut **asam klorida**, karena di air ia melepaskan H^+. Wujud zat ikut menentukan namanya!

MOLEKUL 3D

Asam-asam di sekitarmu



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Hidrogen klorida ClH

Mr ≈ 36,46 PubChem ↗

Larutannya adalah asam klorida; asam lambung kita mengandung HCl.

Kebanyakan atom H yang "asam" terikat pada atom O. Hitung: asam sulfat punya berapa H seperti itu? Asam asetat punya 4 atom H, tetapi hanya 1 yang lepas sebagai H^+. Temukan yang mana dengan memutar molekulnya.

Basa: nama logam + "hidroksida"

Basa Arrhenius melepaskan ion $\mathrm{OH^-}$ dalam air. Kebanyakan basa adalah senyawa ion logam dengan hidroksida, jadi namanya mengikuti aturan senyawa ion: NaOH natrium hidroksida (soda api), KOH kalium hidroksida, $\mathrm{Ca(OH)_2}$ kalsium hidroksida (kapur sirih), $\mathrm{Mg(OH)_2}$ magnesium hidroksida dan $\mathrm{Al(OH)_3}$ aluminium hidroksida (obat maag), $\mathrm{Fe(OH)_3}$ besi(III) hidroksida (endapan cokelat kemerahan). Amonia dalam air, $\mathrm{NH_3\,(aq)}$, sering diberi label "amonium hidroksida".

Garam: kation dari basa, anion dari asam

Bila asam bereaksi dengan basa, terbentuk air dan **garam**, yaitu senyawa ion yang kationnya berasal dari basa dan anionnya dari asam. Contohnya $\mathrm{HCl + NaOH \longrightarrow NaCl + H_2O}$. Namanya mengikuti aturan senyawa ion: kalium nitrat $\mathrm{KNO_3}$, amonium sulfat $\mathrm{(NH_4)_2SO_4}$, kalsium karbonat $\mathrm{CaCO_3}$. Garam yang masih membawa H dari asamnya diberi kata "hidrogen": $\mathrm{NaHCO_3}$ **natrium hidrogen karbonat** (soda kue), $\mathrm{NaH_2PO_4}$ natrium dihidrogen fosfat.

Hidrat: garam yang membawa air

Kristal beberapa garam menjebak molekul air di dalam kisinya. Air ini disebut **air kristal**, dan garamnya disebut **hidrat**. Dalam rumus, air kristal ditulis setelah titik tengah; dalam nama, jumlahnya disebut dengan awalan Yunani + "hidrat".

$$\mathrm{CuSO_4 \cdot 5\,H_2O} \quad \longrightarrow \quad \text{tembaga(II) sulfat } \mathbf{penta}\text{hid}$$

Rumus	Nama IUPAC	Nama dagang / kegunaan
$\mathrm{CuSO_4 \cdot 5\,H_2O}$	tembaga(II) sulfat pentahidrat	terusi, kristal biru untuk kolam
$\mathrm{MgSO_4 \cdot 7\,H_2O}$	magnesium sulfat heptahidrat	garam inggris
$\mathrm{CaSO_4 \cdot 2\,H_2O}$	kalsium sulfat dihidrat	gips, batu tahu
$\mathrm{Na_2CO_3 \cdot 10\,H_2O}$	natrium karbonat dekahidrat	soda kristal, soda cuci
$\mathrm{KAl(SO_4)_2 \cdot 12\,H_2O}$	kalium aluminium sulfat dodekahidrat	tawas
$\mathrm{CoCl_2 \cdot 6\,H_2O}$	kobalt(II) klorida heksahidrat	penanda basah pada silika gel lama (biru → merah muda)

Saat terusi biru dipanaskan, air kristalnya menguap dan tersisa serbuk putih $\mathrm{CuSO_4}$ anhidrat ("tanpa air"). Teteskan air, warna birunya kembali! Di Bab 17 kamu akan menghitung jumlah air kristal dari data penimbangan.

COBA SENDIRI **Membongkar hidrat garam inggris**

Sebungkus garam inggris berlabel $\mathrm{MgSO_4 \cdot 7\,H_2O}$. (a) Tuliskan nama IUPAC-nya. (b) Berapa jumlah atom O dan atom H dalam satu satuan rumus? (c) Berapa biloks S?

1. (a) $\mathrm{Mg^{2+}}$ (tanpa Romawi) + $\mathrm{SO_4^{2-}}$ sulfat + 7 air = hepta → **magnesium sulfat heptahidrat**.
2. (b) Atom O: 4 (dari sulfat) + 7 × 1 (dari air) = 11. Atom H: 7 × 2 = 14.
3. (c) Dalam $\mathrm{SO_4^{2-}}$: $x + 4(-2) = -2$, jadi $x = +6$. Air kristal tidak mengubah biloks.

(a) Magnesium sulfat heptahidrat; (b) 11 atom O dan 14 atom H; (c) S = +6. Satu satuan rumus berisi 1 + 1 + 11 + 14 = 27 atom!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SEKILAS NAMA SENYAWA KOMPLEKS

Ion logam transisi bisa dikelilingi molekul atau ion lain (**ligan**) yang menyumbangkan pasangan elektron, membentuk **ion kompleks** yang ditulis dalam kurung siku. Aturan singkatnya:

- Ligan disebut dulu (berurutan abjad), lalu logamnya, lalu biloks logam dalam angka Romawi. Ligan netral: $\mathrm{NH_3}$ **amin**, $\mathrm{H_2O}$ **akua**; ligan anion berakhiran -ido: $\mathrm{Cl^-}$ **klorido**, $\mathrm{CN^-}$ **sianido**.
- $\mathrm{[Cu(NH_3)_4]SO_4}$ = **tetraamintembaga(II) sulfat**, larutan biru tua yang memukau di laboratorium.
- Bila ion kompleksnya bermuatan negatif, nama logam berakhiran **-at**, sering dari akar Latin: $\mathrm{K_4[Fe(CN)_6]}$ = **kalium heksasianidoferat(II)**. Zat ini dipakai sebagai antigumpal pada sebagian garam dapur. Sianidanya terikat sangat kuat pada besi, sehingga tidak berbahaya pada kadar yang diizinkan.

15.6 Nama dagang ↔ nama IUPAC: membaca label di warung

Kembali ke kisah Bima. Di toko, orang memakai **nama dagang** (nama sehari-hari) yang berbeda-beda antardaerah: soda kue, soda api, kapur sirih, terusi. Di laboratorium, apotek, dan BPOM, semua orang memakai **nama IUPAC** yang sama di seluruh dunia. Kemampuan menerjemahkan keduanya bisa menyelamatkan nyawa.



Sebagian label menulis nama kimia (cuka, soda kue, pemutih, garam beryodium), sebagian hanya nama dagang (kapur sirih). Bisakah kamu menuliskan rumus dan nama IUPAC keenamnya? Jawabannya ada di tabel berikut.

Nama dagang	Rumus	Nama IUPAC	Dipakai untuk
Garam dapur	NaCl	natrium klorida	bumbu, pengawet ikan asin
Cuka	$\mathrm{CH_3COOH}$	asam asetat (asam etanoat)	acar, kuah cuko pempek (diencerkan)
Soda kue	$\mathrm{NaHCO_3}$	natrium hidrogen karbonat	pengembang kue, obat maag
Soda api (soda kaustik)	NaOH	natrium hidroksida	pembuatan sabun, pembersih saluran; **korosif!**
Soda abu	$\mathrm{Na_2CO_3}$	natrium karbonat	deterjen, kaca, bahan air abu (air ki) untuk mi kuning
Batu kapur / gamping, kapur tulis	$\mathrm{CaCO_3}$	kalsium karbonat	semen, penetral tanah asam (banyak kapur tulis modern dibuat dari gips)
Kapur tohor (kapur hidup)	CaO	kalsium oksida	bahan bangunan; sangat panas bila disiram air
Kapur sirih (kapur mati)	$\mathrm{Ca(OH)_2}$	kalsium hidroksida	nginang, merenyahkan keripik, air kapur
Tawas	$\mathrm{KAl(SO_4)_2 \cdot 12\,H_2O}$	kalium aluminium sulfat dodekahidrat	penjernih air, deodoran

Garam inggris	$\mathrm{MgSO_4 \cdot 7\,H_2O}$	magnesium sulfat heptahidrat	garam berendam, pencahar (dengan anjuran dokter)
Pemutih pakaian	NaClO (larutan ±5%)	natrium hipoklorit	pemutih dan disinfektan; sering ditulis NaOCl
Kaporit	$\mathrm{Ca(ClO)_2}$	kalsium hipoklorit	disinfektan air sumur dan kolam renang
Terusi	$\mathrm{CuSO_4 \cdot 5\,H_2O}$	tembaga(II) sulfat pentahidrat	pembasmi lumut kolam, fungisida
Garam beryodium	$\mathrm{NaCl + KIO_3}$	natrium klorida + kalium iodat	mencegah gondok
Gips / batu tahu	$\mathrm{CaSO_4 \cdot 2\,H_2O}$	kalsium sulfat dihidrat	penggumpal tahu, pembalut patah tulang
Pupuk ZA	$\mathrm{(NH_4)_2SO_4}$	amonium sulfat	pupuk nitrogen dan belerang
Sendawa	$\mathrm{KNO_3}$	kalium nitrat	pupuk, bahan mesiu (sejarah)
Nisadar (salmiak)	$\mathrm{NH_4Cl}$	amonium klorida	baterai kering, fluks patri
Boraks (bleng)	$\mathrm{Na_2B_4O_7 \cdot 10\,H_2O}$	natrium tetraborat dekahidrat	**dilarang** untuk pangan (bakso, kerupuk)
Karbit	$\mathrm{CaC_2}$	kalsium karbida	las karbit; menghasilkan gas asetilena
Es kering	$\mathrm{CO_2\,(s)}$	karbon dioksida padat	pendingin es krim dan efek kabut panggung
Gas tawa	$\mathrm{N_2O}$	dinitrogen oksida	pembius ringan
Air aki (air zuur, tutup merah)	$\mathrm{H_2SO_4\,(aq)}$	asam sulfat encer	elektrolit aki basah

KIMIA NUSANTARA · KIMIA DI RAK WARUNG

Hampir semua warung di Indonesia adalah "toko kimia" kecil. Ada **cuka** (asam asetat), **garam beryodium** yang wajib mengandung **kalium iodat** agar penduduk tidak kekurangan yodium, **kapur sirih** untuk nginang dan merenyahkan keripik, **pemutih** (natrium hipoklorit), serta di toko pertanian ada **terusi** untuk kolam ikan dan pupuk ZA. Beberapa nama dagang bahkan berasal dari bahasa Belanda: "ZA" dari *zwavelzure ammoniak* (amonium sulfat), dan "air zuur" untuk air aki (*zuur* = asam).

⚠️ **KESELAMATAN**

Soda api ($NaOH$) dan pemutih ($NaClO$) bersifat **korosif**. Untuk tugas di bab ini, cukup **baca dan foto labelnya**: jangan membuka, mencium, mencicipi, atau menuangnya. **Jangan pernah mencampur pemutih dengan pembersih lain**: campuran dengan pembersih porselen yang berisi asam atau dengan pembersih beramonia melepaskan gas beracun. Simpan keduanya di tempat tinggi, jauh dari jangkauan anak dan jauh dari bahan makanan.



Korosif



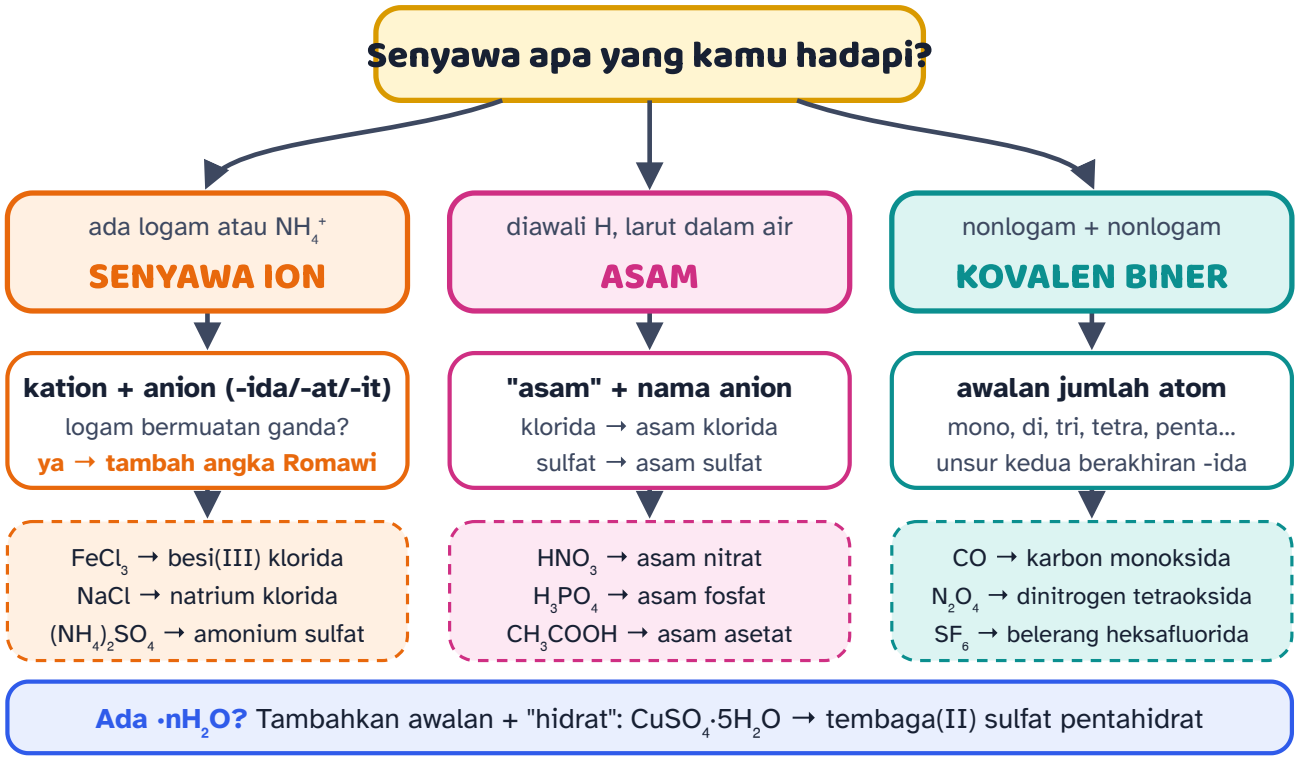
Iritan



Bahaya lingkungan

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Sebelum 1787, nama zat kimia kacau. Asam sulfat disebut "minyak vitriol", seng oksida "bunga seng", dan terusi "vitriol biru". Pada 1787, **Antoine Lavoisier** bersama Guyton de Morveau, Berthollet, dan Fourcroy menerbitkan *Méthode de nomenclature chimique*: nama zat harus mencerminkan penyusunnya. Itulah cikal bakal nama IUPAC. Namun nama dagang tetap bertahan. "Garam inggris", misalnya, berasal dari mata air pahit di kota Epsom, Inggris, yang terkenal sejak abad ke-17. Kristalnya ternyata magnesium sulfat heptahidrat.



Peta keputusan tata nama. Mulai dari atas: kenali jenis senyawanya dulu, baru pilih aturan namanya.

MITOS

"Soda kue, soda abu, dan soda api sama-sama soda, jadi sama saja."

FAKTA

Berbeda jauh! Soda kue $NaHCO_3$ aman untuk kue, soda abu Na_2CO_3 basa untuk deterjen, soda api $NaOH$ sangat korosif. Baca rumusnya, bukan nama dagangnya.

MITOS

"Angka III pada besi(III) oksida berarti ada tiga atom besi."

FAKTA

Angka Romawi adalah muatan ion logam, yaitu Fe^{3+}. Rumusnya Fe_2O_3: hanya dua atom besi.

MITOS

"Huruf besar atau kecil dalam rumus tidak penting."

FAKTA

Sangat penting! Co adalah kobalt (logam), CO adalah karbon monoksida (gas beracun). NO adalah nitrogen monoksida, No adalah unsur nobelium.

MITOS

"Mencampur pemutih dengan pembersih lain membuat cucian lebih bersih."

FAKTA

Berbahaya! Pemutih yang bercampur pembersih berisi asam atau amonia melepaskan gas beracun. Pakai satu produk saja, dan bilas bersih sebelum memakai produk lain.

COBA SENDIRI **Detektif label: kaporit**

Di toko bangunan, Laras menemukan sekarung serbuk berlabel "Kaporit 60%, kalsium hipoklorit. Jangan dicampur dengan asam." (a) Tuliskan rumus kalsium hipoklorit. (b) Tentukan biloks Cl. (c) Hitung M_r-nya (Ar Ca = 40, Cl = 35,5, O = 16). (d) Mengapa ada peringatan "jangan dicampur dengan asam"?

1. (a) Ion: $\mathrm{Ca^{2+}}$ dan hipoklorit $\mathrm{ClO^-}$. Silang: 1 Ca, 2 ClO → $\mathrm{Ca(ClO)_2}$.
2. (b) Dalam $\mathrm{ClO^-}$: $x + (-2) = -1$, sehingga $x = +1$.
3. (c) $M_r = 40 + 2(35{,}5 + 16) = 40 + 103 = 143$.
4. (d) Hipoklorit mengandung klorin berbiloks +1 yang siap menerima elektron. Bila bertemu asam, terbentuk gas klorin ($\mathrm{Cl_2}$) yang beracun, terutama di ruang tertutup.

(a) $\mathrm{Ca(ClO)_2}$; (b) +1; (c) 143; (d) agar tidak terbentuk gas klorin beracun. Satu label, empat konsep kimia: rumus, biloks, Mr, dan keselamatan!

Kimia di sekitarmu



Garam beryodium

Kalium iodat, $\mathrm{KIO_3}$, dicampurkan ke garam dapur untuk mencegah gondok dan membantu perkembangan otak anak.



Terusi di kolam ikan

Sejumput tembaga(II) sulfat pentahidrat membasmi lumut dan jamur. Dosisnya harus kecil, karena ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ berlebih justru meracuni ikan.



Kapur sirih & keripik renyah

Merendam irisan pisang atau singkong dalam air kapur sirih, $\mathrm{Ca(OH)_2}$, membuat keripik lebih renyah. Ion kalsium menguatkan dinding sel tumbuhan.

Air bersih PDAM

Aluminium sulfat, $Al_2(SO_4)_3$, menggumpalkan lumpur halus sehingga mengendap. Kaporit lalu membunuh kuman.

Tablet tambah darah

Tablet untuk remaja putri berisi besi(II) sulfat atau besi(II) fumarat. Angka Romawi II penting: tubuh menyerap Fe^{2+} lebih baik.

Tinta pemilu

Tinta di jari pemilih umumnya mengandung perak nitrat, $AgNO_3$. Ion Ag^+ bereaksi dengan kulit dan cahaya membentuk noda gelap yang bertahan berhari-hari.

Cek Cepat

Nama IUPAC CuO adalah ...

- tembaga oksida
- tembaga(I) oksida
- tembaga(II) oksida
- monotembaga monoksida

Rumus kimia kalsium nitrat adalah ...

- $Ca(NO_3)_2$
- $CaNO_3$
- Ca_2NO_3
- $Ca(NO_2)_2$

Nama senyawa SO_3 adalah ...

- sulfat
- belerang(III) oksida
- monobelerang trioksida
- belerang trioksida

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: kamus nama dagang ↔ IUPAC

Bahan: kemasan produk di dapur dan kamar mandi (cuka, soda kue, garam, pasta gigi, sabun, deterjen, pemutih), buku catatan, ponsel untuk memotret, tabel di subbab 15.3 dan 15.6.

1. Bersama orang dewasa, kumpulkan atau potret label 8 produk. Cari bagian "komposisi" atau "bahan aktif".
2. Catat setiap nama kimia yang tertulis, misalnya "natrium bikarbonat" atau "natrium fluorida".
3. Tuliskan rumus kimianya dan nama IUPAC yang tepat. Untuk ion, pakai tabel ion di subbab 15.3.
4. Kelompokkan: senyawa ion, kovalen, asam, basa, garam, hidrat, atau campuran.
5. Susun "kamus" dua kolom: nama dagang ↔ nama IUPAC, lengkap dengan piktogram bahaya yang kamu temukan.

Keselamatan: tugas ini hanya **membaca label**. Jangan membuka tutup, mencium, mencicipi, menuang, apalagi mencampur isi kemasan. Untuk pemutih, soda api, pembersih porselen, dan pestisida, cukup potret labelnya lalu kembalikan ke tempat penyimpanan yang tinggi. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Senyawa apa yang paling sering muncul di rumahmu? Adakah produk yang hanya menulis nama dagang tanpa nama kimia? Menurutmu, mengapa label yang lengkap penting bagi pembeli?

RINGKASAN KILAT

Bab 15 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membaca **lambang unsur** dan **rumus kimia**, serta membedakan rumus molekul, rumus empiris, dan rumus struktur
- menentukan **bilangan oksidasi** unsur dalam senyawa dan ion
- menulis rumus dan **nama IUPAC senyawa ion** (biner dan poliatom), termasuk **angka Romawi** untuk logam bermuatan ganda
- menamai **senyawa kovalen biner** dengan awalan mono-, di-, tri-, dan seterusnya

- menamai **asam, basa, garam, dan hidrat**, lalu menerjemahkan **nama dagang** di label produk menjadi nama IUPAC

🔑 Istilah kunci

lambang unsur · rumus kimia · indeks · koefisien · Rumus molekul · Rumus empiris · Rumus struktur · bilangan oksidasi · Bilangan oksidasi · Valensi · kation · anion · Senyawa kovalen biner · awalan angka Yunani · asam · Basa

🧮 Rumus penting

$$N = k \times p \times q$$

Jumlah atom dalam rumus. Jumlah atom suatu unsur sama dengan koefisien dikali indeks di luar kurung dikali indeks di dalam kurung.

$$x = \frac{q - a\,(+1) - b\,(-2)}{n}$$

Bilangan oksidasi dari jumlah nol. Biloks unsur yang dicari sama dengan muatan total dikurangi sumbangan H dan sumbangan O, lalu dibagi jumlah atom unsur itu.

$$x = \frac{b}{\mathrm{FPB}(a,\,b)}, \qquad y = \frac{a}{\mathrm{FPB}(a,\,b)}$$

Silang muatan: berapa ion yang dibutuhkan?. Jumlah kation (x) adalah besar muatan anion, dan jumlah anion (y) adalah besar muatan kation, setelah keduanya dibagi faktor persekutuan terbesarnya.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Huruf besar dan kecil mengubah arti.
- Angka Romawi menunjukkan muatan ion logam, bukan jumlah atom.
- Awalan jumlah hanya untuk senyawa kovalen dari dua nonlogam.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=15

🧩 Teka-teki untuk Bab 16

Sekarang kamu sudah fasih "mengeja" zat. Saatnya merangkai kalimat kimia! Kayu bakar yang dibakar di tungku berubah menjadi abu yang jauh lebih ringan. Apakah massanya benar-benar hilang? Ke mana perginya?

▼ **Intip petunjuk**

Kayu tersusun atas senyawa C, H, dan O. Saat terbakar, kayu bereaksi dengan oksigen udara menjadi gas CO_2 dan uap air yang terbang ke udara. Bila semua gas itu ditangkap dan ditimbang, massa total sebelum dan sesudah reaksi ternyata sama. Inilah hukum kekekalan massa Lavoisier, dan cara menuliskannya sebagai **persamaan reaksi yang setara** adalah petualangan Bab 16.

BAB 16 · STOIKIOMETRI

16 Persamaan Reaksi: Tak Ada Atom yang Hilang

Lilin memendek, kayu menjadi abu, paku berkarat malah bertambah berat. Ke mana massa pergi, dan dari mana massa datang? Jawabannya tertulis dalam "kalimat" kimia yang disebut persamaan reaksi.

Setelah bab ini, kamu bisa

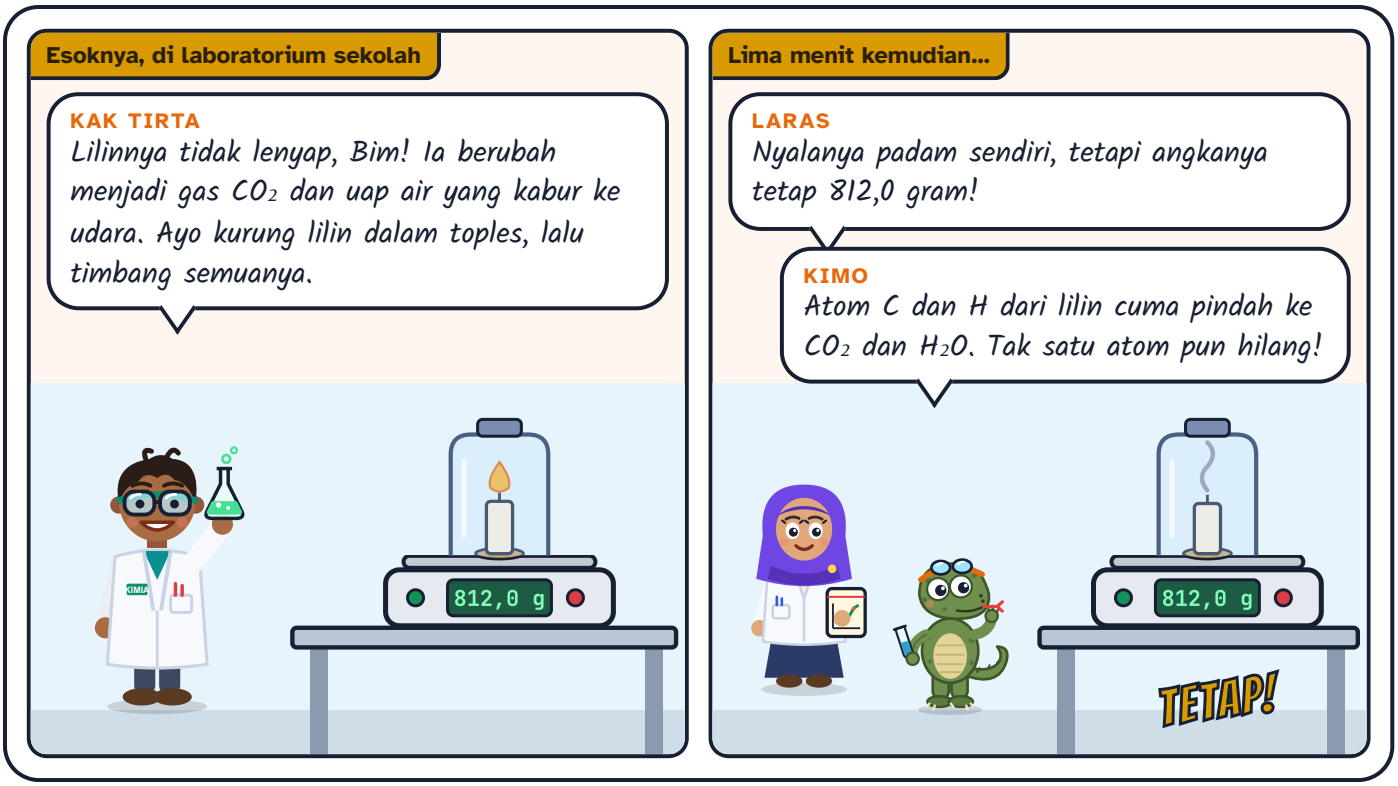
- menulis **persamaan reaksi** dari kalimat, lengkap dengan lambang wujud zat (s), (l), (g), (aq);
- **menyetarakan** persamaan reaksi dengan cara inspeksi dan cara aljabar, tanpa mengubah rumus zat;
- menjelaskan dan memakai **hukum Lavoisier**, **hukum Proust**, dan **hukum Dalton** untuk mengolah data massa;
- menghitung volume gas dengan **hukum Gay-Lussac** dan menjelaskannya dengan **hipotesis Avogadro**;
- menggolongkan **jenis reaksi** dan menulis **persamaan ion bersih**.

LILIN YANG MENYUSUT

KOMIK · 4 PANEL







Tebak Dulu!

Sebatang paku besi bermassa 10 g dibiarkan di udara lembap sampai berkarat. Karat tidak dikerok sedikit pun. Bagaimana massa paku berkarat itu?

- Lebih kecil dari 10 g, karena besinya "dimakan" karat.
- Tetap 10 g, karena massa selalu kekal.
- Lebih besar dari 10 g.
- Tidak bisa diperkirakan sama sekali.

Jawabannya: lebih besar. Karat terbentuk ketika besi mengikat oksigen dan uap air *dari udara*. Atom-atom dari udara itu ikut menempel di paku, sehingga massanya bertambah. Massa tetap kekal bila kita menghitung **semua** zat: besi + oksigen + air = karat. Bab ini membongkar teka-teki "massa hilang" dan "massa bertambah" seperti ini.

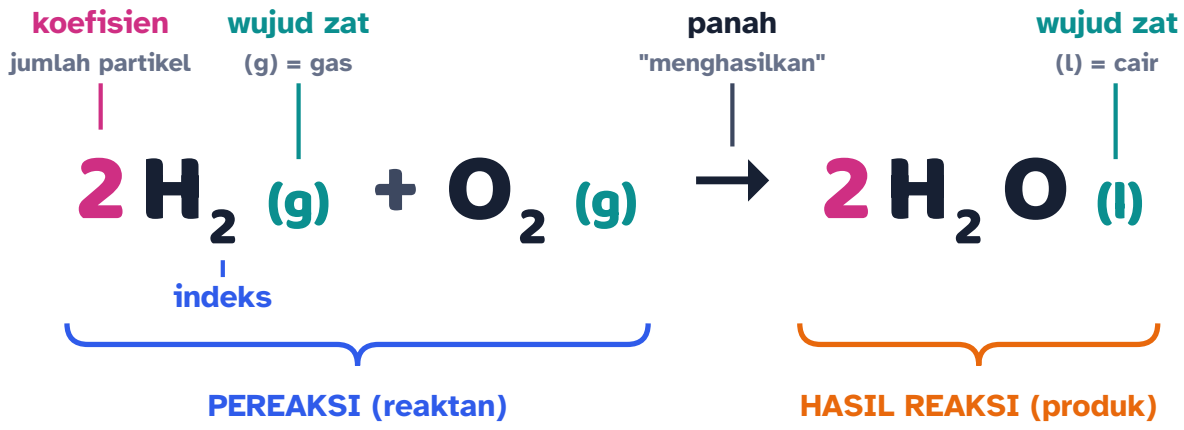
16.1 Menulis "kalimat" kimia

Setiap hari dapurmu menjadi panggung reaksi kimia. Gas LPG terbakar di kompor, adonan kue mengembang oleh soda kue, dan nasi yang dibiarkan berhari-hari menjadi basi. Pada setiap reaksi, **ikatan antaratom putus, lalu atom-atom itu berpasangan dengan cara baru**. Atomnya sendiri tidak dibuat dan tidak dimusnahkan; mereka hanya ditata ulang.

Bahasa sederhana · Bayangkan atom sebagai balok mainan. Reaksi kimia seperti membongkar rumah-rumahan dari balok, lalu menyusun balok yang sama menjadi mobil-mobilan. Bentuknya berubah, tetapi jumlah baloknya tetap. Persamaan reaksi adalah catatan "resep": balok apa yang dibongkar dan bangunan apa yang jadi.

Kimiawan menuliskan peristiwa itu sebagai **persamaan reaksi**. Zat di kiri panah disebut **pereaksi** (reaktan); zat di kanan panah disebut **hasil reaksi** (produk). Contohnya pembakaran metana, komponen utama gas alam dan biogas:

$$\mathrm{CH_4\,(g) + 2\,O_2\,(g) \longrightarrow CO_2\,(g) + 2\,H_2O\,(g)}$$



Anatomi sebuah persamaan reaksi. **Indeks** (angka kecil) adalah bagian dari rumus dan tidak boleh diubah. **Koefisien** (angka besar di depan) menyatakan perbandingan jumlah partikel dan boleh diubah untuk menyetarakan.

DEFINISI · PERSAMAAN REAKSI

Persamaan reaksi adalah cara menuliskan reaksi kimia memakai rumus kimia. Isinya: rumus pereaksi dan hasil reaksi, **koefisien** yang menyatakan perbandingan jumlah partikel, dan **lambang wujud zat**. Persamaan disebut **setara** bila jumlah setiap jenis atom (dan jumlah muatan listrik) di ruas kiri sama dengan di ruas kanan.

Lambang	Arti	Contoh
(s)	*solid*, padat	$\mathrm{NaCl\,(s)}$ garam dapur, $\mathrm{CaCO_3\,(s)}$ batu kapur
(l)	*liquid*, cair (zat murni)	$\mathrm{H_2O\,(l)}$ air, $\mathrm{Hg\,(l)}$ raksa, $\mathrm{C_2H_5OH\,(l)}$ etanol murni
(g)	*gas*	$\mathrm{O_2\,(g)}$, $\mathrm{CO_2\,(g)}$, $\mathrm{C_3H_8\,(g)}$ propana dalam LPG
(aq)	*aqueous*, larut dalam air	$\mathrm{NaCl\,(aq)}$ air garam, $\mathrm{CH_3COOH\,(aq)}$ cuka dapur

Ada pula tanda tambahan: $\mathrm{CaCO_3\,(s)} \xrightarrow{\Delta} \mathrm{CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$ (segitiga Δ di atas panah = dipanaskan), panah ke atas untuk gas yang keluar, $\mathrm{CO_2} \uparrow$, panah ke bawah untuk endapan, $\mathrm{AgCl} \downarrow$, dan panah bolak-balik untuk reaksi yang dapat berbalik arah, $\mathrm{N_2 + 3\,H_2 \rightleftharpoons 2\,NH_3}$ (dibahas di Bab 22).

TRIK KIMO · TUJUH UNSUR YANG SELALU BERPASANGAN

Tujuh unsur berupa molekul dwiatom bila berdiri sendiri: $\mathrm{H_2}$, $\mathrm{N_2}$, $\mathrm{O_2}$, $\mathrm{F_2}$, $\mathrm{Cl_2}$, $\mathrm{Br_2}$, $\mathrm{I_2}$. Cara mengingatnya: di tabel periodik, mulailah dari unsur nomor **7** (nitrogen), lalu "gambar" angka 7: N → O → F, kemudian turun ke Cl → Br → I. Tambahkan H, si mungil yang tinggal sendirian di pojok kiri atas.

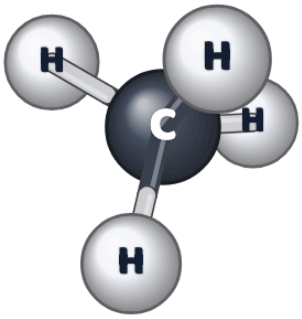
CONTOH **Dari kalimat ke persamaan**

Pita magnesium dibakar di udara. Ia menyala putih menyilaukan dan berubah menjadi serbuk putih magnesium oksida. Tuliskan persamaan reaksinya lengkap dengan wujud zat.

1. Tulis rumus setiap zat: magnesium $\mathrm{Mg\,(s)}$, gas oksigen $\mathrm{O_2\,(g)}$ (ingat, oksigen di udara berupa molekul dwiatom), magnesium oksida $\mathrm{MgO\,(s)}$.
2. Susun kerangkanya: $\mathrm{Mg\,(s) + O_2\,(g) \longrightarrow MgO\,(s)}$.
3. Hitung atom O: kiri 2, kanan 1. Tulis koefisien 2 di depan MgO. Sekarang Mg di kanan menjadi 2, jadi tulis 2 di depan Mg.
4. Periksa: Mg 2 = 2, O 2 = 2 ✓

$\mathrm{2\,Mg\,(s) + O_2\,(g) \longrightarrow 2\,MgO\,(s)}$**. Dua atom magnesium "memperebutkan" satu molekul oksigen, dan masing-masing mendapat satu atom O.**

MOLEKUL 3D **Atom yang sama, pasangan baru**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Metana CH_4 Mr ≈ 16,04 PubChem ↗

Tetrahedral sempurna (109,5°). Gas rumah kaca dari sawah, sampah, dan peternakan; komponen utama gas alam.

Pembakaran metana memutus ikatan C–H dan O=O, lalu membentuk ikatan C=O dan O–H yang baru. Putar setiap molekul dan hitung atomnya: satu CH_4 dan dua O_2 punya atom yang persis sama dengan satu CO_2 dan dua H_2O. Lihat juga asetilena dari karbit, etanol dari tapai, dan glukosa yang difermentasi. Ketuk C H O untuk kartu unsurnya.

16.2 Menyetarakan persamaan reaksi

Pada 1803, John Dalton mengajukan teori atom: dalam reaksi kimia, atom tidak diciptakan, tidak dimusnahkan, dan tidak berubah menjadi atom unsur lain. Akibatnya sederhana tetapi tegas: **jumlah setiap jenis atom di ruas kiri harus sama dengan di ruas kanan**. Persamaan yang memenuhinya disebut setara.

Tebak Dulu!

Bima ingin menyetarakan $H_2 + O_2 \longrightarrow H_2O$. Ia mengganti H_2O menjadi H_2O_2 supaya atom O di kanan juga 2. Bolehkah?

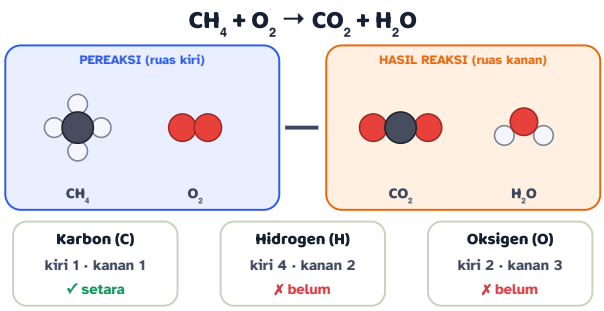
Boleh, karena jumlah atom H dan O sekarang sudah sama.

Tidak boleh, karena H_2O_2 adalah zat lain, bukan air.

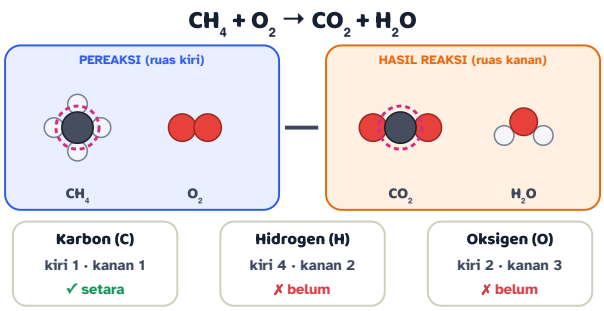
Boleh, asalkan ditulis lambang wujud zatnya.

Tidak boleh, karena angka di kanan tidak boleh lebih besar dari angka di kiri.

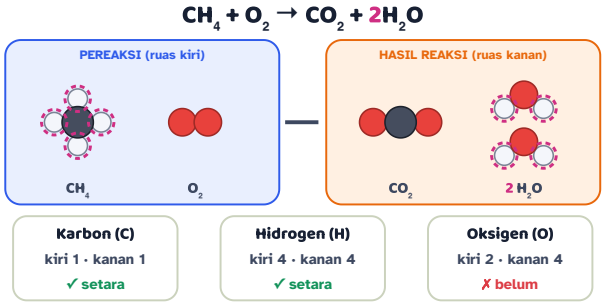
Jawabannya: tidak boleh. H_2O_2 adalah hidrogen peroksida, cairan pemutih dan antiseptik, bukan air yang kita minum. Mengubah indeks berarti mengganti zatnya. Yang boleh diubah hanyalah **koefisien**: $2\,H_2 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O$.



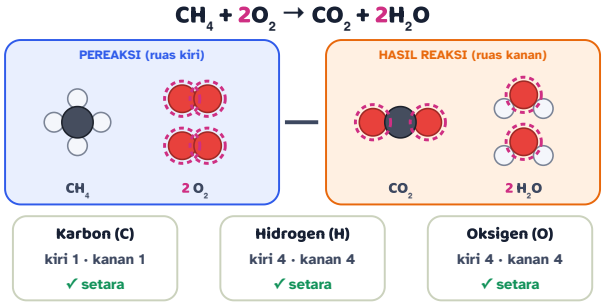
Langkah 1. Tulis dulu rumus yang benar: $CH_4 + O_2 \quad CO_2 + H_2O$. Gambar partikelnya, lalu hitung atom setiap unsur di kedua ruas. Karbon sudah sama, tetapi hidrogen dan oksigen belum.



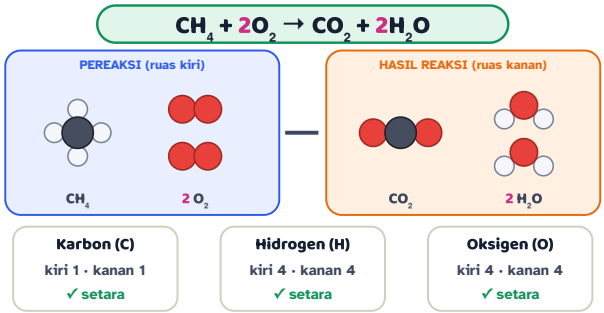
Langkah 2. Mulailah dari unsur yang hanya ada di satu zat pada setiap ruas: **karbon**. Kiri 1 atom C, kanan 1 atom C. Koefisien CH_4 dan CO_2 tetap 1.



Langkah 3. Berikutnya **hidrogen**: kiri 4, kanan baru 2. Tulis koefisien 2 di depan H_2O (indeksnya tidak diubah!). Muncul satu molekul air lagi. H sekarang 4 = 4, tetapi atom O di kanan menjadi 2 + 2 = 4.



Langkah 4. Oksigen paling akhir: kanan 4 atom O, kiri baru 2. Koefisien 2 di depan O_2 memberi 2 × 2 = 4 atom O. Satu molekul oksigen lagi masuk ke ruas kiri.



Langkah 5. Selesai: $CH_4 + 2\,O_2 \quad CO_2 + 2\,H_2O$. Kedua ruas sama-sama punya 1 C, 4 H, dan 4 O. Ikatan putus dan terbentuk, tetapi tidak ada atom yang muncul atau lenyap.

ATURAN · MENYETARAKAN DENGAN CARA INSPEKSI

1. Tulis rumus semua zat dengan benar. Setelah itu, rumus (indeks) **tidak boleh diubah** lagi.
2. Setarakan dulu unsur yang hanya muncul di satu zat pada setiap ruas (biasanya logam, lalu C).
3. Setarakan H, kemudian O paling akhir, karena keduanya sering muncul di banyak zat.
4. Boleh memakai koefisien pecahan sementara, lalu kalikan semua koefisien agar menjadi bilangan bulat.
5. Periksa ulang setiap unsur (dan muatan, bila ada ion). Koefisien akhir harus bilangan bulat **terkecil**.

TRIK KAK TIRTA

Ingat kata **MaCHO**: **M**etal (logam) dulu, lalu **C**, lalu **H**, dan **O** paling akhir. Gugus poliatom yang muncul utuh di kedua ruas, seperti SO_4, NO_3, atau PO_4, hitung sebagai satu "paket" saja. Untuk pembakaran hidrokarbon yang jumlah C-nya genap, jangan takut pecahan: $C_2H_6 + \frac{7}{2}\,O_2 \rightarrow 2\,CO_2 + 3\,H_2O$ itu sah, tinggal kalikan dua menjadi $2\,C_2H_6 + 7\,O_2 \longrightarrow 4\,CO_2 + 6\,H_2O$.

AWAS JEBAKAN

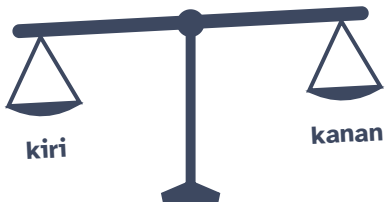
Koefisien mengalikan **seluruh** rumus di belakangnya, sedangkan indeks hanya berlaku untuk atom (atau kurung) tepat di depannya. Pada $3\,Ca(NO_3)_2$ ada 3 atom Ca, 3 × 2 = 6 atom N, dan 3 × 2 × 3 = 18 atom O. Koefisien juga **bukan** perbandingan massa: pada $2\,H_2 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O$, massa hidrogen yang bereaksi (4 bagian) jauh lebih kecil daripada massa oksigen (32 bagian).

PENYETARA REAKSI

Tingkat mudah: api, air, dan karat

− 1 + CH_4 + − 1 + O_2 → − 1 + CO_2 + − 1 + H_2O

Unsur	Kiri	Kanan	
C	1 ●	1 ●	✓
H	4 ○○○○	2 ○○	✗
O	2 ●●	3 ●●●	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Mulai dari pembakaran metana (gas kompor dan biogas), lalu air dari hidrogen, karat besi, magnesium yang menyala putih, amonia untuk pupuk, dan garam dapur. Tekan − / + pada koefisien. Tabel menghitung atom setiap unsur, dan timbangan miring ke ruas yang atomnya lebih banyak.

KERJAKAN BERSAMA

Pembakaran LPG

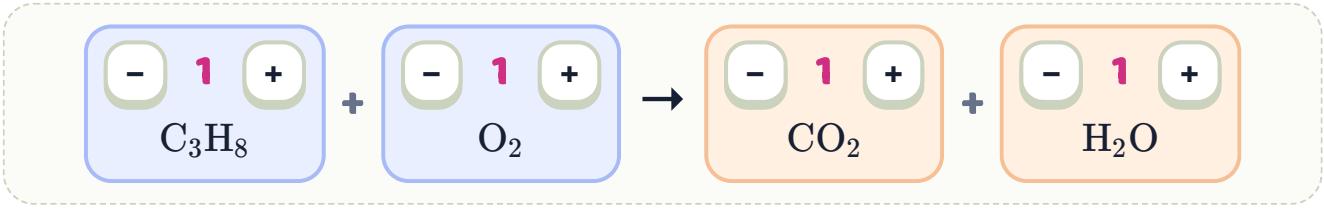
Tabung LPG berisi campuran propana (C_3H_8) dan butana. Setarakan reaksi pembakaran sempurna propana: $C_3H_8 + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$.

1. Karbon: kiri 3 atom C, jadi tulis 3 di depan CO_2.
2. Hidrogen: kiri 8 atom H, jadi tulis 4 di depan H_2O (4 × 2 = 8).
3. Oksigen di kanan sekarang 3 × 2 + 4 × 1 = 10 atom. Supaya kiri juga 10, tulis 5 di depan O_2.
4. Periksa: C 3 = 3, H 8 = 8, O 10 = 10 ✓

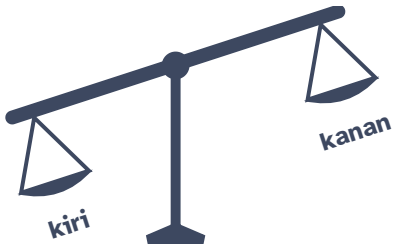
$C_3H_8\,(g) + 5\,O_2\,(g) \rightarrow 3\,CO_2\,(g) + 4\,H_2O\,(l)$**. Setiap molekul propana butuh lima molekul oksigen. Itulah sebabnya lubang udara kompor tidak boleh tertutup kotoran.**

PENYETARA REAKSI

Tingkat sedang: dapur, pasar, dan tanur



Unsur	Kiri	Kanan	
C	3 ●●●	1 ●	✕
H	8 ○○○○○○○○	2 ○○	✕
O	2 ●●	3 ●●●	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 7 null

LPG (propana), aluminium dalam asam yang menghasilkan gelembung hidrogen, fermentasi tapai, karbit, tanur tiup besi, butana pengisi korek gas, dan soda kue yang dipanaskan (rahasia kue yang mengembang). Untuk butana, coba cara pecahan dari Trik Kak Tirta.

KIMIA NUSANTARA · TAPAI, TUAK, DAN KARBIT

Ragi tapai berisi kapang dan khamir. Kapang memecah pati singkong atau beras ketan menjadi glukosa, lalu khamir mengubah glukosa menjadi etanol dan gas karbon dioksida: $\mathrm{C_6H_{12}O_6\,(aq)} \rightarrow 2\,\mathrm{C_2H_5OH\,(aq)} + 2\,\mathrm{CO_2\,(g)}$. Reaksi yang sama terjadi pada nira aren atau nira kelapa yang menjadi tuak, dan pada adonan roti yang mengembang karena gelembung $\mathrm{CO_2}$.

Karbit (kalsium karbida) bereaksi dengan air menghasilkan gas asetilena: $\mathrm{CaC_2\,(s)} + 2\,\mathrm{H_2O\,(l)} \rightarrow \mathrm{C_2H_2\,(g)} + \mathrm{Ca(OH)_2\,(aq)}$. Dulu gas ini dipakai untuk lampu karbit para penambang dan untuk mengelas. Di Pontianak, tradisi meriam karbit di tepi Sungai Kapuas menyambut Lebaran dan dikerjakan orang dewasa berpengalaman. Sebagian pedagang memakai karbit untuk mematangkan buah, tetapi cara ini **tidak dianjurkan**: karbit teknis dapat mengandung pengotor arsen dan fosfor. Karbit cukup kita pelajari lewat cerita, **bukan** untuk percobaan di rumah: asetilena sangat mudah terbakar dan dapat meledak.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

METODE ALJABAR: BIARKAN MATEMATIKA YANG MENYETARAKAN

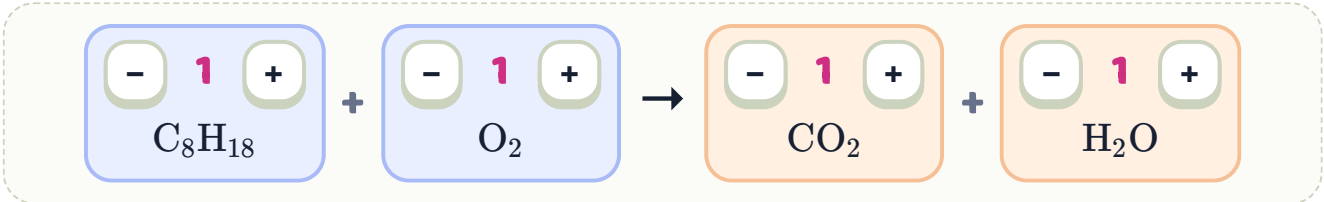
Beri setiap koefisien sebuah huruf, lalu tulis satu persamaan untuk setiap unsur. Untuk $a\,\mathrm{C_3H_8} + b\,\mathrm{O_2} \rightarrow c\,\mathrm{CO_2} + d\,\mathrm{H_2O}$: C: $3a = c$; H: $8a = 2d$; O: $2b = 2c + d$. Pilih $a = 1$, maka $c = 3$, $d = 4$, dan $b = 5$.

Cara ini sangat ampuh untuk reaksi yang "tidak jelas mulai dari mana", misalnya tembaga dalam asam nitrat encer: $a\,\mathrm{Cu} + b\,\mathrm{HNO_3} \rightarrow c\,\mathrm{Cu(NO_3)_2} + d\,\mathrm{NO} + e\,\mathrm{H_2O}$. Persamaannya: Cu: $a = c$; H: $b = 2e$; N: $b = 2c + d$; O: $3b = 6c + d + e$. Dari sini diperoleh $3e = 4c$, sehingga $c = 3$, $e = 4$, $b = 8$, $d = 2$, dan $a = 3$:

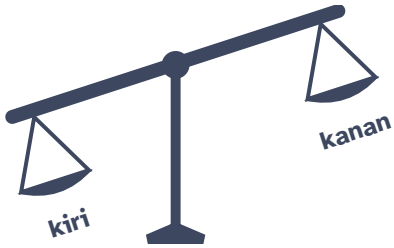
$$3\,\mathrm{Cu} + 8\,\mathrm{HNO_3} \longrightarrow 3\,\mathrm{Cu(NO_3)_2} + 2\,\mathrm{NO} + 4\,\mathrm{H_2}$$

Secara umum ini adalah sistem persamaan linear homogen; jawabannya adalah "ruang nol" sebuah matriks. Penyetara Reaksi di buku ini menyelesaikannya dengan eliminasi Gauss. Untuk reaksi redoks yang rumit, cara setengah reaksi (Bab 29) sering lebih cepat.

PENYETARA REAKSI **Tingkat sulit: tantangan calon olimpiade**



Unsur	Kiri	Kanan	
C	8 ●●●●●●●●	1 ●	✕
H	18 ○○○○○○○○○○○○○○○○○○	2 ○○	✕
O	2 ●●	3 ●●●	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Bensin (oktana), pembuatan gas klorin di laboratorium, tembaga dalam asam nitrat, langkah pertama pembuatan asam nitrat, pemanggangan bijih pirit, dan pembuatan fosfor. Coba dulu tanpa 💡. Bila buntu, tulis persamaan aljabarnya seperti di kotak Lanjut.

Mau berlatih lebih cepat? Menghitung atom adalah keterampilan inti menyetarakan: **jumlah atom = koefisien × indeks** (× angka di luar kurung, bila ada).

ADU CEPAT **Hitung atom O: koefisien × indeks**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-16

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Satu $Ca(NO_3)_2$ punya 2 × 3 = 6 atom O; satu H_2SO_4 punya 4 atom O. Kalikan dengan koefisiennya, lalu jumlahkan.

16.3 Hukum Lavoisier: massa tidak pernah hilang

Ingat teka-teki Bab 15? Sebatang kayu yang dibakar menjadi segenggam abu yang jauh lebih ringan. Selama berabad-abad orang menduga api "menghancurkan" sebagian materi. Para ahli bahkan percaya pada zat khayalan bernama *flogiston* yang konon keluar dari benda saat terbakar. Anehnya, logam yang dipanaskan di udara justru bertambah berat. Bagaimana mungkin benda kehilangan flogiston tetapi menjadi lebih berat?

TAMU DARI MASA LALU · KIMIAWAN YANG MENIMBANG SEGALANYA

Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794) dari Prancis memanaskan timah dan raksa di dalam bejana tertutup, lalu menimbang semuanya dengan neraca yang sangat teliti. Massa total sebelum dan sesudah pemanasan ternyata sama. Logam bertambah berat karena mengikat sebagian udara, yaitu gas yang kemudian ia namai *oksigen*. Istrinya, Marie-Anne Paulze Lavoisier, ikut mencatat percobaan, menerjemahkan makalah ilmiah, dan menggambar alat-alatnya. Lavoisier dihukum mati pada 1794 semasa Revolusi Prancis, tetapi bukunya *Traité élémentaire de chimie* (1789) mengubah kimia menjadi ilmu yang ditimbang dan diukur.

HUKUM KEKEKALAN MASSA (LAVOISIER)

Dalam reaksi kimia di **sistem tertutup**, massa total zat sebelum reaksi sama dengan massa total zat sesudah reaksi.

$$\sum m_{\text{pereaksi}} = \sum m_{\text{hasil reaksi}}$$

Alasannya pada tingkat partikel: atom hanya ditata ulang, tidak ada atom yang dibuat atau dimusnahkan.

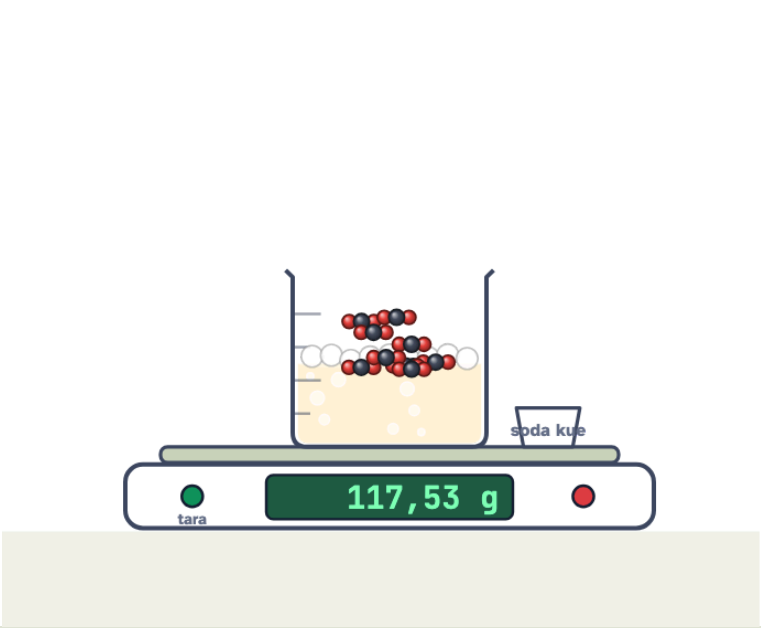
Kuncinya ada pada kata **sistem tertutup**, yaitu wadah yang tidak membiarkan zat keluar atau masuk. Lilin di piring, kayu di tungku, dan cuka di gelas terbuka termasuk **sistem terbuka**: gas hasil reaksi bebas kabur ke udara, dan oksigen dari udara bebas masuk. Timbangan hanya "melihat" zat yang ada di atasnya.

Bahasa sederhana · Coba bayangkan kamu meniup balon lalu melepaskannya tanpa diikat. Balon mengempis, tetapi udaranya tidak lenyap; udara itu hanya pindah ke ruangan. Begitu juga gas dari lilin yang terbakar: ia pindah ke udara, sehingga timbangan menunjukkan angka yang lebih kecil.

LAB MINI

Timbangan Lavoisier: terbuka atau tertutup?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-16



Sistem TERBUKA

gas bebas keluar dan masuk

$NaHCO_3 + CH_3COOH \rightarrow CH_3COONa + H_2O + CO_2$



CO_2 terbentuk: 0,88 g

CO_2 yang kabur: 0,47 g

t = 1,2 detik

CO_2 H_2O O_2

Massa awal	Bacaan timbangan	Perubahan
118 g	117,53 g	-0,47 g

Kesimpulan

massa berkurang: gas keluar ke udara

Pilih reaksi dan sistemnya, lalu tekan ▶ Jalankan. Bandingkan soda kue + cuka di gelas terbuka dengan botol berbalon, lilin di piring dengan lilin dalam toples, dan wol besi yang berkarat. Kapan timbangan turun, kapan naik, dan kapan tetap? Lihat juga partikel gasnya: ke mana mereka pergi? Nyalakan "timbangan super teliti" untuk melihat efek gaya apung udara pada balon.

RUMUS HIDUP

Ke mana perginya massa kayu?

$$m_{\text{gas}} = m_{\text{kayu}} + m_{O_2} - m_{\text{abu}}$$

Massa sebelum sama dengan massa sesudah. Gas tak terlihat yang terbang ke udara membawa hampir seluruh massa kayu, ditambah oksigen yang diambil dari udara.

- m_{kayu} Massa kayu kering g
- m_{O_2} Oksigen dari udara g
- m_{abu} Massa abu g
- m_{gas} Massa gas (CO_2 + uap air) g

MASSA GAS (CO_2 + UAP AIR)

2.390

g

🔥 **oksigen ≈ 1,4 × massa kayu: pembakaran sempurna**

1.000 g kayu + **1.400** g oksigen → **10** g abu + **2.390** g gas tak terlihat. Abu hanya **1** % dari massa kayu!

Satuan Nusantara: ≈ 80% dari isi gas tabung LPG melon · ≈ 2,4 × sekantong gula 1 kg · ≈ 10% dari karung beras 25 kg

Cek satuan: g + g − g = g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAVOISIER-KAYU

KERJAKAN BERSAMA

Buih yang membawa massa pergi

Laras menaruh gelas berisi cuka dan sesendok teh soda kue (di atas secarik kertas) di timbangan: totalnya 152,6 g. Soda kue dituang ke cuka, buih bermunculan. Setelah buih berhenti, timbangan menunjukkan 150,4 g. Berapa massa gas yang lepas? Apakah hukum kekekalan massa dilanggar?

1. Persamaan reaksinya: $\mathrm{NaHCO_3\,(s) + CH_3COOH\,(aq) \rightarrow CH_3COONa\,(aq) + H_2O\,(l) + CO_2\,(g)}$.
2. Massa yang "hilang" dari timbangan: $152{,}6 - 150{,}4 = 2{,}2$ g. Itulah massa gas $\mathrm{CO_2}$ yang kabur ke udara.
3. Gelas terbuka adalah sistem terbuka. Bila gasnya ditangkap (misalnya dengan botol bertutup), massa total tetap 152,6 g.

Gas $\mathrm{CO_2}$ yang lepas = 2,2 g. Hukum Lavoisier tidak dilanggar; massanya hanya pindah ke udara.

MITOS

"Saat kayu terbakar, sebagian massanya musnah."

FAKTA

Massa kayu + oksigen = massa abu + gas. Gasnya (CO_2 dan uap air) tak terlihat dan terbang ke udara. Bila semua gas ditangkap, massanya justru lebih besar daripada kayu semula!

MITOS

"Koefisien di depan rumus menunjukkan massa zat."

FAKTA

Koefisien menunjukkan perbandingan **jumlah partikel**. Pada $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$, massa hidrogen yang bereaksi (4 bagian) jauh lebih kecil daripada massa oksigen (32 bagian).

MITOS

"Boleh menyetarakan dengan mengubah angka kecil di rumus."

FAKTA

Mengubah indeks berarti mengganti zat. H_2O adalah air; H_2O_2 adalah hidrogen peroksida yang berbahaya bila diminum. Yang boleh diubah hanya koefisien.

⚠️ **KESELAMATAN · SODA KUE DAN CUKA**

Soda kue + cuka aman bila takarannya kecil: paling banyak ½ sendok teh soda kue untuk 50 mL cuka. Botol yang ditutup rapat hanya boleh botol bekas minuman bersoda yang dindingnya tebal, bukan botol kaca atau botol air mineral tipis. Buka tutupnya perlahan sambil diarahkan menjauhi wajah. Cuka terasa perih di mata: pakai kacamata dan bilas dengan air mengalir bila terciprat. Jangan mencicipi campurannya, dan lakukan bersama orang dewasa.

🚀 **LANJUT · IB & OLIMPIADE**

APAKAH MASSA BENAR-BENAR KEKAL? EINSTEIN IKUT BICARA

Menurut Einstein, energi dan massa setara: $E = mc^2$. Reaksi yang melepas energi sebenarnya kehilangan sedikit sekali massa. Pembakaran 16 g metana dengan 64 g oksigen melepas ±890 kJ. Massa yang setara dengan energi itu:

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{8{,}9 \times 10^5\ \text{J}}{(3{,}0 \times 10^8\ \text{m/s})^2} \approx 1 \times 10^{-11}\ \text{kg} =$$

Dibandingkan 80 g pereaksi, perubahannya hanya sekitar satu per delapan miliar, jauh di bawah ketelitian neraca terbaik. Jadi untuk reaksi kimia, hukum Lavoisier berlaku dengan sangat baik. Pada reaksi inti (Bab 37), perubahan massanya jutaan kali lebih besar dan benar-benar terukur.

16.4 Hukum Proust & Dalton: resep yang tidak bisa ditawar

Air dari hujan di Bogor, dari mata air di Gunung Gede, atau dari es di kutub punya komposisi yang sama: setiap 9 g air tersusun atas 1 g hidrogen dan 8 g oksigen. Tidak pernah 2 g hidrogen dengan 7 g oksigen. Senyawa ibarat resep yang tidak bisa ditawar.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU · PERDEBATAN DUA KIMIAWAN**

Joseph Louis Proust (1754–1826), kimiawan Prancis yang lama bekerja di Spanyol, menganalisis tembaga karbonat buatan laboratorium dan yang ditemukan di alam. Komposisinya selalu sama. Selama bertahun-tahun (sekitar 1801–1808) ia berdebat dengan **Claude Louis Berthollet**, yang yakin komposisi senyawa bisa berubah-ubah. Data Proust lebih meyakinkan untuk sebagian besar senyawa, tetapi Berthollet tidak sepenuhnya salah (lihat kotak Lanjut di bawah).

☆ **HUKUM PERBANDINGAN TETAP (PROUST)**

Perbandingan massa unsur-unsur dalam suatu senyawa selalu tetap, dari mana pun asal senyawa itu dan bagaimanapun cara membuatnya. Contoh: H : O dalam air = 1 : 8; C : O dalam CO_2 = 3 : 8; Fe : S dalam besi(II) sulfida = 7 : 4.

Akibatnya, bila dua unsur direaksikan dengan perbandingan yang tidak pas, **sebagian pereaksi akan tersisa**. Perhatikan percobaan memanaskan serbuk besi dan belerang (Fe, S) berikut.

Percobaan	Besi (g)	Belerang (g)	Besi(II) sulfida (g)	Sisa
1	7	4	11	tidak ada
2	14	8	22	tidak ada
3	10	4	11	besi 3 g
4	7	6	11	belerang 2 g

Pada percobaan 3, belerang 4 g hanya cukup untuk 7 g besi; sisanya 3 g besi tidak ikut bereaksi. Perhatikan pula: massa total tetap kekal, misalnya $10 + 4 = 11 + 3$. Hukum Lavoisier dan hukum Proust selalu berlaku bersama.

RUMUS HIDUP

Membuat air: hidrogen dan oksigen selalu 1 : 8

$$m_{\mathrm{H_2O}} = 9 \times \min\left(m_{\mathrm{H}},\ \frac{m_{\mathrm{O}}}{8}\right)$$

Setiap 1 gram hidrogen bergabung dengan tepat 8 gram oksigen menjadi 9 gram air. Pereaksi yang kelebihan tidak ikut bereaksi; ia tersisa.

m_{H} Massa hidrogen g

m_{O} Massa oksigen g

$m_{\mathrm{H_2O}}$ Massa air terbentuk g

MASSA AIR TERBENTUK

18

g

oksigen berlebih, hidrogen habis

Terbentuk **18** g air. Sisa hidrogen **0** g, sisa oksigen **8** g. Massa total tetap **26** g.

Satuan Nusantara: ≈ 1,2 × satu sendok makan air · ≈ 31% dari 1 mol garam dapur (NaCl) · ≈ 3,6 × satu sendok teh gula pasir (±)

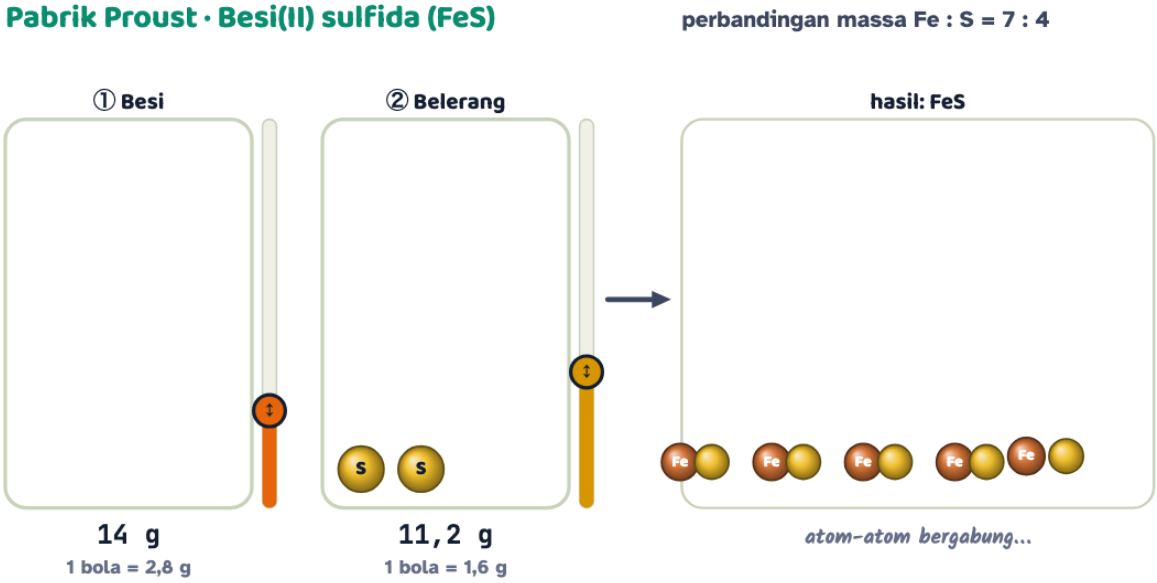
Cek satuan: g ✔ (massa sebelum = air + sisa)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PROUST-AIR

LAB MINI

Pabrik Proust: seret takaran unsur

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-16



Massa hasil	Sisa unsur ①	Sisa unsur ②	Kekekalan massa
–	–	–	sebelum: 25,2 g · tekan ▶

Pilih senyawa, lalu seret tumpukan ① dan ② ke atas atau ke bawah (atau pakai penggeser). Tekan ▶ Jalankan dan lihat atom-atom bergabung. Setiap bola mewakili takaran yang sama dari unsur itu. Berapa pun takaran yang kamu masukkan, perbandingan massa yang **bereaksi** selalu sama, dan kelebihannya tersisa. Bandingkan CO dengan CO_2 untuk massa karbon yang sama!

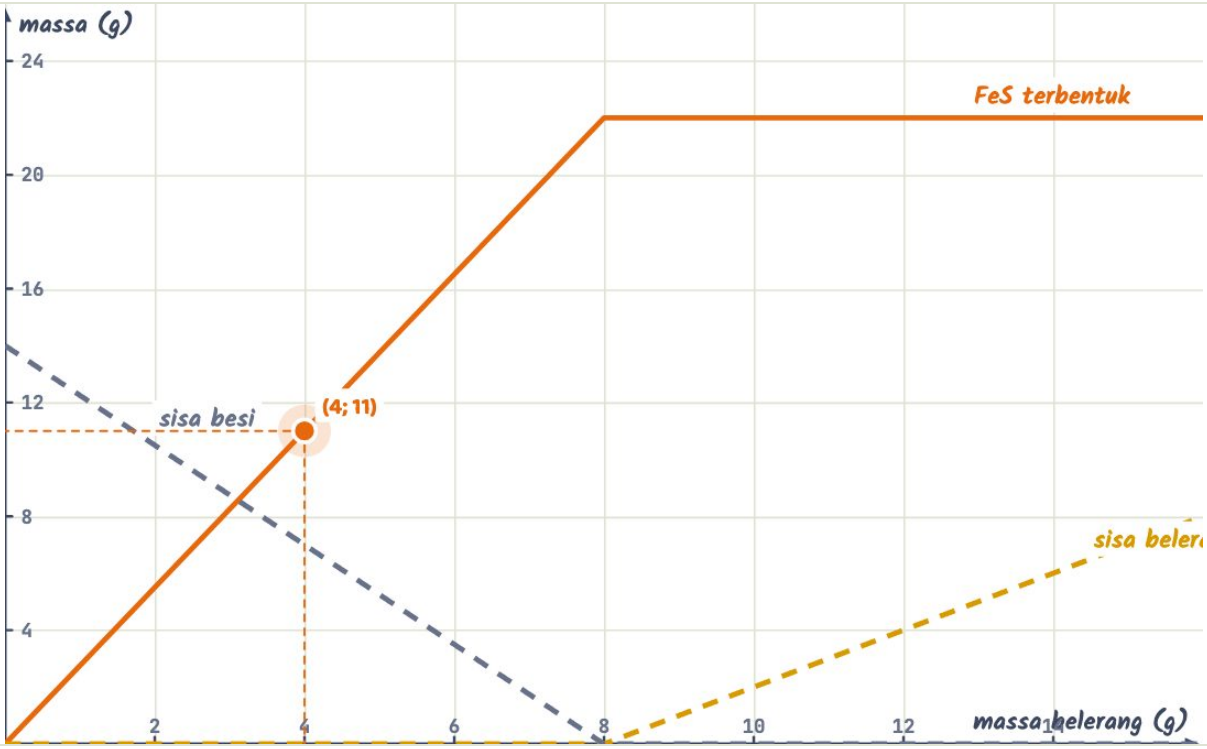
GRAFIK HIDUP

14 g besi + belerang: kapan FeS berhenti bertambah?

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-16

$$m_{\mathrm{FeS}} = \min\left(\tfrac{11}{4}\, m_{\mathrm{S}},\ 22\right)$$

$$m_{\mathrm{S}} = 4\ \mathrm{g} \ \Rightarrow\ m_{\mathrm{FeS}} = 11\ \mathrm{g}$$



belerang habis; besi bersisa

FeS terbentuk	sisa besi	sisa belerang
11 g	7 g	0 g

Seret titik oranye. Garis FeS naik lurus selama belerang yang menentukan, lalu mendatar tepat di 8 g belerang: di situ besi 14 g habis. Grafik bertitik patah seperti ini adalah "sidik jari" perbandingan tetap.

KERJAKAN BERSAMA **Siapa yang tersisa?**

Dalam magnesium oksida, perbandingan massa Mg : O = 3 : 2. Sebanyak 12 g pita magnesium dibakar dalam wadah berisi 10 g gas oksigen. Berapa gram magnesium oksida yang terbentuk, dan zat apa yang tersisa?

1. 12 g Mg butuh oksigen $12 \times \frac{2}{3} = 8$ g. Oksigen tersedia 10 g, jadi cukup.
2. Magnesium habis; oksigen tersisa $10 - 8 = 2$ g.
3. Massa MgO $= 12 + 8 = 20$ g (hukum Lavoisier untuk zat yang bereaksi).

Terbentuk 20 g MgO dan tersisa 2 g oksigen. Cek: $12 + 10 = 20 + 2$ ✓

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Perbandingan massa tidak sama dengan perbandingan jumlah atom. Dalam air, H : O = 1 : 8 menurut **massa**, tetapi 2 : 1 menurut **jumlah atom**. Satu molekul air berisi 2 atom H (massa 2 × 1) dan 1 atom O (massa 16), sehingga perbandingan massanya 2 : 16 = 1 : 8. Atom O memang 16 kali lebih berat daripada atom H.

Bagaimana bila dua unsur dapat membentuk **lebih dari satu** senyawa? Karbon dan oksigen membentuk karbon monoksida (CO, gas beracun dari pembakaran tak sempurna) dan karbon dioksida (CO_2, gas yang kita embuskan). Untuk 12 g karbon, CO mengandung 16 g oksigen, sedangkan CO_2 mengandung 32 g oksigen. Perbandingannya 16 : 32 = **1 : 2**, bilangan bulat yang sederhana. John Dalton melihat pola ini pada 1803 dan menjadikannya bukti kuat bahwa materi tersusun atas atom-atom utuh.

☆ **HUKUM PERBANDINGAN BERGANDA (DALTON)**

Bila dua unsur membentuk lebih dari satu senyawa, dan massa salah satu unsur dibuat tetap, maka massa unsur kedua dalam senyawa-senyawa itu berbanding sebagai **bilangan bulat sederhana**. Alasannya: atom hanya dapat bergabung utuh, satu, dua, atau tiga, tidak pernah "setengah atom".

Oksida nitrogen	Nama	Massa O per 14 g N	Perbandingan O
N_2O	dinitrogen monoksida ("gas tertawa", obat bius ringan)	8 g	1
NO	nitrogen monoksida	16 g	2
N_2O_3	dinitrogen trioksida	24 g	3

NO_2	nitrogen dioksida (gas cokelat pencemar udara kota)	32 g	4
N_2O_5	dinitrogen pentoksida	40 g	5

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BERTHOLLIDA: SENYAWA YANG "MEMBANGKANG"

Sebagian padatan ionik ternyata **nonstoikiometri**. Contohnya wüstit, oksida besi yang rumusnya lebih tepat ditulis $Fe_{1-x}O$ dengan x sekitar 0,05–0,15. Di dalam kisinya, sebagian tempat ion Fe^{2+} kosong; muatan tetap netral karena sebagian ion besi lain menjadi Fe^{3+} (setiap tiga Fe^{2+} diganti dua Fe^{3+} dan satu lubang). Senyawa seperti ini disebut *berthollida*, untuk menghormati Berthollet.

Isotop juga menggeser angka: dalam air berat, D_2O, perbandingan massa H : O kira-kira 1 : 4, bukan 1 : 8. Hukum Proust tetap berguna, asalkan diingat bahwa ia berlaku untuk senyawa molekuler biasa dengan campuran isotop alami.

16.5 Hukum Gay-Lussac & hipotesis Avogadro

Menimbang gas itu merepotkan. Jauh lebih mudah **mengukur volumenya**, misalnya dengan tabung berskala yang dibalik di atas air. Ketika kimiawan mulai mengukur volume gas yang bereaksi, mereka menemukan pola yang mengejutkan.

Tebak Dulu!

Pada suhu dan tekanan yang sama, 1 L gas hidrogen bereaksi tepat habis dengan 1 L gas klorin menjadi gas hidrogen klorida. Berapa volume hidrogen klorida yang terbentuk?

- 1 L, karena volume tidak bisa bertambah.
- 1,5 L, rata-rata dari kedua gas.
- 2 L.
- Tidak bisa ditentukan tanpa menimbang gasnya.

Jawabannya: 2 L. Massa selalu kekal, tetapi **volume** gas tidak harus kekal. Volume bergantung pada *jumlah molekul*. Satu molekul H_2 dan satu molekul Cl_2 menghasilkan **dua** molekul HCl, sehingga volumenya menjadi dua kali.

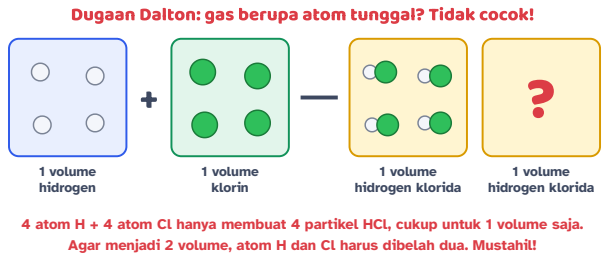
HUKUM PERBANDINGAN VOLUME (GAY-LUSSAC, 1808)

Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas-gas yang bereaksi dan volume gas hasil reaksi berbanding sebagai bilangan bulat sederhana. Contoh: 2 volume hidrogen + 1 volume oksigen → 2 volume uap air; 1 volume nitrogen + 3 volume hidrogen → 2 volume amonia.

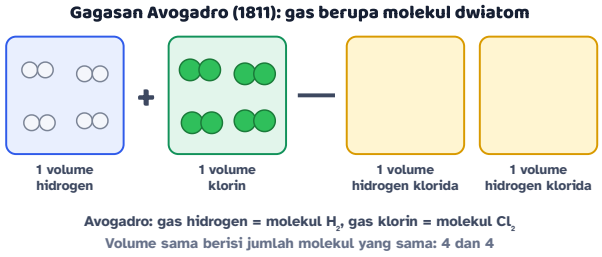
Data Gay-Lussac sempat membingungkan Dalton. Jika gas hidrogen dan klorin tersusun atas atom tunggal, bagaimana 1 volume + 1 volume bisa menghasilkan 2 volume? Apakah atomnya harus dibelah dua? Jawabannya datang dari Italia.



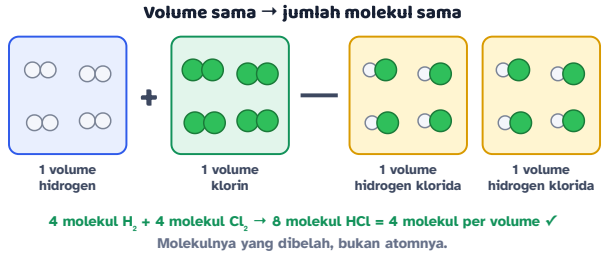
Langkah 1. Data Gay-Lussac: pada suhu dan tekanan sama, 1 volume hidrogen + 1 volume klorin menghasilkan **2 volume** hidrogen klorida. Setiap kotak menggambarkan volume yang sama besar.



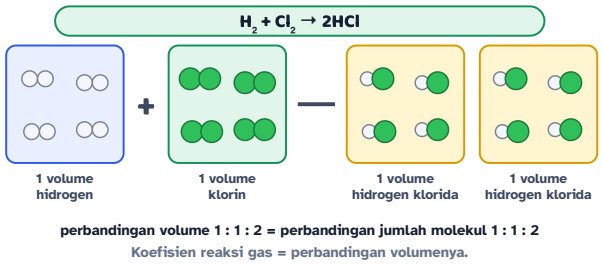
Langkah 2. Bila gas berupa atom tunggal, 4 atom H dan 4 atom Cl hanya membentuk 4 partikel HCl, yaitu 1 volume saja. Untuk mengisi volume kedua, atom harus dibelah. Dalton menolak gagasan itu.



Langkah 3. Amedeo Avogadro (1811) mengusulkan dua hal: volume gas yang sama (pada suhu dan tekanan sama) berisi **jumlah molekul yang sama**, dan gas hidrogen serta klorin tersusun atas **molekul dwiatom**, H_2 dan Cl_2.



Langkah 4. Setiap molekul H_2 bertemu satu molekul Cl_2 dan menjadi **dua** molekul HCl. Delapan molekul HCl mengisi tepat 2 volume, masing-masing 4 molekul. Cocok dengan percobaan!



Langkah 5. Kesimpulan: $H_2\,(g) + Cl_2\,(g) \qquad 2\,HCl\,(g)$. Untuk gas pada suhu dan tekanan sama, perbandingan koefisien = perbandingan jumlah molekul = perbandingan volume.

HIPOTESIS AVOGADRO

Pada suhu dan tekanan yang sama, gas-gas yang volumenya sama mengandung jumlah molekul yang sama. Akibatnya, untuk reaksi gas:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\text{koefisien}_1}{\text{koefisien}_2}$$

TAMU DARI MASA LALU · ILMUWAN DI ATAS AWAN

Pada 1804, **Joseph Louis Gay-Lussac** naik balon berisi hidrogen sendirian sampai ketinggian sekitar 7.000 meter untuk mengambil contoh udara. Ternyata komposisi udara di sana sama dengan di permukaan tanah. Empat tahun kemudian ia menerbitkan hukum perbandingan volume. Hipotesis Avogadro (1811) hampir terlupakan selama setengah abad, sampai Stanislao Cannizzaro memperjuangkannya di kongres kimia internasional pertama di Karlsruhe (1860).

RUMUS HIDUP

Volume gas dari koefisien (Gay-Lussac)

$$V_{\text{dicari}} = \frac{k_{\text{dicari}}}{k_{\text{diketahui}}} \times V_{\text{diketahui}}$$

Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas berbanding lurus dengan koefisiennya dalam persamaan setara.

- $V_{\text{diketahui}}$ Volume gas yang diketahui L
- $k_{\text{diketahui}}$ Koefisien gas yang diketahui
- k_{dicari} Koefisien gas yang dicari
- V_{dicari} Volume gas yang dicari L

VOLUME GAS YANG DICARI

50

L

LPG: oksigen 5 kali volume propana

10 L gas berkoefisien **1** setara dengan **50** L gas berkoefisien **5** (suhu dan tekanan sama).

Satuan Nusantara: ≈ 2,2 × 1 mol gas pada STP · ≈ 2,6 × galon air isi ulang · ≈ 5% dari satu meter kubik

Cek satuan: (koefisien ÷ koefisien) × L = L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-GAYLUSSAC-VOLUME

COBA SENDIRI **Berapa banyak udara untuk kompor?**

Sebuah kompor membakar sempurna 6 L gas propana (diukur pada suhu dan tekanan kamar). Berapa liter oksigen yang diperlukan, berapa liter CO_2 yang terbentuk, dan berapa liter udara (21% volume oksigen) yang harus mengalir ke kompor?

1. Persamaan setara: $C_3H_8\,(g) + 5\,O_2\,(g) \rightarrow 3\,CO_2\,(g) + 4\,H_2O\,(l)$. Perbandingan volume gas $C_3H_8 : O_2 : CO_2 = 1 : 5 : 3$.
2. Oksigen: $V = \frac{5}{1} \times 6 = 30$ L. Karbon dioksida: $V = \frac{3}{1} \times 6 = 18$ L.
3. Udara hanya mengandung 21% oksigen: $V_{\text{udara}} = \dfrac{30}{0{,}21} \approx 143$ L.
4. Air yang terbentuk mengembun menjadi cairan, sehingga tidak dihitung dengan perbandingan volume gas.

Butuh 30 L oksigen (±143 L udara), terbentuk 18 L CO_2. Untuk 6 L gas, kompor menyedot udara hampir 24 kali volumenya!

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Perbandingan volume hanya berlaku untuk zat **berwujud gas** yang diukur pada suhu dan tekanan yang sama. Air cair, endapan, dan padatan tidak ikut dihitung. Massa selalu kekal, tetapi volume gas boleh bertambah atau berkurang: pada $N_2 + 3\,H_2 \longrightarrow 2\,NH_3$, 4 volume pereaksi menjadi hanya 2 volume amonia.

ID **KIMIA NUSANTARA · API BIRU DI DAPUR**

Tabung LPG 3 kg berisi campuran propana dan butana. Bila udara cukup, nyala kompor berwarna **biru**: pembakaran sempurna menghasilkan CO_2 dan air. Bila lubang udara kompor tersumbat, nyalanya menjadi kuning-merah dan berjelaga. Itu tanda pembakaran tidak sempurna yang juga menghasilkan karbon monoksida, $2\,C_3H_8 + 7\,O_2 \longrightarrow 6\,CO + 8\,H_2O$. Gas CO tidak berwarna, tidak berbau, dan beracun. Karena itu dapur harus berventilasi, dan kompor yang apinya kuning perlu dibersihkan.

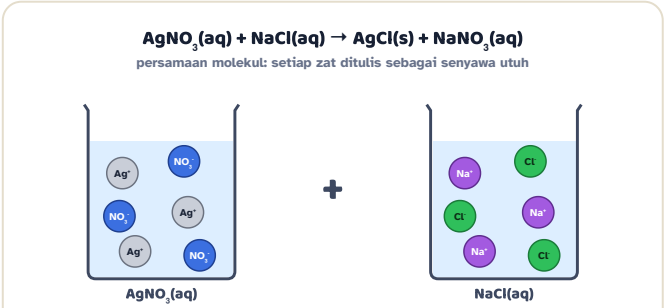
16.6 Jenis reaksi & persamaan ion bersih

Ada jutaan reaksi kimia, tetapi kebanyakan mengikuti beberapa pola. Mengenali polanya membantumu **menebak hasil reaksi** sebelum menuliskannya.

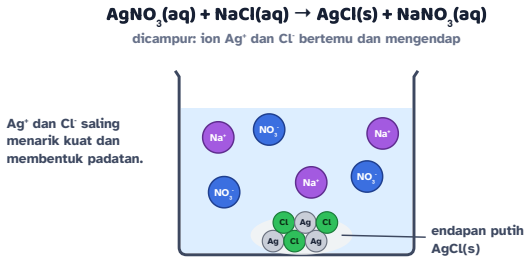
Bahasa sederhana · Pola reaksi mirip pola menari berpasangan. Ada yang bergabung (dua penari menjadi satu pasangan), ada yang berpisah, ada yang merebut pasangan orang lain, dan ada dua pasangan yang saling bertukar pasangan.

Jenis reaksi	Pola umum	Contoh	Di sekitar kita
Kombinasi (sintesis)	A + B → AB	$\mathrm{CaO\,(s) + H_2O\,(l) \rightarrow Ca(OH)_2\,(s)}$	kapur tohor disiram air menjadi kapur sirih (terasa panas!)
Penguraian (dekomposisi)	AB → A + B	$\mathrm{CaCO_3\,(s) \xrightarrow{\Delta} CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$	tobong kapur membakar batu gamping
Pembakaran	bahan bakar + $\mathrm{O_2}$ → $\mathrm{CO_2}$ + $\mathrm{H_2O}$	$\mathrm{2\,C_4H_{10}\,(g) + 13\,O_2\,(g) \rightarrow 8\,CO_2\,(g) + 10\,H_2O\,(l)}$	LPG, lilin, kayu bakar, bensin
Pendesakan tunggal	A + BC → AC + B	$\mathrm{Fe\,(s) + CuSO_4\,(aq) \rightarrow FeSO_4\,(aq) + Cu\,(s)}$	paku yang dicelup larutan terusi berlapis tembaga
Pertukaran ganda (metatesis, pengendapan)	AB + CD → AD + CB	$\mathrm{AgNO_3\,(aq) + NaCl\,(aq) \rightarrow AgCl\,(s) + NaNO_3\,(aq)}$	uji ion klorida di laboratorium
Netralisasi (asam + basa)	asam + basa → garam + air	$\mathrm{Mg(OH)_2\,(s) + 2\,HCl\,(aq) \rightarrow MgCl_2\,(aq) + 2\,H_2O\,(l)}$	obat maag menetralkan asam lambung

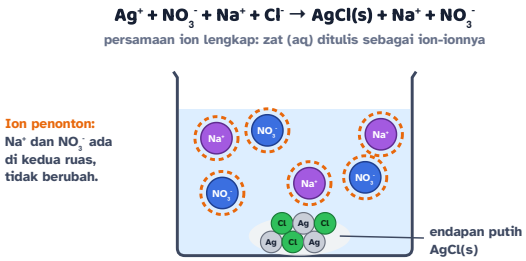
Banyak reaksi berlangsung di dalam larutan. Senyawa ion yang larut (dan asam kuat) terurai menjadi ion-ionnya. Ternyata sebagian ion hanya "menonton": mereka ada sebelum dan sesudah reaksi tanpa berubah sedikit pun. Ikuti animasi berikut.



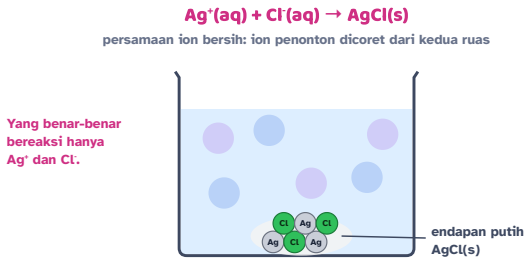
Langkah 1. Persamaan molekul: $\mathrm{AgNO_3\,(aq) + NaCl\,(aq) \rightarrow AgCl\,(s) + NaNO_3\,(aq)}$. Di dalam gelas, kedua larutan sebenarnya berisi ion-ion yang bergerak bebas: $\mathrm{Ag^+}$ dan $\mathrm{NO_3^-}$, serta $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$.



Langkah 2. Saat dicampur, ion $\mathrm{Ag^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$ saling menarik kuat dan membentuk padatan putih perak klorida yang mengendap. Ion $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{NO_3^-}$ tetap melayang di larutan.



Langkah 3. Persamaan ion lengkap: $\mathrm{Ag^+ + NO_3^- + Na^+ + Cl^- \rightarrow AgCl\,(s) + Na^+ + NO_3^-}$. $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{NO_3^-}$ muncul sama persis di kedua ruas. Mereka disebut **ion penonton**.

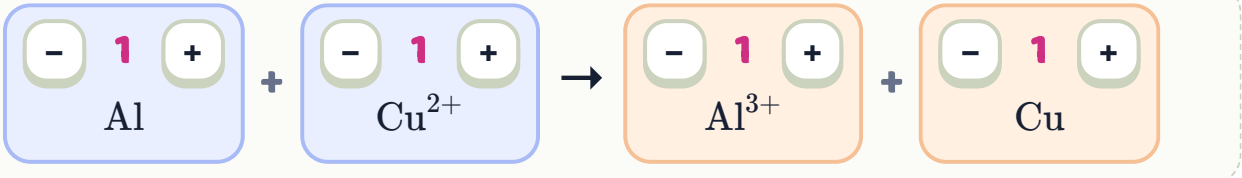


Langkah 4. Coret ion penonton, tersisa **persamaan ion bersih**: $\mathrm{Ag^+\,(aq) + Cl^-\,(aq) \rightarrow AgCl\,(s)}$. Persamaan ini berlaku untuk semua larutan berisi ion perak dan ion klorida, misalnya juga $\mathrm{AgNO_3}$ + KCl.

DEFINISI · ION PENONTON & PERSAMAAN ION BERSIH

Ion penonton adalah ion yang ada di larutan sebelum dan sesudah reaksi tanpa berubah. **Persamaan ion bersih** hanya memuat partikel yang benar-benar berubah. Cara menulisnya: (1) pecah zat (aq) yang merupakan elektrolit kuat menjadi ion; (2) padatan, cairan, gas, air, dan asam lemah tetap ditulis sebagai rumus utuh; (3) coret ion yang sama di kedua ruas; (4) periksa bahwa **atom dan muatan** setara.

PENYETARA REAKSI — Persamaan ion: setarakan atom dan muatan



Unsur	Kiri	Kanan	
Al	1 ●	1 ●	✓
Cu	1 ●	1 ●	✓
muatan	+2	+3	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Pada persamaan ion, yang harus setara bukan hanya atom, tetapi juga **muatan**. Persamaan pertama sudah setara atomnya sejak awal. Lihat baris muatan di tabel: masih belum sama! Persamaan terakhir adalah reaksi kalium permanganat dengan ion besi(II), dipakai untuk menentukan kadar besi dalam titrasi.

COBA SENDIRI **Paku di dalam larutan terusi**

Paku besi dicelupkan ke larutan terusi (tembaga(II) sulfat) yang biru. Lama-kelamaan paku berlapis kemerahan dan warna biru larutan memudar. Tuliskan persamaan molekul, persamaan ion lengkap, dan persamaan ion bersihnya, lalu periksa muatannya.

1. Persamaan molekul (pendesakan tunggal): $\mathrm{Fe(s) + CuSO_4(aq) \rightarrow FeSO_4(aq) + Cu(s)}$.
2. Pecah zat (aq) menjadi ion: $\mathrm{Fe(s) + Cu^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow Fe^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) + Cu(s)}$.
3. $\mathrm{SO_4^{2-}}$ adalah ion penonton. Coret dari kedua ruas: $\mathrm{Fe(s) + Cu^{2+}(aq) \rightarrow Fe^{2+}(aq) + Cu(s)}$.
4. Periksa: atom Fe 1 = 1, Cu 1 = 1; muatan kiri +2, kanan +2 ✓

$\mathrm{Fe(s) + Cu^{2+}(aq) \rightarrow Fe^{2+}(aq) + Cu(s)}$**. Lapisan merah adalah logam tembaga, dan warna biru memudar karena ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ berkurang. Elektron berpindah dari besi ke tembaga; reaksi seperti ini disebut reaksi redoks (Bab 29).**

Kimia di sekitarmu



Kompor LPG

Propana dan butana terbakar menjadi $\mathrm{CO_2}$ dan air. Satu molekul propana butuh lima molekul oksigen, jadi kompor perlu aliran udara yang lancar.



Tapai dan tuak

Khamir mengubah glukosa menjadi etanol dan $\mathrm{CO_2}$. Itu sebabnya tapai beraroma "tajam" dan wadah tuak yang tertutup rapat bisa menggembung.



Karbit pematang buah

Karbit + air menghasilkan asetilena yang mempercepat pematangan. Cara ini tidak dianjurkan karena karbit teknis mengandung pengotor beracun. Cukup diketahui, jangan dicoba.



Kembang api

Bahan pengoksidasi melepas oksigen sehingga bahan bakar terbakar sangat cepat; garam logam memberi warna. Petasan berbahaya dan dilarang dibuat atau disulut sendiri.



Kapur sirih

Kapur tohor (CaO) yang disiram air menjadi kapur sirih, $\mathrm{Ca(OH)_2}$, sambil melepas panas. Ini reaksi kombinasi. Kapur sirih basa dan bisa melukai kulit serta mata.



Kantong udara mobil

Saat tabrakan, natrium azida terurai sangat cepat: $\mathrm{2\,NaN_3 \quad 2\,Na + 3\,N_2}$. Dalam sekejap, gas nitrogen mengembangkan kantong udara yang melindungi pengemudi.

Cek Cepat

Persamaan manakah yang sudah setara?

- $\mathrm{H_2 + O_2 \longrightarrow H_2O}$
- $\mathrm{Fe + O_2 \longrightarrow Fe_2O_3}$
- $\mathrm{2\,Mg + O_2 \longrightarrow 2\,MgO}$
- $\mathrm{CH_4 + O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O}$

Dalam wadah tertutup, 5 g zat A bereaksi habis dengan 3 g zat B, dan terbentuk gas. Berapa massa total isi wadah setelah reaksi?

- 8 g
- 2 g
- 15 g
- kurang dari 8 g karena ada gas

Pada suhu dan tekanan sama, 2 L gas nitrogen bereaksi habis dengan hidrogen: $\mathrm{N_2 + 3\,H_2 \longrightarrow 2\,NH_3}$. Berapa volume amonia yang terbentuk?

- 1 L
- 2 L
- 6 L
- 4 L

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: timbangan Lavoisier di dapur

Bahan: timbangan dapur digital (lebih baik yang teliti sampai 0,1 g), botol plastik bekas 600 mL, balon karet, cuka dapur, soda kue, sendok teh, corong dari kertas, gelas plastik, secarik kertas kecil.

1. Tuang ±50 mL cuka ke dalam botol. Dengan corong kertas, masukkan ½ sendok teh soda kue ke dalam balon.
2. Pasang mulut balon ke mulut botol tanpa menumpahkan soda kue (balon dibiarkan terkulai). Timbang semuanya dan catat.
3. Tegakkan balon agar soda kue jatuh ke cuka. Amati buih dan balon yang mengembang. Setelah buih berhenti, timbang lagi.
4. Ulangi dengan sistem terbuka: timbang gelas berisi 50 mL cuka bersama ½ sendok teh soda kue di atas secarik kertas. Tuang soda kue ke cuka (kertasnya tetap di timbangan), lalu timbang lagi setelah buih berhenti.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa dan pakai kacamata. Jangan menambah soda kue lebih dari ½ sendok teh dan jangan memakai botol kaca. Bila cuka terciprat ke mata, bilas dengan air mengalir. Jangan mencicipi campurannya; buang ke wastafel sambil dialiri air.

Pertanyaan: Sistem mana yang massanya berkurang? Jika timbanganmu sangat teliti, botol berbalon mungkin juga turun sedikit. Apakah massanya benar-benar hilang, atau balon yang menggembung "didorong ke atas" oleh udara seperti pelampung di air?

RINGKASAN KILAT

Bab 16 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menulis **persamaan reaksi** dari kalimat, lengkap dengan lambang wujud zat (s), (l), (g), (aq)
- **menyetarakan** persamaan reaksi dengan cara inspeksi dan cara aljabar, tanpa mengubah rumus zat
- menjelaskan dan memakai **hukum Lavoisier**, **hukum Proust**, dan **hukum Dalton** untuk mengolah data massa
- menghitung volume gas dengan **hukum Gay-Lussac** dan menjelaskannya dengan **hipotesis Avogadro**
- menggolongkan **jenis reaksi** dan menulis **persamaan ion bersih**

Istilah kunci

persamaan reaksi · pereaksi · hasil reaksi · setara · sistem tertutup · sistem terbuka · Ion penonton · Persamaan ion bersih

Rumus penting

$$m_{\text{gas}} = m_{\text{kayu}} + m_{\text{O}_2} - m_{\text{abu}}$$

Ke mana perginya massa kayu?. Massa sebelum sama dengan massa sesudah. Gas tak terlihat yang terbang ke udara membawa hampir seluruh massa kayu, ditambah oksigen yang diambil dari udara.

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \times \min\left(m_{\text{H}},\ \frac{m_{\text{O}}}{8}\right)$$

Membuat air: hidrogen dan oksigen selalu 1 : 8. Setiap 1 gram hidrogen bergabung dengan tepat 8 gram oksigen menjadi 9 gram air. Pereaksi yang kelebihan tidak ikut bereaksi; ia tersisa.

$$V_{\text{dicari}} = \frac{k_{\text{dicari}}}{k_{\text{diketahui}}} \times V_{\text{diketahui}}$$

Volume gas dari koefisien (Gay-Lussac). Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas berbanding lurus dengan koefisiennya dalam persamaan setara.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Koefisien mengalikan seluruh rumus di belakangnya, sedangkan indeks hanya berlaku untuk atom (atau kurung) tepat di depannya.
- Soda kue + cuka aman bila takarannya kecil: paling banyak ½ sendok teh soda kue untuk 50 mL cuka.
- Perbandingan massa tidak sama dengan perbandingan jumlah atom.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=16

🧩 Teka-teki untuk Bab 17

Persamaan $2\,\text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\,\text{H}_2\text{O}$ berkata "dua molekul hidrogen untuk satu molekul oksigen". Masalahnya, tidak ada yang bisa mengambil molekul satu per satu dengan pinset! Satu lusin = 12, satu kodi = 20, satu rim = 500. Kimiawan punya satuan hitung yang isinya 602 triliun miliar. Untuk apa satuan sebesar itu?

▼ **Intip petunjuk**

Satuan itu bernama **mol**. Dengan mol, kimiawan "menghitung molekul dengan menimbang": 2 mol H_2 (4 g) bereaksi tepat dengan 1 mol O_2 (32 g). Perhatikan, 4 : 32 = 1 : 8, persis perbandingan Proust untuk air. Koefisien reaksi, hukum Proust, dan hukum Avogadro ternyata bertemu di satu konsep. Kita bongkar di Bab 17!

BAB 17 · STOIKIOMETRI

17 Konsep Mol: Menghitung Atom dengan Menimbang

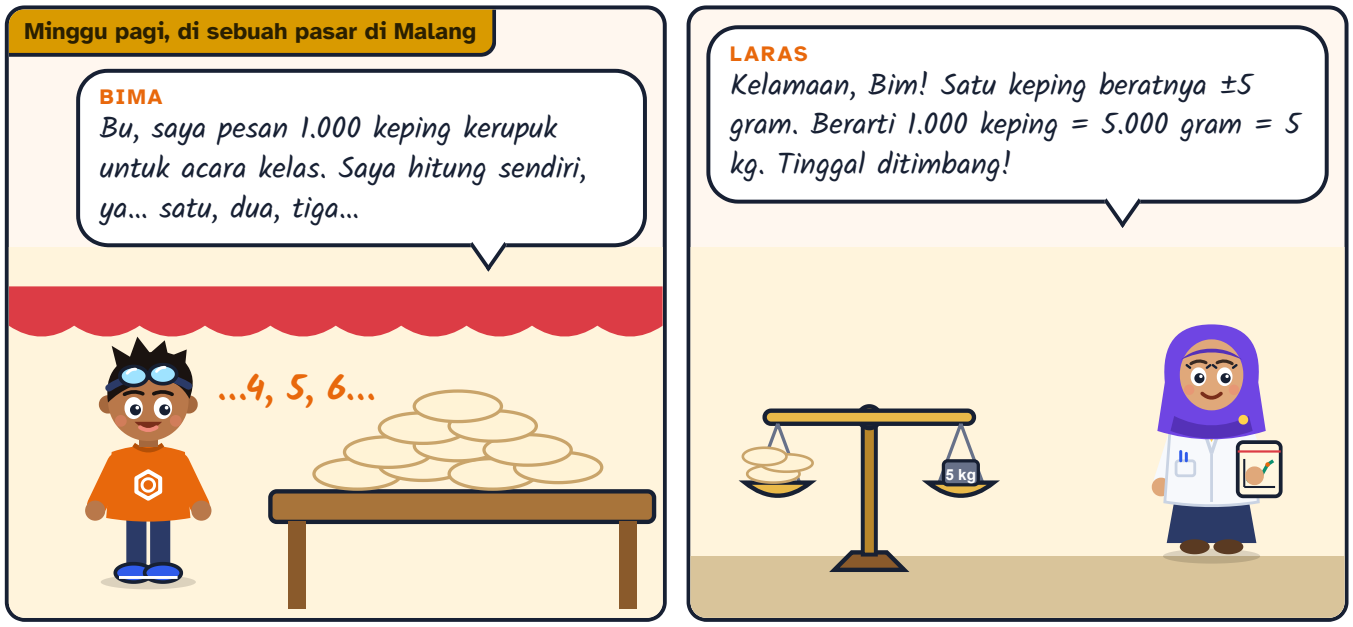
Atom terlalu kecil untuk dihitung satu per satu, bahkan oleh komputer tercepat sekalipun. Kimiawan punya cara cerdik seperti pedagang kerupuk di pasar: menimbang. Kuncinya satu kata ajaib, yaitu mol.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **mol** sebagai satuan jumlah zat dan memakai **bilangan Avogadro**;
- menghitung **massa molar** (Ar dan Mr) dari rumus kimia;
- mengubah massa, jumlah partikel, dan volume gas melalui **jembatan mol**;
- menghitung **komposisi persen** unsur dalam senyawa, misalnya kadar nitrogen pupuk;
- menentukan **rumus empiris**, **rumus molekul**, dan jumlah air kristal dari data percobaan.

SERIBU KEPING KERUPUK

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kamu punya 1 gram emas dan 1 gram aluminium. Mana yang berisi lebih banyak atom?

- Emas, karena emas lebih berharga dan lebih padat.
- Aluminium, kira-kira tujuh kali lebih banyak.
- Sama banyak, karena massanya sama-sama 1 gram.
- Tidak bisa dibandingkan karena unsurnya berbeda.

Jawabannya: aluminium. Satu atom emas (Ar 197) kira-kira tujuh kali lebih berat daripada satu atom aluminium (Ar 27). Jadi dalam massa yang sama, atom aluminium yang lebih ringan jumlahnya ±7 kali lebih banyak, persis seperti 1 kg kerupuk berisi jauh lebih banyak keping daripada 1 kg kelapa. Bab ini mengajarkan cara menghitungnya dengan tepat.

17.1 Lusin, kodi, rim... dan mol

Pedagang di pasar sudah lama memakai **satuan hitung** supaya tidak repot. Telur dibeli per lusin (12 butir), kain batik per kodi (20 lembar), dan kertas fotokopi per rim (500 lembar). Satuan seperti itu hanyalah "nama untuk sebuah bilangan".

Bahasa sederhana · Bayangkan sebuah kotak ajaib yang selalu berisi jumlah benda yang sama. Satu kotak telur berisi 12 butir. Satu "kotak" kimia, yang disebut **mol**, berisi 602 ribu miliar miliar partikel! Karena atom sangat kecil, kotaknya harus luar biasa besar supaya isinya cukup banyak untuk ditimbang di dapur.

Kimiawan butuh satuan hitung yang sangat besar, sebab atom sangat kecil. Satuan itu adalah **mol**.

Satuan hitung	Isinya	Dipakai untuk
1 lusin	12	telur, piring, gelas
1 kodi	20	kain batik, sarung
1 gros	144 (= 12 lusin)	pensil, kancing
1 rim	500	kertas
1 mol	**602.214.076.000.000.000.000.000** $= 6{,}022 \times 10^{23}$	**atom, molekul, ion, elektron**

DEFINISI · MOL

Satu **mol** adalah jumlah zat yang mengandung tepat $6{,}02214076 \times 10^{23}$ partikel elementer (atom, molekul, ion, atau partikel lain yang disebutkan). Bilangan ini disebut **bilangan Avogadro**, N_A. Satuannya mol (lambang: mol).

AWAS JEBAKAN

Sebutkan dulu partikelnya! "1 mol oksigen" bisa berarti 1 mol *molekul* O_2 (massanya 32 g) atau 1 mol *atom* O (massanya 16 g). Satu mol molekul O_2 berisi **2 mol atom** O, sama seperti satu lusin pasang sepatu berisi dua lusin sepatu.

17.2 Seberapa besar bilangan Avogadro?

Angka $6{,}022 \times 10^{23}$ sulit dibayangkan. Coba ketuk angka-angka bergaris ini untuk membandingkannya dengan benda di sekitarmu: **6,022 × 10²³ partikel**, **18 g air**, **22,4 L gas**.

- Jika 6,022 × 10²³ butir beras ditumpahkan merata di seluruh daratan Indonesia (±1,9 juta km²), tumpukannya setinggi sekitar 8 kilometer, hampir dua kali tinggi Puncak Jaya (4.884 m).
- Jika setiap penduduk Bumi (±8,1 miliar orang) menghitung satu atom per detik tanpa henti, mereka butuh lebih dari **2 juta tahun** untuk menghitung satu mol atom.

Hubungan jumlah partikel N dan jumlah mol n sederhana sekali: kalikan dengan isi "kotaknya".

$$N = n \times N_A \qquad N_A = 6{,}022 \times 10^{23}\ \text{partikel/mol}$$

RUMUS HIDUP

Jumlah partikel dari mol

$$N = n \times N_A$$

Jumlah partikel sama dengan banyaknya 'kotak mol' dikali isi setiap kotak.

n Jumlah zat `mol`

N Jumlah partikel `partikel`

JUMLAH PARTIKEL

1,204 × 10²⁴

partikel

≥ 1 mol: lebih dari 6 × 10²³ partikel

2 mol berisi **1,204 × 10²⁴** partikel. Itu **1,487 × 10¹⁴** partikel untuk setiap penduduk Bumi!

Satuan Nusantara: ≈ 2 × satu mol

Cek satuan: mol × (partikel/mol) = partikel ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-JUMLAH-PARTIKEL

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1811, **Amedeo Avogadro** dari Italia menduga bahwa gas-gas bervolume sama (pada suhu dan tekanan sama) berisi jumlah molekul yang sama. Ia sendiri tidak pernah tahu jumlahnya! Satu abad kemudian, **Jean Perrin** mengukurnya lewat gerak Brown dan menamai bilangan itu untuk menghormati Avogadro (Perrin meraih Nobel Fisika 1926). Sejak 20 Mei 2019, nilai N_A ditetapkan *tepat* $6{,}02214076 \times 10^{23}$ per mol, dan definisi mol tidak lagi bergantung pada massa karbon-12.

LAB MINI **Satu mol beras? Mengapa mol hanya cocok untuk atom**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-17



Jumlah benda	Massa total	Kira-kira setara
$6{,}022 \times 10^{23}$	$1{,}325 \times 10^{16}$ ton	$1{,}8 \times 10^{-4} \times$ Bulan

Pilih benda dan satuan hitungnya. Sebutir beras ±0,022 g, sebuah molekul air hanya ±3 × 10^{-23} g. Berapa massa **satu mol beras**? Bandingkan dengan Danau Toba, Bulan, dan Bumi!

TRIK KAK TIRTA

Untuk membayangkan $6{,}022 \times 10^{23}$, ingat "**6 – 0 – 2 – 2, pangkat 23**", seperti nomor rumah 6022 di Jalan 23. Satuan lain boleh lupa, angka ini jangan!

17.3 Massa molar: berat satu "kotak mol"

Satu lusin kerupuk dan satu lusin kelapa sama-sama berisi 12 buah, tetapi massanya sangat berbeda. Begitu pula satu mol zat yang berbeda: **jumlah partikelnya sama, massanya berbeda**.

Bahasa sederhana · Coba bayangkan: sekarung beras 25 kg berisi lebih dari satu juta butir. Pedagang tidak menghitung butirnya; ia menimbang. Kimiawan juga begitu: cukup tahu berat "satu butir" (satu partikel), lalu menimbang. Bedanya, butir kimia sangat-sangat kecil.

Kabar baiknya, kita tidak perlu menimbang satu mol di laboratorium. Massa satu mol suatu zat dalam gram sama dengan angka **massa atom relatif (Ar)** untuk unsur, atau **massa molekul relatif (Mr)** untuk senyawa. Massa ini disebut **massa molar** (M), satuannya g/mol.

ATURAN · MENGHITUNG MR

Mr adalah jumlah Ar semua atom dalam rumus kimia:

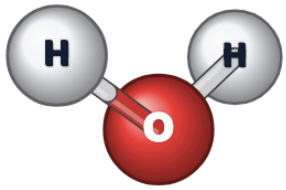
$$M_r = \sum(\text{jumlah atom} \times A_r)$$

Contoh: $M_r\ \mathrm{H_2O} = 2(1) + 16 = 18$, sehingga massa molar air = 18 g/mol. $M_r\ \mathrm{C_{12}H_{22}O_{11}}$ (gula pasir) $= 12(12) + 22(1) + 11(16) = 342$.

Ketuk lambang unsur ini untuk melihat kartunya: H C N O Na Cl Fe Au. Di buku ini kita memakai Ar yang dibulatkan seperti di buku sekolah (H 1, C 12, N 14, O 16, Na 23, Cl 35,5) kecuali soal memberi nilai lain.

MOLEKUL 3D

Hitung atomnya, dapatkan Mr



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Air H_2O Mr ≈ 18,02 PubChem ↗

Molekul bengkok dengan sudut ±104,5°. Dua pasang elektron bebas pada O membuatnya polar dan mampu berikatan hidrogen.

Pilih molekul, hitung atom setiap unsur (putar molekulnya supaya tidak ada yang tersembunyi!), lalu hitung Mr-nya sendiri. Cocokkan dengan label Mr di bawah gambar. Kafein dari kopi Gayo punya 24 atom: berapa C, H, N, dan O?

Dari massa molar, kita dapat menghubungkan massa dengan mol:

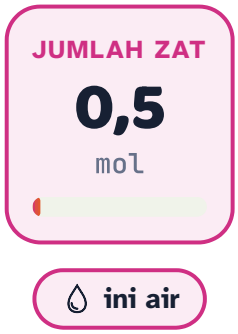
RUMUS HIDUP

Mol dari massa

$$n = \frac{m}{M_r}$$

Jumlah mol = massa yang ditimbang dibagi massa satu mol.

m Massa zat `g` | M_r Massa molar `g/mol` | n Jumlah zat `mol`



9 g zat dengan Mr **18** = **0,5** mol, berisi **3,011 × 10²³** partikel.

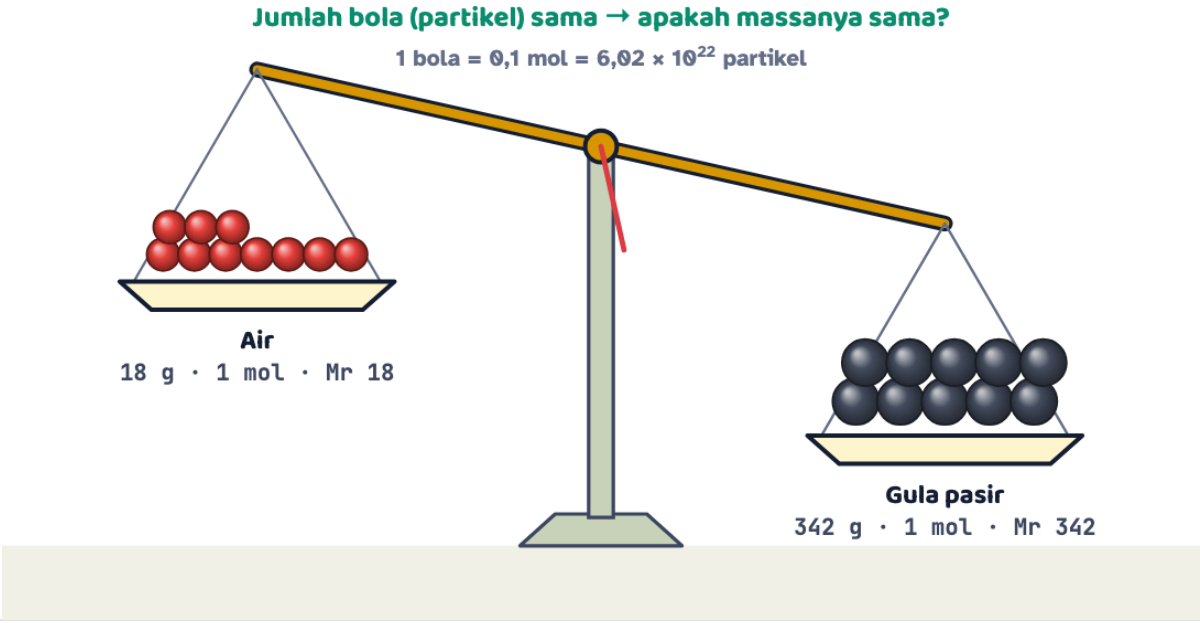
Satuan Nusantara: ≈ 50% dari satu mol (6,02 × 10²³ partikel) · ≈ 9% dari air dalam gelas 100 mL · ≈ 179 × aspirin dalam satu tablet 500 mg

Cek satuan: g ÷ (g/mol) = mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MOL-MASSA

LAB MINI Timbangan Mol: sama mol atau sama massa?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-17



massa kiri	massa kanan	mol kiri	mol kanan	Timbangan
18 g	342 g	1 mol	1 mol	kanan lebih berat

Mode **mol sama**: kedua piring berisi jumlah partikel yang sama. Mengapa timbangan tetap miring? Mode **massa sama**: timbangan seimbang, tetapi hitung bola-bolanya. Setiap bola mewakili 0,1 mol partikel.

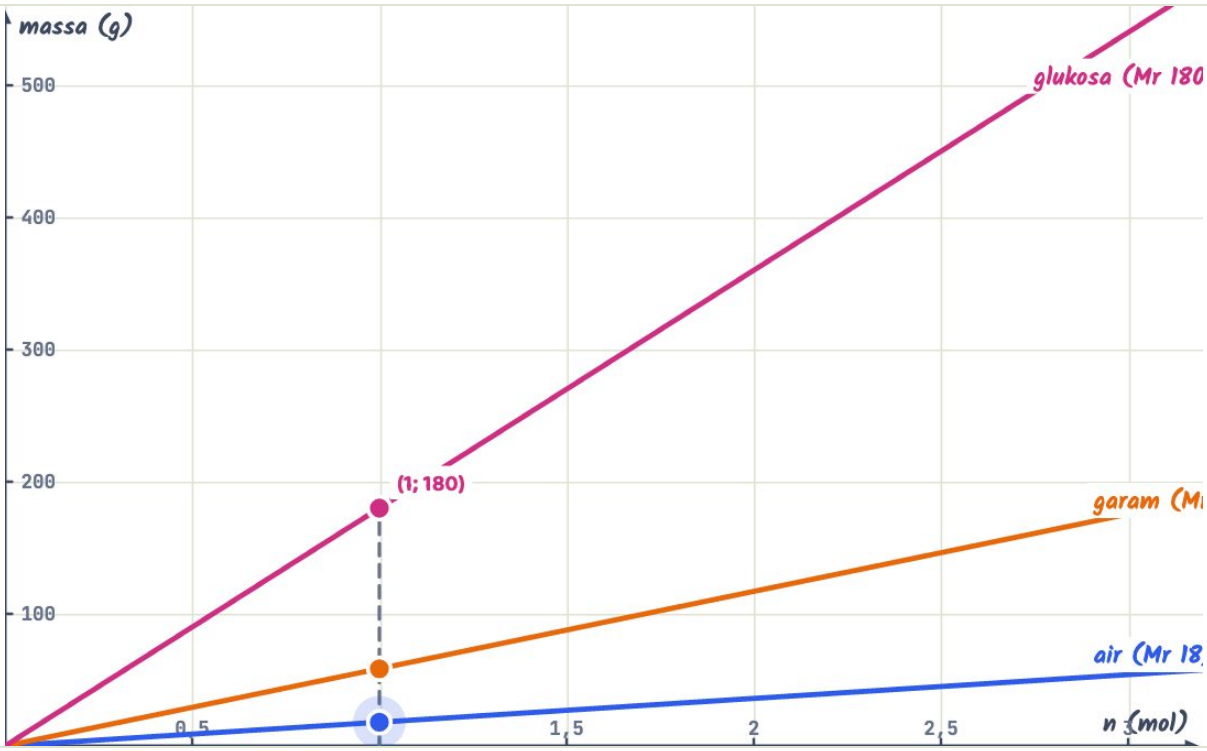
GRAFIK HIDUP

Garis massa–mol: kemiringannya adalah Mr

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-17

$$m = M_r \times n$$

$n = 1$ mol: $m_{H_2O} = 18$ g, $m_{NaCl} = 58{,}5$ g, $m_{C_6H_{12}O_6} = 180$ g



n = 1 mol: massa = Mr gram

massa air	massa garam	massa glukosa
18 g	58,5 g	180 g

Seret titik biru. Semua garis lewat titik (0, 0): tanpa zat, tanpa massa. Garis yang lebih curam milik zat dengan Mr lebih besar.

MITOS

"Satu mol semua zat massanya sama."

FAKTA

Yang sama adalah **jumlah partikelnya**, bukan massanya. 1 mol air = 18 g, 1 mol gula pasir = 342 g, sama seperti selusin kerupuk lebih ringan daripada selusin kelapa.

MITOS

"Mol hanya dipakai untuk gas."

FAKTA

Mol berlaku untuk zat apa saja: padat (garam), cair (air), gas (oksigen), bahkan ion dan elektron. Yang khusus untuk gas hanyalah **volume molar**.

MITOS

"Ar oksigen 16, jadi satu atom O bermassa 16 gram."

FAKTA

16 gram adalah massa **satu mol** atom O. Satu atom O hanya $16/(6{,}022 \times 10^{23}) \approx 2{,}66 \times 10^{-23}$ gram.

17.4 Volume molar gas

Gas punya keistimewaan. Pada suhu dan tekanan yang sama, satu mol gas apa saja (hidrogen yang ringan maupun karbon dioksida yang berat) menempati **volume yang hampir sama**. Alasannya, partikel gas saling berjauhan, sehingga ukuran partikelnya sendiri hampir tidak berpengaruh. Yang menentukan volume hanyalah *berapa banyak* partikelnya.

Tebak Dulu!

Satu balon diisi 1 mol gas hidrogen (molekul paling ringan), balon lain diisi 1 mol karbon dioksida (22 kali lebih berat). Pada suhu dan tekanan yang sama, balon mana yang lebih besar?

- Balon karbon dioksida, karena molekulnya lebih besar dan lebih berat.
- Balon hidrogen, karena gas ringan selalu lebih mengembang.
- Sama besar, karena jumlah molekulnya sama.
- Tidak bisa ditentukan tanpa menimbang.

Jawabannya: sama besar. Molekul gas sangat berjauhan; ruang di antara mereka jauh lebih besar daripada ukuran molekulnya sendiri. Jadi volume gas hanya bergantung pada *berapa banyak* partikelnya (serta suhu dan tekanan), bukan jenisnya. Balon CO_2 memang jauh lebih berat, tetapi ukurannya sama.

Keadaan	Suhu & tekanan	Volume 1 mol gas
STP (standar, buku sekolah Indonesia)	0 °C, 1 atm	22,4 L
RTP (suhu kamar, dipakai IGCSE)	25 °C, 1 atm	24 L (= 24 dm^3)
Keadaan lain	T dan P sembarang	pakai $PV = nRT$ (Bab 14)

RUMUS HIDUP **Volume gas pada STP**

$$V = n \times 22{,}4$$

Setiap mol gas pada 0 °C dan 1 atm memakan tempat 22,4 liter, kira-kira sebanyak isi galon air isi ulang.

n Jumlah gas mol

V Volume gas (STP) L

VOLUME GAS (STP)

22,4

L

1 mol gas pada STP = **22,4** L ≈ **1,179** galon air isi ulang (19 L).

Satuan Nusantara: ≈ 1 × 1 mol gas pada STP · ≈ 1,2 × galon air isi ulang · ≈ 15 × botol air mineral besar

Cek satuan: mol × (L/mol) = L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-VOLUME-STP

⚠ **AWAS JEBAKAN**

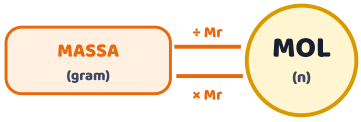
Volume 22,4 L/mol **hanya untuk gas**, dan hanya pada 0 °C dan 1 atm. Satu mol air cair hanya bervolume 18 mL (kira-kira satu sendok makan), bukan 22,4 L! Perhatikan juga: IUPAC kini memakai STP 0 °C dan 1 bar, yang memberi 22,7 L/mol. Ikuti nilai yang diberikan soal.

17.5 Jembatan mol

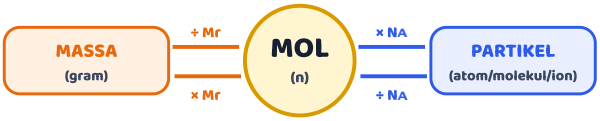
Semua perhitungan di bab ini dapat diringkas dalam satu peta. Mol adalah **stasiun pusat**: dari massa, jumlah partikel, atau volume gas, kita selalu lewat mol dulu, baru pergi ke tujuan.



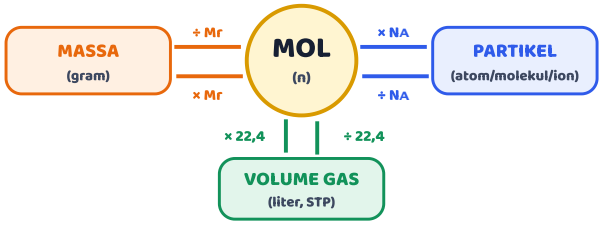
Langkah 1. Mol adalah stasiun pusat. Semua besaran lain terhubung ke sini.



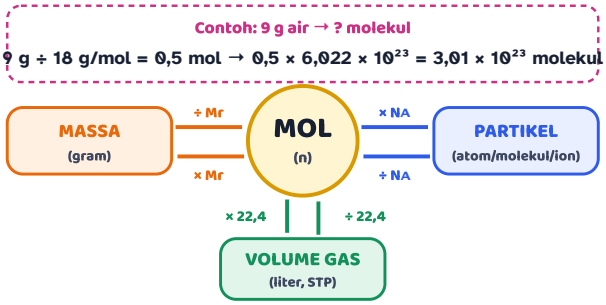
Langkah 2. Dari **massa** ke mol: bagi dengan massa molar M_r. Dari mol ke massa: kalikan dengan M_r.



Langkah 3. Dari mol ke **jumlah partikel**: kalikan dengan $N_A = 6{,}022 \times 10^{23}$. Arah sebaliknya: bagi dengan N_A.



Langkah 4. Khusus gas: dari mol ke **volume** pada STP, kalikan dengan 22,4 L/mol. Sebaliknya, bagi dengan 22,4.



Langkah 5. Contoh perjalanan: 9 g air ÷ 18 = 0,5 mol, lalu × N_A = $3{,}01 \times 10^{23}$ molekul. Selalu lewat mol!



TRIK KAK TIRTA

"Jangan pernah melompati stasiun pusat." Ingin dari gram ke liter? Gram → mol → liter. Ingin dari partikel ke gram? Partikel → mol → gram. Tulis satuan di setiap langkah: kalau satuannya tidak saling mencoret menjadi satuan yang diminta, pasti ada yang keliru.

CONTOH **Dari massa ke partikel**

Segelas air berisi 36 g air ($M_r = 18$). Berapa mol air dan berapa jumlah molekulnya?

1. Massa ke mol: $n = \frac{m}{M_r} = \frac{36\ \text{g}}{18\ \text{g/mol}} = 2$ mol.
2. Mol ke partikel: $N = n \times N_A = 2 \times 6{,}022 \times 10^{23} = 1{,}204 \times 10^{24}$ molekul.

Ada 2 mol air, yaitu $1{,}2 \times 10^{24}$ molekul, dalam segelas kecil air.

KERJAKAN BERSAMA **Napas karbon dioksida**

Dalam 30 menit beristirahat, seseorang menghembuskan ±11 g CO_2. Berapa volume gas itu pada STP, dan berapa molekulnya? (Ar C = 12, O = 16)

1. Hitung Mr: $M_r\ CO_2 = 12 + 2(16) = 44$.
2. Massa ke mol: $n = 11/44 = 0{,}25$ mol.
3. Mol ke volume (STP): $V = 0{,}25 \times 22{,}4 = 5{,}6$ L.
4. Mol ke partikel: $N = 0{,}25 \times 6{,}022 \times 10^{23} = 1{,}5 \times 10^{23}$ molekul.

±5,6 L gas CO_2 (lebih dari isi botol air mineral besar) yang berisi $1{,}5 \times 10^{23}$ molekul. Itu sebabnya ruang kelas tertutup perlu ventilasi!

ADU CEPAT **Massa → mol**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-17

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

n = m ÷ Mr. Contoh: 29,25 g garam (Mr 58,5) → 0,5 mol.

17.6 Komposisi persen, rumus empiris, dan air kristal

Petani memilih pupuk berdasarkan kadar nitrogennya. Dari rumus kimia, kita bisa menghitung **komposisi persen** setiap unsur:

$$\%\,\text{unsur} = \frac{\text{jumlah atom} \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

RUMUS HIDUP **Kadar unsur dalam senyawa**

$$\%X = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Bagian massa yang 'disumbangkan' unsur X dari seluruh massa molar.

- k Jumlah atom X
- A_r Ar unsur X
- M_r Mr senyawa
- $\%X$ Kadar X %

KADAR X

46,67

%

kadar N pupuk urea

Dalam 100 kg senyawa ada **46,67** kg unsur X.

Cek satuan: tanpa satuan: g/g × 100%

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KADAR-UNSUR

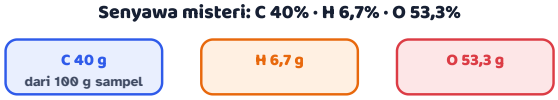
KIMIA NUSANTARA · PUPUK UNTUK SAWAH

Pabrik pupuk di Bontang, Gresik, dan Palembang mengubah nitrogen udara menjadi **urea**, $CO(NH_2)_2$, dengan kadar N 46,7%. Amonium sulfat, $(NH_4)_2SO_4$, hanya 21,2% N. Jadi untuk memberi 46 kg nitrogen ke satu hektar sawah, petani cukup menebar ±100 kg urea, tetapi butuh ±217 kg amonium sulfat. Hitungan mol menghemat ongkos angkut!

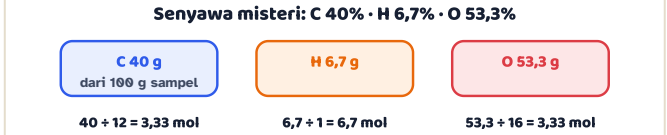
Rumus empiris adalah perbandingan atom paling sederhana, sedangkan **rumus molekul** adalah jumlah atom sebenarnya dalam satu molekul. Glukosa $C_6H_{12}O_6$ punya rumus empiris CH_2O; rumus molekulnya adalah $(CH_2O)_6$.



Langkah 1. Data analisis biasanya berupa persen massa. Misterinya: C 40%, H 6,7%, O 53,3%.



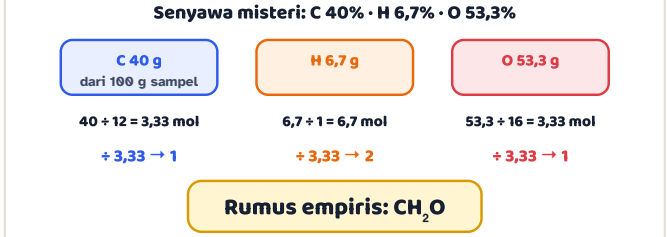
Langkah 2. Anggap sampelnya 100 g, sehingga persen langsung menjadi gram.



Langkah 3. Ubah setiap massa menjadi mol dengan membagi Ar-nya (C 12, H 1, O 16).



Langkah 4. Bagi semua jumlah mol dengan yang terkecil (3,33) untuk mendapat perbandingan bilangan bulat.



Langkah 5. Perbandingan C : H : O = 1 : 2 : 1, jadi rumus empirisnya CH_2O. Glukosa, asam asetat, dan formaldehida semuanya punya rumus empiris ini!

COBA SENDIRI **Rahasia vitamin C**

Analisis vitamin C memberi: C 40,9%, H 4,55%, dan O 54,5% (massa). Mr-nya 176. Tentukan rumus empiris dan rumus molekulnya. (Ar C = 12, H = 1, O = 16)

1. Anggap ada 100 g sampel: C 40,9 g, H 4,55 g, O 54,5 g.
2. Ubah ke mol: C $= 40{,}9/12 = 3{,}41$; H $= 4{,}55/1 = 4{,}55$; O $= 54{,}5/16 = 3{,}41$.
3. Bagi dengan yang terkecil (3,41): C : H : O $= 1 : 1{,}33 : 1$.
4. Kalikan 3 supaya bulat: C : H : O $= 3 : 4 : 3$. Rumus empiris $\mathrm{C_3H_4O_3}$ (Mr empiris = 88).
5. $176/88 = 2$, jadi rumus molekul $= (\mathrm{C_3H_4O_3})_2 = \mathrm{C_6H_8O_6}$.

Rumus empiris $\mathrm{C_3H_4O_3}$, rumus molekul $\mathrm{C_6H_8O_6}$ (asam askorbat). Cek: $6(12) + 8(1) + 6(16) = 176$ ✔

Beberapa kristal garam mengikat molekul air di dalam kisinya, disebut **air kristal** atau **hidrat**. Terusi (tembaga(II) sulfat pentahidrat, $\mathrm{CuSO_4 \cdot 5\,H_2O}$) yang biru cerah berubah menjadi serbuk putih $\mathrm{CuSO_4}$ saat dipanaskan karena airnya menguap. Dengan menimbang sebelum dan sesudah pemanasan, kita bisa menghitung jumlah air kristal x.

KERJAKAN BERSAMA **Menghitung air kristal**

Sebanyak 4,99 g kristal biru $\mathrm{CuSO_4 \cdot x\,H_2O}$ dipanaskan sampai beratnya tetap, tersisa 3,19 g serbuk putih $\mathrm{CuSO_4}$. Tentukan x. (Mr $\mathrm{CuSO_4}$ = 159,5; $\mathrm{H_2O}$ = 18)

1. Massa air yang hilang: $4{,}99 - 3{,}19 = 1{,}80$ g.
2. Mol $\mathrm{CuSO_4} = 3{,}19/159{,}5 = 0{,}0200$ mol; mol $\mathrm{H_2O} = 1{,}80/18 = 0{,}100$ mol.
3. Perbandingan $\mathrm{H_2O} : \mathrm{CuSO_4} = 0{,}100 : 0{,}0200 = 5 : 1$.

$x = 5$, jadi rumusnya $\mathrm{CuSO_4 \cdot 5\,H_2O}$, terusi yang dijual untuk membersihkan kolam ikan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ANALISIS PEMBAKARAN: MEMBACA RUMUS DARI ASAP

Bagaimana kimiawan menemukan komposisi senyawa organik yang baru? Sampel dibakar sempurna dalam oksigen. Semua C menjadi CO_2 dan semua H menjadi H_2O, lalu keduanya ditangkap dan ditimbang. Oksigen dihitung dari selisih.

Contoh: 0,230 g senyawa C, H, O menghasilkan 0,440 g CO_2 dan 0,270 g H_2O.

- mol C = mol CO_2 = 0,440/44 = 0,0100 mol → 0,120 g C
- mol H = 2 × mol H_2O = 2 × 0,270/18 = 0,0300 mol → 0,0300 g H
- massa O = 0,230 − 0,120 − 0,0300 = 0,0800 g → 0,00500 mol O

C : H : O = 0,0100 : 0,0300 : 0,00500 = 2 : 6 : 1, sehingga rumus empirisnya C_2H_6O. Bila spektrometri massa (Bab 39) memberi Mr 46, rumus molekulnya juga C_2H_6O: etanol atau dimetil eter. Untuk membedakan keduanya, kita butuh spektrum IR atau NMR!

Kimia di sekitarmu

Dosis obat

Satu tablet parasetamol 500 mg (Mr 151) berisi 3,3 mmol obat, sekitar 2×10^{21} molekul. Dokter dan apoteker menghitung dosis dengan mol.

Takaran pupuk

Kadar N, P, dan K pada karung pupuk dihitung dari rumus kimianya. Petani yang paham hitungan mol tidak membeli pupuk berlebih.

Tabung LPG 3 kg

Isinya sekitar 60 mol campuran propana–butana. Bila semuanya menjadi gas pada suhu kamar, volumenya ±1.400 liter!

Oralit & infus

Cairan oralit dan infus diracik dalam milimol per liter supaya jumlah ion natrium dan kalium tepat untuk tubuh.

Pabrik semen

Insinyur menghitung berapa ton kapur, $CaCO_3$, yang dibutuhkan untuk membuat sekian ton kapur tohor, CaO, lewat perbandingan mol.

Cek Cepat

Berapa mol 4 g gas hidrogen, H_2? (Ar H = 1)

- 4 mol
- 2 mol
- 1 mol
- 0,5 mol

Manakah yang berisi jumlah partikel paling banyak?

- 1 mol gula pasir
- 1 mol air
- 1 mol besi
- Ketiganya sama banyak

Pada STP, 11,2 L gas oksigen berisi berapa mol O_2?

- 0,5 mol
- 1 mol
- 2 mol
- 16 mol

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: satu mol di dapurku

Bahan: timbangan dapur digital, garam, gula pasir, air, gelas, sendok makan, kertas label.

1. Hitung massa 1 mol garam (NaCl, Mr 58,5), 1 mol gula pasir ($C_{12}H_{22}O_{11}$, Mr 342), dan 1 mol air (Mr 18).
2. Timbang masing-masing di atas kertas atau gelas (jangan lupa kurangi massa wadahnya).
3. Jajarkan ketiganya dan beri label "1 mol · $6{,}022 \times 10^{23}$ partikel".
4. Hitung berapa sendok makan yang dibutuhkan untuk setiap "satu mol".

Pertanyaan: Ketiga tumpukan berisi jumlah partikel yang sama. Mengapa ukurannya sangat berbeda? Tumpukan mana yang partikelnya paling "gemuk"?

RINGKASAN KILAT

Bab 17 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **mol** sebagai satuan jumlah zat dan memakai **bilangan Avogadro**
- menghitung **massa molar** (Ar dan Mr) dari rumus kimia
- mengubah massa, jumlah partikel, dan volume gas melalui **jembatan mol**
- menghitung **komposisi persen** unsur dalam senyawa, misalnya kadar nitrogen pupuk
- menentukan **rumus empiris**, **rumus molekul**, dan jumlah air kristal dari data percobaan

Istilah kunci

mol · bilangan Avogadro · massa atom relatif (Ar) · massa molekul relatif (Mr) · massa molar · komposisi persen · Rumus empiris · rumus molekul · air kristal · hidrat

Rumus penting

$$N = n \times N_A$$

Jumlah partikel dari mol. Jumlah partikel sama dengan banyaknya 'kotak mol' dikali isi setiap kotak.

$$n = \frac{m}{M_r}$$

Mol dari massa. Jumlah mol = massa yang ditimbang dibagi massa satu mol.

$$V = n \times 22{,}4$$

Volume gas pada STP. Setiap mol gas pada 0 °C dan 1 atm memakan tempat 22,4 liter, kira-kira sebanyak isi galon air isi ulang.

$$\%X = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Kadar unsur dalam senyawa. Bagian massa yang 'disumbangkan' unsur X dari seluruh massa molar.

Jangan sampai terjebak

- Sebutkan dulu partikelnya!
- Volume 22,4 L/mol hanya untuk gas, dan hanya pada 0 °C dan 1 atm.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=17

🧩 Teka-teki untuk Bab 18

Resep martabak manis Kak Tirta: 2 butir telur dan 1 bungkus tepung untuk satu adonan. Di dapur ada 7 butir telur dan 3 bungkus tepung. Berapa adonan paling banyak yang bisa dibuat, dan bahan apa yang tersisa? Kimiawan menghadapi teka-teki yang sama setiap kali mereaksikan zat.

▼ **Intip petunjuk**

Telur cukup untuk $7/2 = 3{,}5$ adonan, tepung untuk 3 adonan. Yang habis lebih dulu (tepung) menentukan hasil: 3 adonan, sisa 1 telur. Di Bab 18 "tepung" ini disebut **pereaksi pembatas**, dan hitungannya memakai mol.

BAB 18 · STOIKIOMETRI

18 Stoikiometri: Resep Rahasia Setiap Reaksi

Setiap reaksi kimia punya resep, persis seperti martabak dan es teh manis. Kalau kamu bisa membaca resepnya, kamu bisa meramal berapa ton pupuk keluar dari pabrik, bahan mana yang habis duluan, dan berapa banyak yang terbuang.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membaca **koefisien** persamaan setara sebagai perbandingan mol, lalu menghitung massa produk dari massa pereaksi;
- menentukan **pereaksi pembatas** dan **sisa pereaksi** dengan tabel mula-mula, reaksi, sisa;
- menghitung **hasil teoretis**, **rendemen**, dan **kemurnian** pada proses nyata seperti pabrik semen dan pupuk;
- menerapkan stoikiometri pada **gas** (volume molar) dan **larutan** (molaritas sebagai pengantar);
- menyelesaikan reaksi berurutan dan analisis campuran, serta menilai **ekonomi atom** suatu proses.

ES TEH UNTUK SATU KELAS

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kamu mereaksikan 3 g gas hidrogen dengan 16 g gas oksigen menjadi air. Pereaksi mana yang habis lebih dulu?

- Hidrogen, karena massanya jauh lebih kecil.
- Oksigen, walaupun massanya lebih dari lima kali massa hidrogen.
- Keduanya habis bersamaan, karena hukum kekekalan massa.
- Tidak bisa ditentukan tanpa mengetahui volume wadahnya.

Jawabannya: oksigen. Massa menipu! 3 g H_2 berisi 1,5 mol molekul, sedangkan 16 g O_2 hanya 0,5 mol. Resepnya $2\,H_2 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O$: 0,5 mol O_2 cukup bereaksi dengan 1 mol H_2, lalu habis. Masih tersisa 0,5 mol H_2 (1 g). Pembatas ditentukan oleh *mol dibagi koefisien*, bukan oleh massa.

18.1 Koefisien adalah resep dalam satuan mol

Resep martabak manis Kak Tirta berbunyi: 2 butir telur + 1 bungkus tepung → 1 adonan. Resep itu tidak menyebut gram, tetapi **jumlah satuan**. Persamaan reaksi yang setara bekerja dengan cara yang sama. Koefisien di depan setiap rumus menyatakan berapa **partikel**, atau berapa **mol** partikel, yang bereaksi.

Bahasa sederhana · Bayangkan dua molekul hidrogen bertemu satu molekul oksigen. Atom-atomnya bertukar pasangan dan menjadi dua molekul air. Kalau kamu punya dua lusin molekul hidrogen dan satu lusin molekul oksigen, hasilnya dua lusin molekul air. Kalau punya 2 mol hidrogen dan 1 mol oksigen, hasilnya 2 mol air. Resepnya sama, hanya "kotaknya" yang lebih besar.

DEFINISI · STOIKIOMETRI

Stoikiometri adalah perhitungan jumlah zat (massa, mol, jumlah partikel, volume) yang bereaksi dan yang terbentuk dalam suatu reaksi kimia, berdasarkan persamaan reaksi yang setara. Namanya berasal dari bahasa Yunani *stoicheion* (unsur) dan *metron* (ukuran).

Mari membaca persamaan pembentukan air pada beberapa tingkat sekaligus:

Dibaca sebagai	$2\,H_2$	+ O_2	→ $2\,H_2O$
Partikel	2 molekul	1 molekul	2 molekul
Mol	**2 mol**	**1 mol**	**2 mol**
Massa (Ar H = 1, O = 16)	4 g	32 g	36 g
Volume gas (T dan P sama)	2 volume	1 volume	2 volume (bila air berupa uap)

Perhatikan baris massa: 4 g + 32 g = 36 g. Massa total tetap (Hukum Lavoisier, Bab 16), tetapi **perbandingan massanya 4 : 32 : 36, bukan 2 : 1 : 2**. Koefisien hanya sama dengan perbandingan mol, partikel, dan (untuk gas) volume.

ATURAN · PERBANDINGAN KOEFISIEN

Untuk reaksi setara $a\,\mathrm{A} + b\,\mathrm{B} \rightarrow c\,\mathrm{C} + d\,\mathrm{D}$:

$$n_\mathrm{A} : n_\mathrm{B} : n_\mathrm{C} : n_\mathrm{D} = a : b : c : d \qquad \Longrightarrow \qquad n_\mathrm{C} = n_\mathrm{A} \times \frac{c}{a}$$

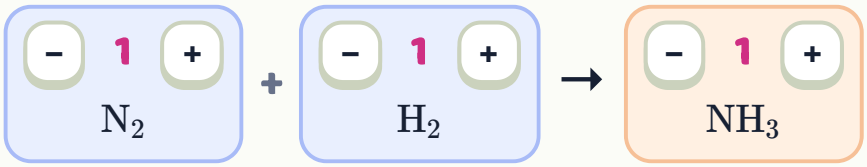
Artinya: **mol yang dicari = mol yang diketahui × (koefisien yang dicari ÷ koefisien yang diketahui)**.

AWAS JEBAKAN

Koefisien adalah perbandingan mol, bukan perbandingan massa. Pada $2\,H_2 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O$, 2 g hidrogen tidak bereaksi dengan 1 g oksigen; 2 *mol* hidrogen (4 g) bereaksi dengan 1 *mol* oksigen (32 g). Selalu ubah massa ke mol dulu sebelum memakai koefisien.

Semua hitungan di bab ini berdiri di atas satu syarat: **persamaannya harus setara**. Koefisien yang salah membuat seluruh pabrik salah takar. Pemanasan dulu dengan reaksi-reaksi industri yang menghidupi Indonesia:

PENYETARA REAKSI — Setarakan reaksi-reaksi industri Nusantara



Unsur	Kiri	Kanan	
N	2 ●●	1 ●	✕
H	2 ○○	3 ○○○	✕

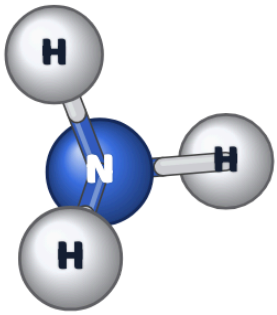


Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 7 null

Berturut-turut: proses Haber (amonia), pembuatan pupuk urea, pembentukan alit (mineral utama klinker semen), pembakaran LPG (propana), reduksi nikel oksida dengan karbon (disederhanakan), tanur tinggi besi, dan pembakaran bensin (oktana). Setelah setara, baca koefisiennya sebagai resep mol: berapa mol O_2 untuk setiap mol propana?

MOLEKUL 3D — Atom-atom yang bertukar pasangan di pabrik urea



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Amonia H_3N | Mr ≈ 17,03 | PubChem ↗

Piramida trigonal (±107°). Bahan baku pupuk urea; berbau menyengat seperti bau pesing.

Reaksinya $2\,NH_3 + CO_2 \longrightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O$. Hitung atom N, H, C, dan O pada dua molekul amonia ditambah satu molekul karbon dioksida, lalu bandingkan dengan satu molekul urea ditambah satu molekul air. Tidak ada atom yang hilang, hanya pasangannya yang berganti!

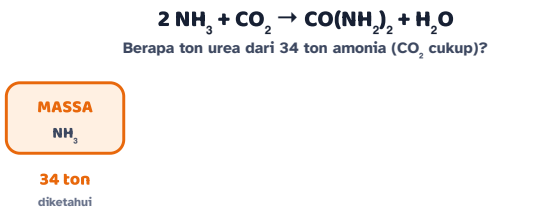


TAMU DARI MASA LALU

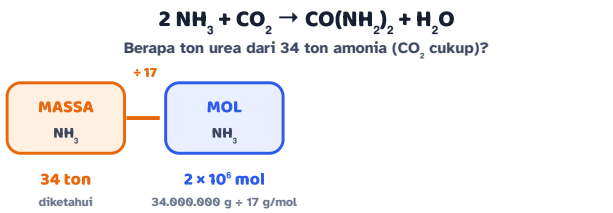
Pada 1792, kimiawan Jerman **Jeremias Benjamin Richter** memperkenalkan kata *stoikiometri*. Ia menimbang dengan sabar berapa bagian asam yang tepat menetralkan sekian bagian basa, dan menemukan bahwa perbandingannya selalu tetap. Kala itu banyak ilmuwan belum percaya pada atom, tetapi "resep" reaksi sudah bisa diukur dengan neraca!

18.2 Dari massa pereaksi ke massa produk

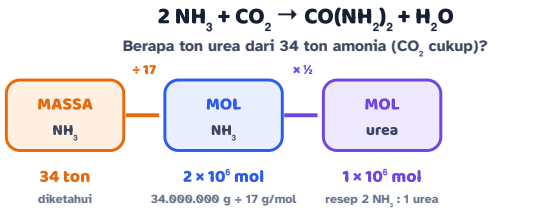
Pabrik tidak menghitung molekul; pabrik menimbang dalam ton. Untungnya, Bab 17 sudah memberi kita jembatan mol. Jalan stoikiometri selalu terdiri atas tiga langkah: **massa → mol**, lalu **mol → mol** memakai koefisien, lalu **mol → massa**.



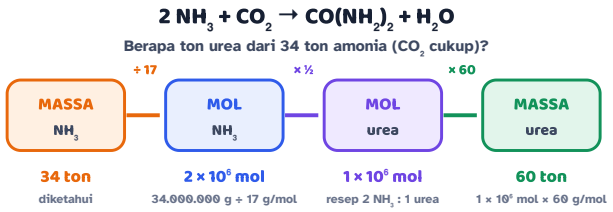
Langkah 1. Mulai dari persamaan setara dan massa yang diketahui: 34 ton $\mathrm{NH_3}$ ($M_r = 17$).



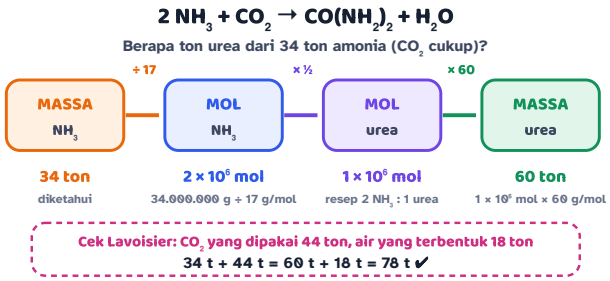
Langkah 2. Massa → mol: $34 \times 10^6\ \mathrm{g} \div 17\ \mathrm{g/mol} = 2 \times 10^6$ mol $\mathrm{NH_3}$.



Langkah 3. Mol → mol lewat koefisien: $n_{\text{urea}} = 2 \times 10^6 \times \frac{1}{2} = 1 \times 10^6$ mol. Inilah satu-satunya langkah yang memakai persamaan reaksi.



Langkah 4. Mol → massa: $1 \times 10^6\ \mathrm{mol} \times 60\ \mathrm{g/mol} = 6 \times 10^7$ g = **60 ton urea**.



Langkah 5. Cek kewajaran dengan kekekalan massa: massa pereaksi (34 + 44) sama dengan massa produk (60 + 18). Hitunganmu konsisten!

TRIK KAK TIRTA

Hafalkan jalur **G–M–M–G**: Gram → Mol → Mol → Gram. Koefisien hanya boleh dipakai di tengah, pada langkah mol → mol. Kalau kamu mengalikan koefisien dengan gram, berhentilah: itu tanda kamu melompati stasiun mol. Bonus: satuan ton dan kilogram boleh langsung dipakai asalkan konsisten (1 kmol amonia = 17 kg).

RUMUS HIDUP

Massa produk dari massa pereaksi

$$m_B = \frac{m_A}{M_A} \times \frac{b}{a} \times M_B$$

Ubah massa A ke mol, kalikan dengan perbandingan koefisien (resepnya), lalu ubah mol B kembali ke massa.

- m_A Massa pereaksi A `g`
- M_A Mr pereaksi A `g/mol`
- a Koefisien A
- b Koefisien B
- M_B Mr produk B `g/mol`
- m_B Massa produk B `g`

MASSA PRODUK B

60

g

🌾 **34 g amonia → 60 g urea**

34 g A = **2** mol A → **1** mol B → **60** g B.

Cek satuan: g ÷ (g/mol) × (mol/mol) × (g/mol) = g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-STOI-MASSA-PRODUK

CONTOH **Batu kapur menjadi kapur tohor**

Kapur tohor (CaO) untuk pengolahan air dan pembuatan semen dibuat dengan memanaskan batu kapur: $\mathrm{CaCO_3\,(s)} \xrightarrow{\Delta} \mathrm{CaO\,(s)} + \mathrm{CO_2\,(g)}$. Berapa kg CaO dan berapa kg $\mathrm{CO_2}$ yang terbentuk dari 200 kg $\mathrm{CaCO_3}$ murni? (Ar Ca = 40, C = 12, O = 16)

1. Mr: $\mathrm{CaCO_3} = 100$, $\mathrm{CaO} = 56$, $\mathrm{CO_2} = 44$.
2. Massa → mol: $n_{\mathrm{CaCO_3}} = 200\ \mathrm{kg} \div 100\ \mathrm{kg/kmol} = 2$ kmol.
3. Mol → mol: koefisien 1 : 1 : 1, jadi $n_{\mathrm{CaO}} = n_{\mathrm{CO_2}} = 2$ kmol.
4. Mol → massa: CaO $= 2 \times 56 = 112$ kg; $\mathrm{CO_2} = 2 \times 44 = 88$ kg.

112 kg CaO dan 88 kg CO_2. Cek: 112 + 88 = 200 kg ✔. Hampir separuh massa batu kapur lepas ke udara sebagai gas!

KIMIA NUSANTARA · DARI GAS ALAM KE KARUNG UREA

Di pabrik pupuk di Bontang, Gresik, Palembang, dan Cikampek, gas alam (metana) diolah menjadi hidrogen, lalu hidrogen digabung dengan nitrogen udara menjadi amonia: $\mathrm{N_2} + 3\,\mathrm{H_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{NH_3}$. Karbon dioksida yang ikut terbentuk saat membuat hidrogen tidak dibuang begitu saja, tetapi direaksikan dengan amonia menjadi urea. Dengan stoikiometri, insinyur tahu bahwa setiap 60 ton urea membutuhkan 34 ton amonia dan 44 ton $\mathrm{CO_2}$. Satu karung urea 50 kg di sawah adalah hasil dari ribuan hitungan mol!

18.3 Pereaksi pembatas dan sisa pereaksi

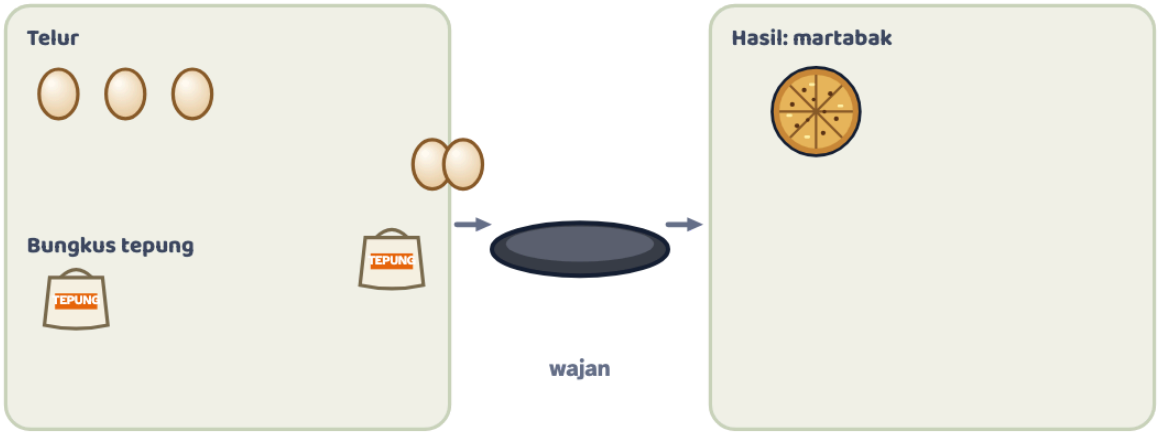
Ingat teka-teki di akhir Bab 17? Resepnya 2 telur + 1 bungkus tepung → 1 adonan martabak, dan di dapur ada 7 telur serta 3 bungkus tepung. Telur cukup untuk $7 \div 2 = 3{,}5$ adonan, tepung hanya cukup untuk $3 \div 1 = 3$ adonan. Jadi hasilnya **3 adonan**, dan tersisa **1 telur**. Tepung adalah bahan pembatas, walaupun jumlah bungkusnya lebih sedikit dan "terlihat" tidak penting.

Bahasa sederhana · Dalam reaksi kimia, biasanya salah satu pereaksi habis lebih dulu. Begitu ia habis, reaksi berhenti, sebanyak apa pun pereaksi lain yang masih ada. Pereaksi yang habis duluan itu menentukan berapa banyak produk yang bisa dibuat.

LAB MINI **Pabrik Martabak: siapa yang habis duluan?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

Resep: 2 telur + 1 bungkus tepung → 1 martabak



Resep ke-2 dari 3 sedang berlangsung...

	telur	tepung	martabak
Mula-mula	7	3	0
Reaksi	-2	-1	+1
Sisa	5	2	1

Hasil	Sisa A	Sisa B	Pereaksi pembatas
3 martabak	1 telur	0 tepung	tepung

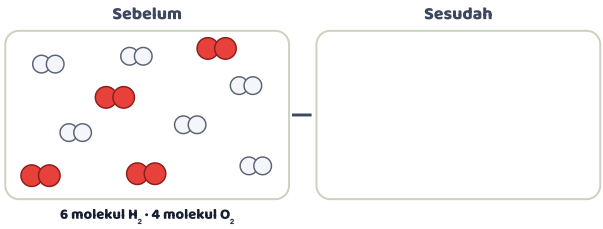
Mode **dapur**: atur jumlah telur dan bungkus tepung, lalu tekan ▶. Mode **molekul**: bahan yang sama menjadi molekul H_2 dan O_2 yang bergabung membentuk H_2O. Coba buat 8 molekul H_2 dan 3 molekul O_2: siapa yang tersisa? Lalu cari kombinasi yang membuat *tidak ada* sisa sama sekali.

DEFINISI · PEREAKSI PEMBATAS

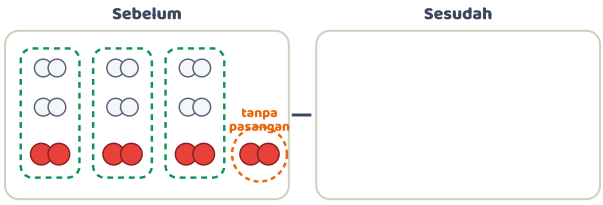
Pereaksi pembatas adalah pereaksi yang habis lebih dulu dalam reaksi, sehingga menentukan jumlah maksimum produk. Pereaksi lain yang masih tersisa disebut **pereaksi berlebih**, dan jumlah yang tidak ikut bereaksi disebut **sisa pereaksi**.

ATURAN · MENEMUKAN PEREAKSI PEMBATAS

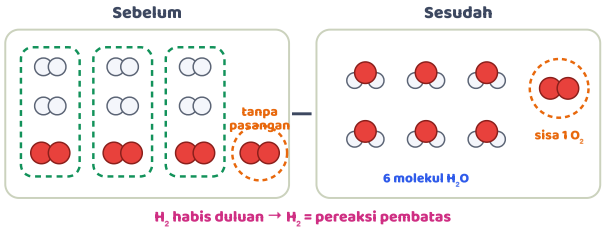
1. Ubah jumlah setiap pereaksi menjadi mol.
2. Bagi mol setiap pereaksi dengan koefisiennya: $\frac{n_A}{a}$ dan $\frac{n_B}{b}$.
3. **Hasil bagi terkecil = pereaksi pembatas.** Semua jumlah produk dan sisa dihitung dari pereaksi ini.



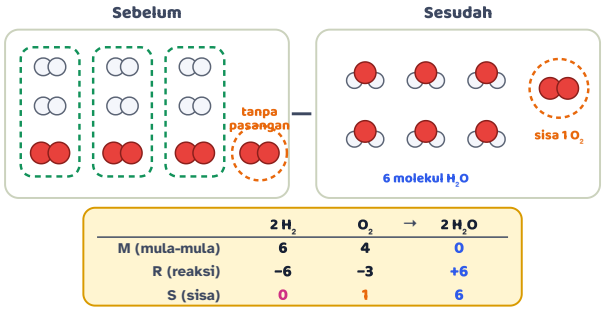
Langkah 1. Campuran berisi 6 molekul $\mathrm{H_2}$ dan 4 molekul $\mathrm{O_2}$. Hidrogen lebih banyak, jadi pasti oksigen yang habis duluan... benarkah?



Langkah 2. Kelompokkan sesuai resep $2\,\mathrm{H_2} + \mathrm{O_2}$: setiap $\mathrm{O_2}$ butuh dua $\mathrm{H_2}$. Molekul $\mathrm{H_2}$ hanya cukup untuk 3 kelompok, sehingga satu $\mathrm{O_2}$ tidak kebagian pasangan.



Langkah 3. Terbentuk 6 molekul $\mathrm{H_2O}$ dan 1 molekul $\mathrm{O_2}$ tersisa. $\mathrm{H_2}$ habis duluan: $\mathrm{H_2}$ **adalah pereaksi pembatas**, padahal jumlahnya lebih banyak! Cek: $6/2 = 3$ lebih kecil daripada $4/1 = 4$.



	2 $\mathrm{H_2}$	$\mathrm{O_2}$	→	2 $\mathrm{H_2O}$
M (mula-mula)	6	4		0
R (reaksi)	−6	−3		+6
S (sisa)	0	1		6

Langkah 4. Catat dalam **tabel M–R–S** (Mula-mula, Reaksi, Sisa). Baris R selalu sebanding dengan koefisien: $6 : 3 : 6 = 2 : 1 : 2$. Tabel ini bekerja persis sama untuk mol.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Pereaksi dengan massa terkecil, atau dengan jumlah mol terkecil, belum tentu pembatas. Yang dibandingkan adalah **mol dibagi koefisien**. Pada langkah di atas, $\mathrm{H_2}$ punya mol lebih besar (6 > 4), tetapi koefisiennya 2, sehingga ia tetap habis duluan.

RUMUS HIDUP

Pereaksi pembatas: bagi dengan koefisien

$$n_{\text{produk}} = c \times \min\left(\frac{n_A}{a},\ \frac{n_B}{b}\right)$$

Hitung berapa kali 'resep' bisa dijalankan oleh setiap pereaksi. Yang paling sedikit menentukan jumlah produk.

- n_A Mol pereaksi A `mol`
- a Koefisien A
- n_B Mol pereaksi B `mol`
- b Koefisien B
- c Koefisien produk
- n_{produk} Mol produk `mol`

MOL PRODUK

3

mol

A = pereaksi pembatas

A cukup untuk **1,5** kali resep, B cukup untuk **2** kali resep. Pembatas: **A**. Sisa A = **0** mol, sisa B = **0,5** mol.

Cek satuan: mol ÷ koefisien × koefisien = mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-STOI-PEMBATAS

KERJAKAN BERSAMA **Reaktor urea dengan tabel M–R–S**

Sebuah reaktor uji diisi 68 kg NH_3 dan 66 kg CO_2. Reaksinya $2\,NH_3 + CO_2 \longrightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O$. Tentukan pereaksi pembatas, massa urea maksimum, dan massa pereaksi yang tersisa. (Mr NH_3 = 17, CO_2 = 44, urea = 60, H_2O = 18)

1. Massa → mol: $NH_3 = 68/17 = 4$ kmol; $CO_2 = 66/44 = 1{,}5$ kmol.
2. Bagi dengan koefisien: NH_3: $4/2 = 2$; CO_2: $1{,}5/1 = 1{,}5$. Terkecil: CO_2 **= pembatas**.
3. Tabel M–R–S (dalam kmol):

	2 NH_3	**CO_2**	**$CO(NH_2)_2$**	**H_2O**
Mula-mula	4	1,5	0	0
Reaksi	−3	−1,5	+1,5	+1,5
Sisa	1	0	1,5	1,5

4. Mol → massa: urea $= 1{,}5 \times 60 = 90$ kg; sisa $NH_3 = 1 \times 17 = 17$ kg; air $= 1{,}5 \times 18 = 27$ kg.

CO_2 pembatas; terbentuk 90 kg urea dan tersisa 17 kg NH_3. Cek: 68 + 66 = 134 kg = 90 + 27 + 17 ✔

PEMBATAS YANG DISENGAJA

Pabrik urea sungguhan justru sengaja memberi amonia berlebih, kira-kira 3 sampai 4 mol NH_3 untuk setiap mol CO_2, lebih banyak dari resep 2 : 1. Dengan begitu, CO_2 menjadi pembatas dan lebih banyak yang berubah menjadi urea. Amonia sisanya dipisahkan lalu dialirkan kembali ke reaktor. Memilih pereaksi pembatas adalah keputusan teknik dan ekonomi!

Apa yang terjadi bila satu pereaksi terus ditambah, sementara yang lain tetap? Di laboratorium sekolah, serbuk besi dan belerang dipanaskan bersama (oleh guru, di ruang berventilasi) membentuk besi(II) sulfida. Belerangnya boleh jadi berasal dari kawah Ijen! Seret titiknya dan perhatikan di mana grafik produk berhenti naik.

GRAFIK HIDUP

Besi + belerang: di mana grafiknya patah?

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

$$\mathrm{Fe} + \mathrm{S} \longrightarrow \mathrm{FeS} \qquad m_{\mathrm{FeS}} = 88 \times \min\left(\frac{m_{\mathrm{Fe}}}{56}, \frac{m_{\mathrm{S}}}{32}\right)$$

$$m_{\mathrm{Fe}} = 14\ \mathrm{g}, \quad m_{\mathrm{S}} = 16\ \mathrm{g} \Rightarrow m_{\mathrm{FeS}} = 22\ \mathrm{g}$$



besi habis duluan: Fe = pembatas, belerang bersisa

mol Fe	mol S	massa FeS	pembatas
0,25 mol	0,5 mol	22 g	besi

Sebelum titik setara, menambah besi menambah FeS (garis magenta naik). Sesudahnya, belerang sudah habis, sehingga besi tambahan hanya menjadi sisa (garis oranye putus-putus naik) dan FeS mendatar. Ubah massa belerang: ke mana titik patahnya bergeser? Mengapa letaknya selalu di $m_{\mathrm{Fe}} = 1{,}75 \times m_{\mathrm{S}}$?

ADU CEPAT

Pembatas kilat: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Bagi mol dengan koefisien ($H_2 \div 2$, $O_2 \div 1$). Yang terkecil adalah pembatas; mol H_2O = 2 × hasil bagi terkecil.

18.4 Hasil teoretis, rendemen, dan kemurnian

Tebak Dulu!

Laras mengendapkan kalsium karbonat dan memperoleh 10,8 g endapan, padahal menurut hitungan stoikiometri hasil maksimumnya 10,0 g (rendemen 108%). Apa penjelasan yang paling masuk akal?

- Laras beruntung; reaksinya berjalan "lebih dari sempurna".
- Sebagian atom produk tercipta dari panas reaksi.
- Endapannya belum kering atau masih tercampur zat lain.
- Hasil teoretis hanya perkiraan kasar, jadi wajar sering terlampaui.

Jawabannya: endapan belum kering atau tidak murni. Hasil teoretis adalah batas atas yang dihitung dari pereaksi pembatas; atom tidak bisa muncul dari ketiadaan. Massa berlebih hampir selalu berasal dari air yang belum menguap atau pengotor yang ikut terendapkan. Solusinya: keringkan sampai massanya tetap, lalu timbang ulang.

Hitungan stoikiometri memberi **hasil teoretis**: jumlah produk maksimum bila semua pereaksi pembatas berubah sempurna menjadi produk. Di dunia nyata, hasilnya hampir selalu lebih kecil. Penyebabnya antara lain:

- reaksi tidak berjalan tuntas atau mencapai kesetimbangan (Bab 22);
- terjadi reaksi samping yang membuat produk lain;
- sebagian produk hilang saat disaring, dipindahkan, atau dimurnikan;
- pereaksi tidak murni, sehingga zat yang benar-benar bereaksi lebih sedikit dari yang ditimbang.

DEFINISI · RENDEMEN DAN KEMURNIAN

Hasil teoretis adalah massa produk maksimum menurut stoikiometri; **hasil nyata** adalah massa produk yang benar-benar diperoleh. **Rendemen** (persen hasil) membandingkan keduanya:

$$\%\ \text{rendemen} = \frac{\text{hasil nyata}}{\text{hasil teoretis}} \times 100\% \qquad \%\ \text{kemurnian} = \frac{\text{massa zat murni}}{\text{massa sampel}} \times 100\%$$

Kemurnian menyatakan bagian zat yang diinginkan di dalam bahan yang kita timbang.

RUMUS HIDUP **Rendemen (persen hasil)**

$$\%\ \text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{m_{\text{teoretis}}} \times 100\%$$

Dari setiap 100 bagian produk yang seharusnya terbentuk, berapa bagian yang benar-benar kamu dapatkan?

m_{nyata} Hasil nyata g

m_{teoretis} Hasil teoretis g

% rendemen Rendemen %

RENDEMEN

84

%

Dari setiap 100 g produk yang seharusnya terbentuk, kamu memperoleh **84** g.

Cek satuan: g ÷ g × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-STOI-RENDEMEN

⚠ **AWAS JEBAKAN**

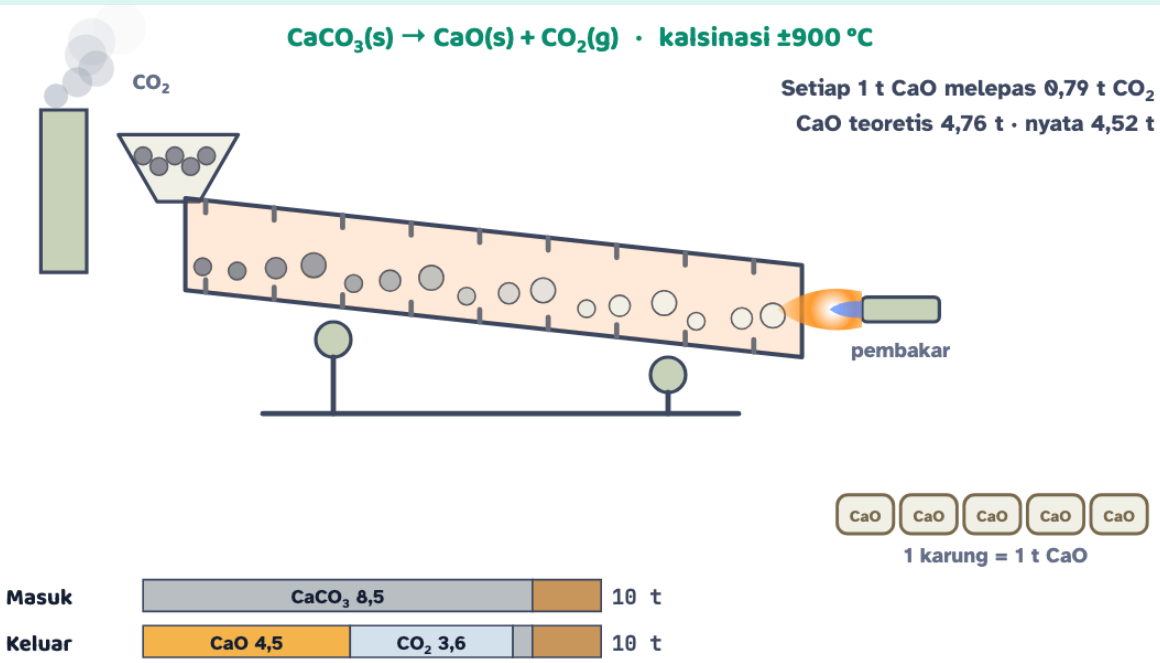
Rendemen tidak mungkin melebihi 100% bila produknya murni dan kering. Angka di atas 100% adalah tanda bahaya: produk masih mengandung air, pelarut, atau pengotor, atau ada kesalahan menimbang. Jangan pula menghitung hasil teoretis dari pereaksi berlebih; hasilnya akan terlalu besar.

Bahan alam hampir tidak pernah murni. Batu kapur dari tambang mengandung tanah liat dan pasir, bijih nikel bercampur besi dan batuan. Karena itu, sebelum memakai stoikiometri, kalikan dulu massa bahan dengan kemurniannya. Coba atur tanur di bawah ini dan perhatikan neraca massanya.

LAB MINI

Tanur Semen: kemurnian dan rendemen

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18



$CaCO_3$ murni	CaO teoretis	CaO nyata	CO_2 ke udara	Total keluar
8,5 t	4,76 t	4,52 t	3,55 t	10 t

Atur massa batu kapur, kemurnian, dan rendemen. Bandingkan dua batang di bawah: massa yang **masuk** selalu sama dengan massa yang **keluar** (kapur tohor + CO_2 + batu kapur yang belum terurai + pengotor). Berapa ton CO_2 yang dilepas untuk setiap ton kapur tohor?

ID

KIMIA NUSANTARA · SEMEN DAN NIKEL

Pabrik semen di Tuban, Padang, Pangkep, dan Bogor memanaskan batu kapur bersama tanah liat hingga sekitar 1.450 °C menjadi klinker. Batu kapurnya tidak 100% $CaCO_3$, jadi kadarnya diperiksa setiap hari di laboratorium pabrik. Di Sulawesi dan Maluku Utara, bijih nikel laterit hanya berkadar sekitar 1,5–2% nikel. Untuk memperoleh satu ton nikel, smelter harus mengolah puluhan ton bijih. Hitungan kemurnian menentukan untung atau rugi!

COBA SENDIRI **Batu kapur tak murni di pabrik semen**

Sebanyak 10,0 ton batu kapur berkadar 85% $\mathrm{CaCO_3}$ dipanaskan dan menghasilkan 4,50 ton CaO. Hitung hasil teoretis CaO dan rendemennya. (Mr $\mathrm{CaCO_3}$ = 100, CaO = 56)

1. Massa $\mathrm{CaCO_3}$ murni $= 85\% \times 10{,}0 = 8{,}50$ ton.
2. Mol $\mathrm{CaCO_3} = 8{,}50 \times 10^6$ g $\div\ 100 = 8{,}50 \times 10^4$ mol = mol CaO (1 : 1).
3. Hasil teoretis CaO $= 8{,}50 \times 10^4 \times 56 = 4{,}76 \times 10^6$ g $= 4{,}76$ ton.
4. Rendemen $= \dfrac{4{,}50}{4{,}76} \times 100\% = 94{,}5\%$.

Hasil teoretis 4,76 ton CaO, rendemen 94,5%. Perhatikan: kalau kemurnian dilupakan, hasil teoretis menjadi 5,60 ton dan rendemen tampak hanya 80%. Pengotor bukan kesalahan reaksi!



TAMU DARI MASA LALU · ROTI DARI UDARA

Pada 1909, **Fritz Haber** berhasil membuat amonia dari nitrogen udara dan hidrogen di laboratoriumnya. **Carl Bosch** lalu membesarkan prosesnya menjadi pabrik raksasa yang mulai beroperasi pada 1913. Keduanya meraih Hadiah Nobel Kimia (Haber 1918, Bosch 1931). Pupuk dari proses Haber–Bosch kini ikut memberi makan miliaran orang; diperkirakan sekitar separuh atom nitrogen di tubuh manusia pernah melewati pabrik amonia.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

RENDEMEN SEKALI LEWAT VS RENDEMEN KESELURUHAN

Reaksi $\mathrm{N_2 + 3\,H_2 \rightleftharpoons 2\,NH_3}$ adalah reaksi kesetimbangan. Pada kondisi pabrik (sekitar 400–450 °C dan 150–250 atm dengan katalis besi), hanya sekitar 15% campuran gas berubah menjadi amonia dalam *satu kali lewat* reaktor. Pabrik lalu mendinginkan gas sehingga $\mathrm{NH_3}$ mencair dan terpisah, sedangkan $\mathrm{N_2}$ dan $\mathrm{H_2}$ yang belum bereaksi dikembalikan ke reaktor berulang-ulang.

Dengan daur ulang ini, rendemen keseluruhan bisa lebih dari 95%. Pelajarannya: rendemen per tahap yang rendah tidak selalu berarti boros, asalkan pereaksi yang belum bereaksi bisa dipakai lagi. Untuk reaksi berurutan tanpa daur ulang, rendemen keseluruhan adalah **hasil kali** rendemen tiap tahap (subbab 18.6).

MITOS

"Pereaksi yang massanya paling kecil pasti habis duluan."

FAKTA

Yang menentukan adalah mol dibagi koefisien. 3 g H_2 (1,5 mol) justru bersisa ketika direaksikan dengan 16 g O_2 (0,5 mol).

MITOS

"Kalau satu pereaksi ditambah terus, produknya ikut bertambah terus."

FAKTA

Hanya sampai pereaksi lain habis. Setelah titik setara, tambahan pereaksi hanya menjadi sisa. Lihat grafik besi–belerang yang mendatar.

MITOS

"Rendemen bisa lebih dari 100% kalau sedang beruntung."

FAKTA

Atom tidak bisa diciptakan. Rendemen di atas 100% berarti produk masih basah, tercampur pengotor, atau ada kesalahan menimbang.

MITOS

"Rendemen 100% berarti prosesnya ramah lingkungan."

FAKTA

Belum tentu. Kalsinasi batu kapur dengan rendemen 100% tetap membuang 44% massa pereaksinya sebagai CO_2. Ukuran lainnya adalah ekonomi atom (18.6).

ADU CEPAT **Rendemen kilat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Rendemen = hasil nyata ÷ hasil teoretis × 100%.

18.5 Stoikiometri gas dan larutan

Gas dan larutan jarang ditimbang; gas diukur volumenya, larutan diukur volume dan konsentrasinya. Jembatan mol tetap sama, hanya pintu masuknya yang berbeda.

$$n = \frac{m}{M_r} \qquad n_{\text{gas}} = \frac{V}{22{,}4\ \text{L/mol}}\ (\text{STP})\ \text{atau}\ \frac{V}{24\ \text{L/mo}}$$

Untuk reaksi yang semua zatnya gas pada suhu dan tekanan yang sama, ada jalan pintas dari Hukum Gay-Lussac (Bab 16): **perbandingan volume = perbandingan koefisien**. Kita tidak perlu mengubah ke mol sama sekali!

KERJAKAN BERSAMA **Kompor LPG butuh berapa banyak udara?**

Sebuah kompor membakar sempurna 1,2 L gas propana (anggap LPG = propana). Berapa liter oksigen yang dibutuhkan dan berapa liter udara yang harus mengalir ke api? Udara mengandung ±21% oksigen (volume), semua volume diukur pada suhu dan tekanan yang sama.

1. Persamaan setara: $\mathrm{C_3H_8} + 5\,\mathrm{O_2} \longrightarrow 3\,\mathrm{CO_2} + 4\,\mathrm{H_2O}$.
2. Perbandingan volume = koefisien: $V_{\mathrm{O_2}} = 1{,}2 \times 5 = 6{,}0$ L.
3. Udara: $V_{\text{udara}} = 6{,}0 \div 0{,}21 \approx 28{,}6$ L.
4. Bonus: $V_{\mathrm{CO_2}} = 1{,}2 \times 3 = 3{,}6$ L gas karbon dioksida dilepas ke dapur.

Butuh 6,0 L oksigen, kira-kira 29 L udara, untuk setiap 1,2 L propana. Jika udara kurang, pembakaran menjadi tidak sempurna: api menguning dan terbentuk gas CO yang beracun. Dapur perlu ventilasi!

Untuk larutan, kita memakai **molaritas** (M), yaitu jumlah mol zat terlarut dalam setiap liter larutan. Larutan HCl 0,1 M berisi 0,1 mol HCl per liter. Jadi mol zat dalam sejumlah larutan adalah $n = M \times V$ (dengan V dalam liter).

MOLARITAS SEKILAS

Cuka dapur berkadar 5% berisi sekitar 5 g asam asetat ($\mathrm{CH_3COOH}$, Mr 60) dalam 100 mL, yaitu 50 g/L. Molaritasnya $50 \div 60 \approx 0{,}83$ mol/L. Konsentrasi larutan akan kamu dalami di Bab 23.

CONTOH **Tablet antasida melawan asam lambung**

Satu tablet antasida mengandung 0,232 g magnesium hidroksida, $\mathrm{Mg(OH)_2}$ (Mr 58). Berapa mL asam lambung (anggap HCl 0,1 M) yang dapat dinetralkan? $\mathrm{Mg(OH)_2 + 2\,HCl \longrightarrow MgCl_2 + 2\,H_2O}$

1. Massa → mol: $n_{\mathrm{Mg(OH)_2}} = 0{,}232 \div 58 = 0{,}004$ mol.
2. Mol → mol: $n_{\mathrm{HCl}} = 0{,}004 \times 2 = 0{,}008$ mol.
3. Mol → volume larutan: $V = n \div M = 0{,}008 \div 0{,}1 = 0{,}08$ L.

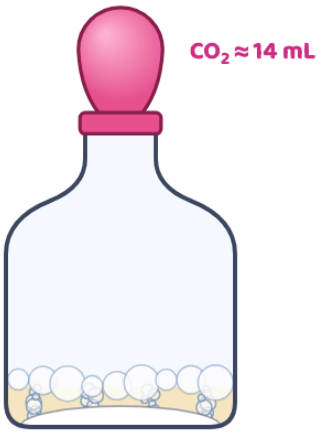
Satu tablet menetralkan 80 mL asam lambung 0,1 M. Itu sebabnya dosis antasida diatur: terlalu sedikit tidak meredakan perih, terlalu banyak bisa membuat lambung terlalu basa.

Sekarang gabungkan semuanya: padatan (soda kue), larutan (cuka), dan gas (karbon dioksida) dalam satu reaktor sederhana yang bisa kamu buat di dapur.

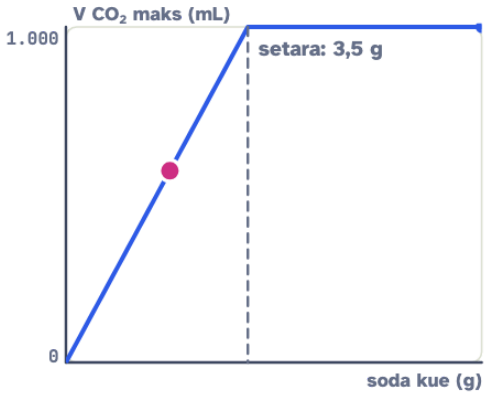
LAB MINI Reaktor Balon: soda kue + cuka

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

$$CH_3COOH + NaHCO_3 \rightarrow CH_3COONa + H_2O + CO_2$$



50 mL cuka 5%



Cuka: 0,0417 mol asam asetat cukup untuk 3,5 g soda kue

Pembatas: soda kue

Soda kue ditambah? Balon membesar.

mol $NaHCO_3$	mol CH_3COOH	Pembatas	CO_2 (suhu kamar)
0,0238 mol	0,0417 mol	soda kue	571 mL

Sisa: 1,07 g asam asetat

Atur massa soda kue di dalam balon, volume cuka, dan kadarnya, lalu tekan ▶ untuk menuang soda kue ke dalam botol. Pada massa soda kue berapa balon berhenti membesar? Lihat grafik di kanan: titik patahnya adalah tempat soda kue dan asam asetat tepat habis bersamaan.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Perbandingan volume sama dengan perbandingan koefisien hanya untuk zat berwujud gas pada suhu dan tekanan yang sama. Air cair, padatan, dan zat terlarut tidak ikut aturan ini. Volume larutan juga bukan "volume molar": 1 mol zat terlarut tidak menempati 22,4 L larutan!

ADU CEPAT Volume gas kilat: $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Untuk gas, volume ÷ koefisien seperti mol ÷ koefisien. N_2 ÷ 1, H_2 ÷ 3; yang terkecil dikali 2.

18.6 Lanjut: reaksi berurutan, analisis campuran, dan ekonomi atom

Banyak produk dibuat lewat beberapa reaksi berturut-turut. Kapur sirih yang dioleskan pada daun sirih, misalnya, adalah kalsium hidroksida yang dibuat dari batu kapur dalam dua tahap:

$$\mathrm{CaCO_3} \xrightarrow{\Delta} \mathrm{CaO} + \mathrm{CO_2} \qquad \mathrm{CaO} + \mathrm{H_2O} \longrightarrow \mathrm{Ca(OH}$$

Kuncinya: **mol produk tahap pertama menjadi mol pereaksi tahap kedua**. Karena perbandingannya 1 : 1 dan 1 : 1, setiap mol $\mathrm{CaCO_3}$ akhirnya menjadi satu mol $\mathrm{Ca(OH)_2}$: 100 g batu kapur murni menghasilkan paling banyak 74 g kapur sirih. Bila rendemen tahap pertama 90% dan tahap kedua 95%, rendemen keseluruhannya $0{,}90 \times 0{,}95 = 85{,}5\%$.

COBA SENDIRI **Nitrogen udara untuk satu ton urea**

Urea dibuat lewat dua tahap: $\mathrm{N_2} + 3\,\mathrm{H_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{NH_3}$, lalu $2\,\mathrm{NH_3} + \mathrm{CO_2} \longrightarrow \mathrm{CO(NH_2)_2} + \mathrm{H_2O}$. Berapa ton $\mathrm{N_2}$ dibutuhkan untuk membuat 1,00 ton urea, jika rendemen tahap amonia 95% dan tahap urea 98%? (Mr urea = 60, $\mathrm{N_2}$ = 28)

1. Mol urea: $1{,}00 \times 10^6\ \mathrm{g} \div 60 = 1{,}667 \times 10^4$ mol.
2. Rantai koefisien: 1 urea ← 2 $\mathrm{NH_3}$ ← 1 $\mathrm{N_2}$. Jadi tanpa kehilangan, $n_{\mathrm{N_2}} = n_{\mathrm{urea}} = 1{,}667 \times 10^4$ mol → $0{,}467$ ton.
3. Rendemen keseluruhan $= 0{,}95 \times 0{,}98 = 0{,}931$.
4. $\mathrm{N_2}$ yang dibutuhkan $= 0{,}467 \div 0{,}931 = 0{,}501$ ton.

Sekitar 0,50 ton $\mathrm{N_2}$. Cek: urea berkadar N 46,7% (Bab 17), jadi 1 ton urea memang berisi 0,467 ton nitrogen; sisanya menutup kehilangan di kedua tahap.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ANALISIS CAMPURAN: MEMBONGKAR BATU DOLOMIT

Batu dolomit dari Gresik dan Madura dipakai sebagai kapur pertanian. Isinya campuran $\mathrm{CaCO_3}$ (Mr 100) dan $\mathrm{MgCO_3}$ (Mr 84). Bagaimana mengetahui komposisinya? Panaskan sampai massanya tetap; kedua karbonat melepas $\mathrm{CO_2}$:

$$\mathrm{CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2} \qquad \mathrm{MgCO_3 \longrightarrow MgO}$$

Misalkan 9,20 g sampel kehilangan 4,40 g (= 0,100 mol $\mathrm{CO_2}$). Jika massa $\mathrm{CaCO_3}$ = x g, maka

$$\frac{x}{100} + \frac{9{,}20 - x}{84} = 0{,}100 \;\Rightarrow\; x = 5{,}00\ \mathrm{g}$$

Jadi sampel berisi 5,00 g $\mathrm{CaCO_3}$ (0,0500 mol) dan 4,20 g $\mathrm{MgCO_3}$ (0,0500 mol): perbandingan mol 1 : 1, persis seperti mineral dolomit, $\mathrm{CaMg(CO_3)_2}$. Strateginya selalu sama: satu persamaan untuk massa total, satu persamaan untuk mol hasil yang diukur, lalu selesaikan.

Rendemen menjawab "berapa banyak produk yang kudapat?", tetapi tidak menjawab "berapa banyak atom yang terbuang?". Untuk itu, kimia hijau memakai **ekonomi atom**: persentase massa semua pereaksi yang berakhir di produk yang diinginkan.

$$\%\ \text{ekonomi atom} = \frac{\text{massa molar total produk yang d}}{\text{massa molar total semua per}}$$

Reaksi (produk yang diinginkan ditebalkan)	Perhitungan	Ekonomi atom
Haber: $\mathrm{N_2 + 3\,H_2 \longrightarrow 2NH_3}$	34 ÷ (28 + 6)	**100%**
Urea: $\mathrm{2\,NH_3 + CO_2 \longrightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O}$	60 ÷ (34 + 44)	76,9%
Bioetanol dari tetes tebu: $\mathrm{C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2\,CO_2}$	92 ÷ 180	51,1%
Kapur tohor: $\mathrm{CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2}$	56 ÷ 100	56%

RUMUS HIDUP

Ekonomi atom

$$\%\,\mathrm{EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{pereaksi}}} \times 100\%$$

Dari semua atom yang kita masukkan, berapa persen yang benar-benar menjadi produk yang kita inginkan?

M_{produk} Massa molar produk yang diinginkan (× koefisien) g/mol

M_{pereaksi} Jumlah massa molar semua pereaksi (× koefisien) g/mol

$\%\,\mathrm{EA}$ Ekonomi atom %

EKONOMI ATOM

76,9

%

pabrik urea: 76,9%

Dari setiap 100 kg pereaksi, **76,9** kg berakhir di produk yang diinginkan.

Cek satuan: (g/mol) ÷ (g/mol) × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-STOI-EKONOMI-ATOM

TRIK KAK TIRTA · RENDEMEN VS EKONOMI ATOM

Rendemen menilai **kerja di laboratorium**: seberapa dekat hasilmu dengan batas teoretis. Ekonomi atom menilai **rancangan reaksinya** di atas kertas: seberapa banyak atom yang terbuang sebagai produk samping, sebelum reaksi dijalankan. Proses yang hebat punya keduanya tinggi.

Kimia di sekitarmu



Pabrik pupuk

Insinyur pabrik urea menakar amonia dan CO_2 dalam satuan kilomol per jam. Salah takar berarti ribuan ton bahan mahal terbuang setiap tahun.



Semen dan CO_2

Setiap ton kapur tohor yang dibuat dari batu kapur melepas ±0,79 ton CO_2 dari reaksinya saja (44 ÷ 56). Karena itu industri semen berlomba mengurangi kadar klinker.



Nikel Sulawesi

Bijih laterit berkadar ±1,8% nikel berarti satu ton bijih berisi paling banyak sekitar 18 kg nikel. Bahan baku baterai kendaraan listrik dimulai dari hitungan kemurnian.



Motor injeksi

Sensor oksigen di knalpot menjaga perbandingan udara : bensin dekat ±14,7 : 1 (massa), yaitu campuran stoikiometris agar bensin terbakar habis dan emisinya rendah.



Kantong udara mobil

Pada kantong udara jenis lama, sekitar 100 g natrium azida terurai, $2\,NaN_3 \longrightarrow 2\,Na + 3\,N_2$, menghasilkan ±55 L gas nitrogen dalam waktu sekitar 0,03 detik.



Tempe

Pengrajin tempe menakar ragi sesuai banyaknya kedelai. Ragi terlalu sedikit membuat fermentasi lambat; ragi berlebih hanya membuang uang. Itulah "pereaksi pembatas" versi dapur.

Cek Cepat

Pada reaksi $N_2 + 3\,H_2 \longrightarrow 2\,NH_3$, berapa mol H_2 yang diperlukan untuk membuat 4 mol NH_3?

- 2 mol
- 4 mol
- 6 mol
- 12 mol

Sebanyak 10 g zat A direaksikan dengan 10 g zat B. Manakah pereaksi pembatasnya?

A

B

Keduanya habis bersamaan karena massanya sama

Belum bisa ditentukan sebelum massa diubah ke mol dan dibagi koefisien

Hasil teoretis suatu percobaan 20 g, tetapi produk kering yang diperoleh 15 g. Berapa rendemennya?

75%

133%

25%

15%

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: balon soda kue, kapan berhenti membesar?

Bahan: 4 botol plastik bekas sejenis (±600 mL), 4 balon karet yang sama, soda kue, cuka dapur (±5%), sendok teh, corong kertas, gelas takar, meteran jahit, kacamata (kacamata renang atau kacamata biasa).

1. Isi setiap botol dengan 50 mL cuka. Jika label cuka menulis 25%, encerkan dulu: 1 bagian cuka + 4 bagian air.
2. Dengan corong kertas, isi balon dengan ¼, ½, 1, dan 2 sendok teh soda kue (satu takaran per balon).
3. Pasang mulut balon ke mulut botol tanpa menumpahkan soda kuenya, lalu tegakkan balon agar soda kue jatuh ke cuka.
4. Setelah gelembung berhenti, ukur keliling balon di bagian terlebar dan perhatikan apakah ada serbuk putih yang tersisa di dasar botol.

Keselamatan: Lakukan bersama orang dewasa dan pakai kacamata, karena cipratan cuka terasa perih di mata. Gunakan botol plastik, bukan botol kaca, dan jangan menutup botol dengan tutup ulir. Jangan menghirup atau meniup gas dari balon, dan jangan mencicipi campurannya. Buang cairan sisa ke wastafel sambil dialiri banyak air, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Mengapa balon berisi 1 sendok teh dan 2 sendok teh soda kue hampir sama besar? Di botol mana cuka menjadi pereaksi pembatas, dan apa buktinya? (Petunjuk: 50 mL cuka 5% hanya cukup untuk ±3,5 g soda kue, kira-kira ¾ sendok teh.)

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 18 dalam 3 menit

☑ Kamu sekarang bisa...

- membaca **koefisien** persamaan setara sebagai perbandingan mol, lalu menghitung massa produk dari massa pereaksi
- menentukan **pereaksi pembatas** dan **sisa pereaksi** dengan tabel mula-mula, reaksi, sisa
- menghitung **hasil teoretis**, **rendemen**, dan **kemurnian** pada proses nyata seperti pabrik semen dan pupuk
- menerapkan stoikiometri pada **gas** (volume molar) dan **larutan** (molaritas sebagai pengantar)
- menyelesaikan reaksi berurutan dan analisis campuran, serta menilai **ekonomi atom** suatu proses

🔑 Istilah kunci

Stoikiometri · Pereaksi pembatas · pereaksi berlebih · sisa pereaksi · Hasil teoretis · hasil nyata · Rendemen · Kemurnian · molaritas · ekonomi atom

🧮 Rumus penting

$$m_B = \frac{m_A}{M_A} \times \frac{b}{a} \times M_B$$

Massa produk dari massa pereaksi. Ubah massa A ke mol, kalikan dengan perbandingan koefisien (resepnya), lalu ubah mol B kembali ke massa.

$$n_{\text{produk}} = c \times \min\left(\frac{n_A}{a},\ \frac{n_B}{b}\right)$$

Pereaksi pembatas: bagi dengan koefisien. Hitung berapa kali 'resep' bisa dijalankan oleh setiap pereaksi. Yang paling sedikit menentukan jumlah produk.

$$\%\ \text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{m_{\text{teoretis}}} \times 100\%$$

Rendemen (persen hasil). Dari setiap 100 bagian produk yang seharusnya terbentuk, berapa bagian yang benar-benar kamu dapatkan?

$$\%\ \text{EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{pereaksi}}} \times 100\%$$

Ekonomi atom. Dari semua atom yang kita masukkan, berapa persen yang benar-benar menjadi produk yang kita inginkan?

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Koefisien adalah perbandingan mol, bukan perbandingan massa.
- Pereaksi dengan massa terkecil, atau dengan jumlah mol terkecil, belum tentu pembatas.
- Rendemen tidak mungkin melebihi 100% bila produknya murni dan kering.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=18

🧩 Teka-teki untuk Bab 19

Kantong kompres dingin instan cukup dipencet, lalu dalam beberapa detik terasa sedingin es, tanpa kulkas dan tanpa listrik. Dari mana "dingin" itu datang? Dan mengapa kantong berisi dua kali lebih banyak bahan bisa menyerap kalor dua kali lebih banyak?

▼ **Intip petunjuk**

Di dalamnya ada air dan padatan seperti amonium nitrat, bahkan urea! Saat padatan itu larut, prosesnya **menyerap kalor** dari sekitarnya, termasuk dari kulitmu (endoterm). Banyaknya kalor sebanding dengan jumlah mol zat yang larut. Stoikiometri bertemu energi di Bab 19, Termokimia.

BAB 19 · ENERGI, LAJU & KESETIMBANGAN

19 Termokimia: Kalor yang Bersembunyi di Dalam Ikatan



Kantong kecil di saku pendaki Semeru bisa hangat sendiri, sedangkan kompres dingin bisa sedingin es tanpa kulkas. Keduanya tidak menciptakan panas atau dingin: mereka hanya memindahkan energi yang tersimpan di dalam ikatan kimia. Di bab ini kamu akan belajar mengukur energi itu sampai satuan joule.

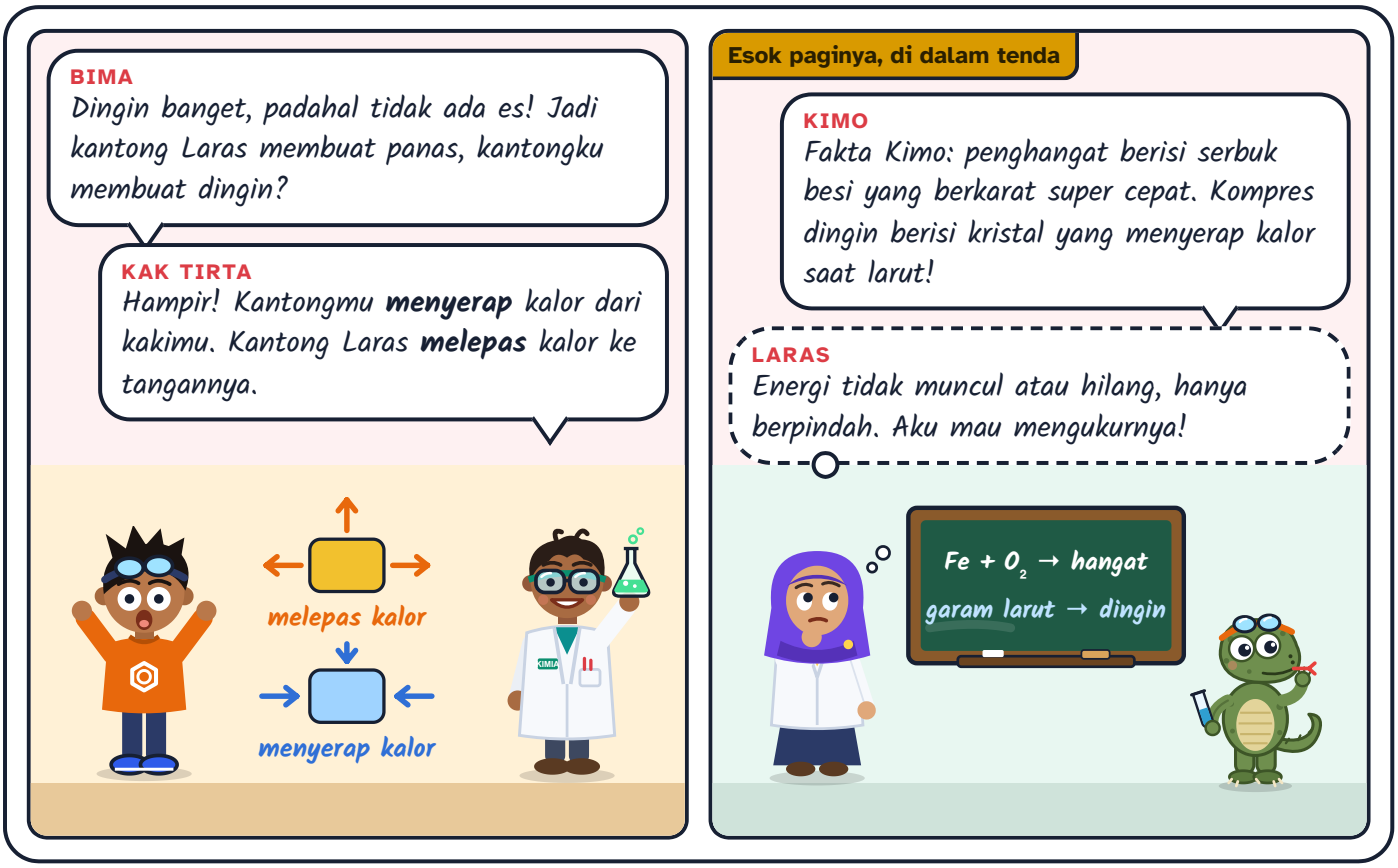
Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **sistem** dan **lingkungan**, serta reaksi **eksoterm** dan **endoterm**, dengan diagram tingkat energi dan profil energi;
- menulis **persamaan termokimia** dan memakai jenis-jenis ΔH standar;
- menghitung kalor dengan $q = mc\Delta T$ dan ΔH reaksi dari data **kalorimeter**;
- menghitung ΔH dengan **hukum Hess**, **entalpi pembentukan standar**, dan **energi ikatan** rata-rata;
- membandingkan **nilai kalor** bahan bakar (LPG, bensin, biodiesel sawit, kayu) dan menjelaskan mengapa melarutkan garam bisa terasa panas atau dingin.

PANAS DI KIRI, DINGIN DI KANAN

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kompres dingin instan ditempelkan ke kakimu yang terkilir dan terasa sangat dingin. Apa yang sebenarnya terjadi?

- Kompres mengalirkan "dingin" ke dalam kulitmu.
- Kompres menyerap kalor dari kulitmu, sehingga kulitmu kehilangan energi.
- Kompres tidak bertukar energi; saraf kulitmu saja yang tertipu.
- Air di dalam kompres membeku menjadi es.

Jawabannya: kompres menyerap kalor dari kulitmu. "Dingin" bukan zat dan tidak bisa mengalir. Yang mengalir selalu *kalor*, dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah. Kristal di dalam kompres larut sambil menyerap kalor, sehingga isi kantong menjadi lebih dingin daripada kulit. Lalu kalor dari kulitmu mengalir masuk ke kantong, dan kulitmu terasa dingin.

19.1 Sistem, lingkungan, dan arah aliran kalor

Untuk membicarakan energi, kimiawan selalu membagi dunia menjadi dua. Bagian yang sedang kita amati disebut **sistem**, biasanya zat-zat yang bereaksi. Segala sesuatu di luarnya disebut **lingkungan**: air pelarut, gelas,

udara, bahkan tanganmu.

Bahasa sederhana · Bayangkan kantong penghangat sebagai "dompet energi". Saat serbuk besi di dalamnya berkarat, dompet itu membayar energi ke tanganmu, sehingga tanganmu hangat. Kompres dingin kebalikannya: ia "menagih" energi dari kulitmu, sehingga kulitmu terasa dingin. Energinya tidak pernah hilang. Ia hanya berpindah dompet.

Jenis sistem	Materi keluar-masuk?	Energi keluar-masuk?	Contoh
Terbuka	ya	ya	panci sayur asem tanpa tutup: uap air dan kalor keluar
Tertutup	tidak	ya	kaleng minuman bersoda yang didinginkan di kulkas
Terisolasi	tidak	tidak (ideal)	termos berisi teh panas (hampir terisolasi)

DEFINISI · EKSOTERM DAN ENDOTERM

Reaksi eksoterm melepaskan kalor dari sistem ke lingkungan, sehingga lingkungan menjadi lebih hangat; perubahan entalpinya negatif ($\Delta H < 0$). **Reaksi endoterm** menyerap kalor dari lingkungan ke sistem, sehingga lingkungan menjadi lebih dingin; perubahan entalpinya positif ($\Delta H > 0$).

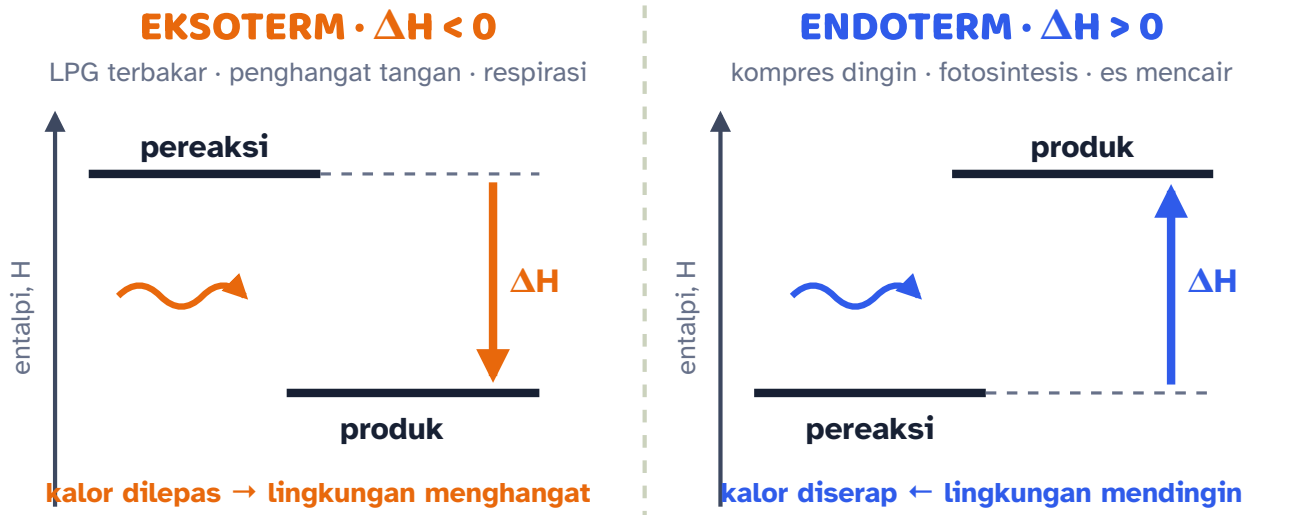


Diagram tingkat energi. Panah ΔH selalu berangkat dari pereaksi dan berakhir di produk: ke bawah berarti eksoterm (ΔH negatif), ke atas berarti endoterm (ΔH positif).

Mengapa reaksi bisa melepas atau menyerap kalor? Di tingkat partikel, energi kimia tersimpan sebagai **energi potensial**: tarik-menarik antara inti atom dan elektron di dalam ikatan. Bila ikatan-ikatan di produk lebih kuat daripada ikatan lama, selisih energinya dilepas dan membuat partikel di sekitarnya bergerak lebih cepat. Gerak partikel yang makin cepat itulah yang kita rasakan sebagai suhu yang naik. Pada reaksi endoterm terjadi

kebalikannya: energi gerak partikel di sekitarnya "dipinjam" untuk membangun produk yang berenergi lebih tinggi, sehingga partikel lingkungan melambat dan suhu turun.

> ⚠️ **AWAS JEBAKAN**
>
> Endoterm tidak berarti "tidak butuh kalor"; justru reaksi endoterm terus-menerus menyerap kalor. Penguraian batu kapur di tungku kapur langsung berhenti begitu apinya padam. Satu lagi: dalam kalorimeter, zat yang bereaksi adalah sistem, sedangkan air pelarutnya termasuk lingkungan. Jadi larutan yang menjadi dingin menandakan reaksi **endoterm**, bukan eksoterm.

MITOS

"Kalor dan suhu itu sama saja."

FAKTA

Suhu mengukur rata-rata gerak partikel; kalor adalah energi yang berpindah. Seember air hangat untuk mandi menyimpan jauh lebih banyak kalor daripada setetes air mendidih, walaupun suhunya lebih rendah.

MITOS

"Es batu mengalirkan dingin ke dalam teh."

FAKTA

Yang mengalir adalah kalor, dari teh yang lebih hangat ke es. Es memakai kalor itu untuk mencair, sehingga teh kehilangan energi dan menjadi dingin.

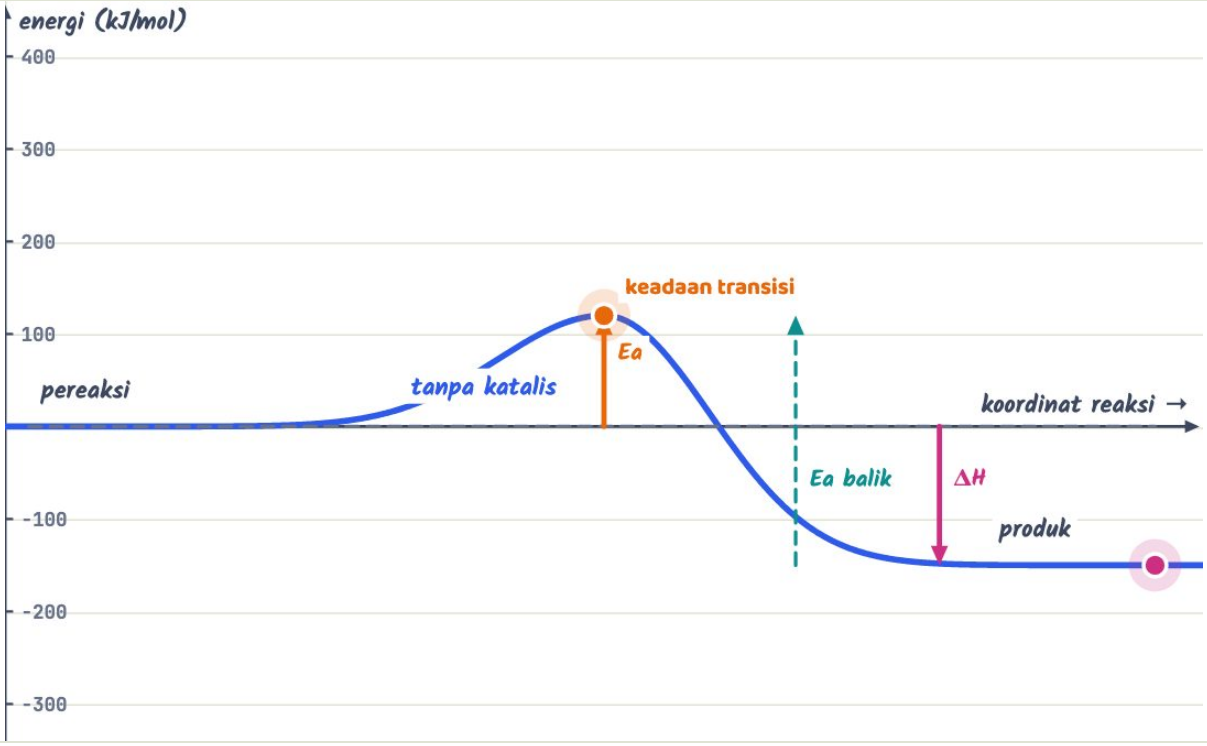
Diagram tingkat energi hanya menunjukkan keadaan awal dan akhir. Kenyataannya, partikel harus "mendaki bukit" dulu: ikatan lama harus meregang sebelum ikatan baru terbentuk. Tinggi bukit itu disebut **energi aktivasi** (E_a). Itulah sebabnya LPG tidak menyala sendiri walaupun pembakarannya sangat eksoterm. Kompor butuh percikan pemantik untuk membawa molekul pertama melewati bukit; sesudah itu, kalor dari reaksi sendiri yang mendorong molekul berikutnya.

GRAFIK HIDUP **Diagram profil energi: geser ΔH dan Ea**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-19

$$E_{a,\text{balik}} = E_a - \Delta H$$

$$\Delta H = -150,\ E_a = 120,\ E_{a,\text{balik}} = 270\ (\text{kJ/mol})$$



eksoterm: produk lebih rendah, kalor dilepas ke lingkungan

ΔH	Ea maju	Ea balik	jenis
-150 kJ/mol	120 kJ/mol	270 kJ/mol	eksoterm

Seret titik oranye (puncak bukit) dan titik magenta (produk). Buat reaksi endoterm: apa yang terjadi pada tanda ΔH? Lalu geser katalis ke 1: bukit mana yang turun, dan apakah ΔH ikut berubah? (Bab 21 akan membahas bukit ini lebih jauh.)

19.2 Entalpi dan persamaan termokimia

Kebanyakan reaksi di dapur dan di laboratorium sekolah terjadi di wadah terbuka, pada tekanan udara yang tetap. Kalor yang dipertukarkan pada tekanan tetap diberi nama khusus, yaitu **perubahan entalpi** (ΔH).

DEFINISI · ENTALPI

Entalpi (H) adalah kandungan energi total suatu zat pada tekanan tetap. Nilai mutlaknya tidak dapat diukur, tetapi perubahannya dapat:

$$\Delta H = H_{\text{produk}} - H_{\text{pereaksi}} = q_p$$

q_p adalah kalor yang diserap sistem pada tekanan tetap. Satuan ΔH adalah kJ (untuk persamaan yang ditulis) atau kJ/mol (per mol zat tertentu).

Mirip tinggi gunung: kita tidak tahu "tinggi mutlak" sebuah titik di alam semesta, tetapi kita sepakat mengukurnya dari permukaan laut. Puncak Semeru 3.676 m di atas permukaan laut. Yang penting adalah *selisih*-nya.

Persamaan reaksi yang dilengkapi ΔH disebut **persamaan termokimia**. Contohnya pembakaran gas alam (metana):

$$\mathrm{CH_4\,(g) + 2\,O_2\,(g) \longrightarrow CO_2\,(g) + 2\,H_2O\,(l)} \qquad \Delta H =$$

Artinya: setiap 1 mol metana yang bereaksi dengan 2 mol oksigen membentuk 1 mol $\mathrm{CO_2}$ dan 2 mol air cair sambil melepaskan 890,3 kJ kalor.

ATURAN · MEMBACA DAN MENGUBAH PERSAMAAN TERMOKIMIA

1. **Wujud zat wajib ditulis** (s, l, g, aq), karena ΔH bergantung pada wujud.
2. **Koefisien dikali, ΔH ikut dikali.**

$$\mathrm{2\,CH_4\,(g) + 4\,O_2\,(g) \longrightarrow 2\,CO_2\,(g) + 4\,H_2O\,(l)} \quad \Delta H = -1.780{,}6\ \mathrm{kJ}$$

3. **Persamaan dibalik, tanda ΔH dibalik.**

$$\mathrm{CO_2\,(g) + 2\,H_2O\,(l) \longrightarrow CH_4\,(g) + 2\,O_2\,(g)} \quad \Delta H = +890{,}3\ \mathrm{kJ}$$

Tebak Dulu!

Hidrogen dibakar menjadi air. Kapan kalor yang dilepas per mol hidrogen lebih besar?

- Bila airnya terbentuk sebagai uap, karena uap lebih panas.
- Bila airnya terbentuk sebagai cairan.
- Sama saja, karena reaksinya sama.
- Tidak bisa diketahui tanpa kalorimeter.

Jawabannya: air cair. $\mathrm{H_2\,(g)} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_2\,(g)} \longrightarrow \mathrm{H_2O\,(l)}$ melepas 285,8 kJ, sedangkan bila produknya uap hanya 241,8 kJ. Selisihnya, 44 kJ, adalah kalor yang dilepas saat uap mengembun. Itu sebabnya uap dari panci bisa melukai kulit lebih parah daripada air mendidih: uap melepas kalor tambahan saat mengembun di kulitmu.

Agar data dari seluruh dunia bisa dibandingkan, kimiawan menyepakati beberapa jenis ΔH **standar**, masing-masing untuk 1 mol zat tertentu:

Jenis	Lambang	Untuk 1 mol …	Contoh	ΔH (kJ/mol)
Pembentukan	ΔH_f°	senyawa dibentuk dari unsur-unsurnya	$\mathrm{C\,(s) + 2\,H_2\,(g) \longrightarrow CH_4\,(g)}$	–74,8
Penguraian	ΔH_d°	senyawa diurai menjadi unsurnya	$\mathrm{CH_4\,(g) \longrightarrow C\,(s) + 2\,H_2\,(g)}$	+74,8
Pembakaran	ΔH_c°	zat dibakar sempurna dengan $\mathrm{O_2}$	$\mathrm{C_3H_8\,(g) + 5\,O_2\,(g) \longrightarrow 3\,CO_2\,(g) + 4\,H_2O\,(l)}$	–2.220

Penetralan	ΔH_n	air terbentuk dari asam + basa	$\mathrm{H^+(aq) + OH^-(aq) \longrightarrow H_2O(l)}$	≈ −57
Pelarutan	ΔH_{sol}	zat dilarutkan dalam air	$\mathrm{NH_4NO_3(s) \longrightarrow NH_4^+(aq) + NO_3^-(aq)}$	+25,7
Penguapan	ΔH_{vap}	cairan menjadi gas (25 °C)	$\mathrm{H_2O(l) \longrightarrow H_2O(g)}$	+44,0
Atomisasi	ΔH_{at}	atom gas terbentuk dari unsurnya	$\mathrm{\frac{1}{2}\,H_2(g) \longrightarrow H(g)}$	+218

APA ARTI TANDA °?

Tanda ° (dibaca "standar") berarti diukur pada keadaan standar: suhu 298 K (25 °C), tekanan 1 bar (banyak buku sekolah memakai 1 atm; selisihnya sangat kecil), dan larutan 1 mol/L. Setiap unsur berada dalam wujud paling stabilnya, misalnya karbon sebagai grafit dan oksigen sebagai gas $\mathrm{O_2}$.

TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1782–1783 di Paris, **Antoine Lavoisier** dan **Pierre-Simon Laplace** membuat kalorimeter es. Seekor marmut dimasukkan ke ruang yang dikelilingi es, lalu air lelehan esnya ditimbang. Mereka mendapati bahwa kalor dari tubuh marmut kira-kira sama dengan kalor dari membakar arang yang menghasilkan jumlah $\mathrm{CO_2}$ yang sama. Kesimpulan mereka: bernapas adalah sejenis pembakaran yang lambat!

19.3 Kalorimetri: mengukur kalor dengan termometer

Kita tidak bisa menempelkan termometer pada sebuah ikatan. Yang bisa kita ukur adalah akibatnya: perubahan suhu lingkungan, biasanya air. Alat untuk itu disebut **kalorimeter**, dan ilmunya disebut **kalorimetri**.

RUMUS · KALOR YANG DISERAP ATAU DILEPAS ZAT

$$q = m \times c \times \Delta T$$

q = kalor (J); m = massa zat yang suhunya berubah (g); c = **kalor jenis** (J/g·°C); $\Delta T = T_{\mathrm{akhir}} - T_{\mathrm{awal}}$ (°C, sama besarnya dengan K). Kalor jenis air 4,18 J/g·°C: menaikkan suhu 1 g air sebesar 1 °C membutuhkan 4,18 J.

Zat	Kalor jenis (J/g·°C)	Artinya di dapur
air	4,18	lama mendidih, lama pula dinginnya
es	±2,1	lebih mudah berubah suhu daripada air cair
etanol	2,44	cepat hangat di tangan
minyak goreng	±2,0	wajan berisi minyak cepat panas
aluminium (panci)	0,90	panci tipis cepat panas
besi (wajan, cobek baja)	0,45	sangat cepat panas
pasir, batu	±0,8	pantai cepat panas di siang hari

RUMUS HIDUP

Kalor yang diserap atau dilepas zat

$$q = m \times c \times \Delta T$$

Kalor sama dengan massa dikali kalor jenis dikali perubahan suhu. Zat yang banyak dan 'sulit panas' membutuhkan kalor besar.

m Massa zat g · c Kalor jenis J/(g·°C) · ΔT Perubahan suhu °C · q Kalor J

KALOR

76.285

J

ini air · q positif: zat menyerap kalor (suhunya naik)

250 g zat dengan c = **4,18** J/(g·°C) berubah suhu **73** °C: q = **76.285** J = **76,285** kJ.

Satuan Nusantara: ≈ 18 × 1 kkal (kalori makanan) · ≈ 3% dari sepiring nasi goreng (±600 kkal) · ≈ 2% dari 1 kWh token listrik

Cek satuan: g × J/(g·°C) × °C = J ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-TERMO-Q-MCDT

KIMIA NUSANTARA · ANGIN DARAT DAN PERAHU NELAYAN

Pada siang hari, daratan (pasir dan batu, c ±0,8) cepat panas, sedangkan laut (air, c = 4,18) lambat panas. Udara panas di atas daratan naik dan digantikan udara sejuk dari laut: **angin laut**. Malam hari terjadi kebalikannya. Daratan cepat dingin, laut masih hangat, dan angin bertiup dari darat ke laut: **angin darat**. Nelayan tradisional di banyak pantai Nusantara memanfaatkan angin darat untuk berangkat melaut pada malam atau dini hari, lalu pulang bersama angin laut.

CONTOH **Air untuk segelas teh**

Laras memanaskan 250 g air dari 27 °C sampai mendidih (100 °C). Berapa kalor yang diserap air? (c = 4,18 J/g·°C)

1. Perubahan suhu: $\Delta T = 100 - 27 = 73$ °C.
2. $q = mc\Delta T = 250 \times 4{,}18 \times 73 = 76.285$ J.

Air menyerap ±76,3 kJ, kira-kira 18 kkal. Itu baru untuk airnya; panci dan udara di sekitarnya juga ikut "mencuri" kalor dari kompor.

Kalorimeter paling sederhana bisa kamu buat sendiri: dua gelas plastik yang ditumpuk (supaya kalor tidak mudah bocor), tutup karton, termometer, dan pengaduk. Zat-zat yang bereaksi adalah **sistem**; larutan (sebagian besar air) adalah **lingkungan**. Bila reaksi melepas kalor, larutan menerimanya, sehingga q_{larutan} positif dan suhu naik. Kalor reaksi sama besar tetapi berlawanan tanda: $q_{\text{reaksi}} = -q_{\text{larutan}}$.

$$\Delta H = \frac{q_{\text{reaksi}}}{n} = -\frac{m\,c\,\Delta T}{n}$$

RUMUS HIDUP

ΔH reaksi dari data kalorimeter

$$\Delta H = -\frac{m \times 4{,}18 \times \Delta T}{n}$$

Kalor yang diterima larutan berasal dari reaksi, jadi tandanya dibalik, lalu dibagi jumlah mol zat yang bereaksi.

- m Massa larutan di kalorimeter `g`
- ΔT Perubahan suhu larutan `°C`
- n Jumlah zat yang bereaksi `mol`
- ΔH Perubahan entalpi `kJ/mol`

PERUBAHAN ENTALPI

-56,8

kJ/mol

eksoterm: suhu naik, ΔH negatif

mirip penetralan asam kuat oleh basa kuat (≈ –57 kJ/mol)

Larutan menerima q = **2.842,4** J, sehingga ΔH = **-56,8** kJ per mol zat.

Cek satuan: g × J/(g·°C) × °C ÷ mol = J/mol, lalu ÷ 1.000 = kJ/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-TERMO-DH-KALORIMETER

TRIK KAK TIRTA

"Termometer **NAIK**, ΔH **NEGATIF**. Termometer **TURUN**, ΔH **POSITIF**." Bayangkan ΔH sebagai saldo dompet sistem: kalau lingkungan jadi hangat, berarti sistem baru saja membayar, jadi saldonya berkurang. Jangan lupa mengubah J menjadi kJ (bagi 1.000).

AWAS JEBAKAN

Massa dalam $q = mc\Delta T$ adalah massa larutan yang suhunya berubah, bukan massa zat yang bereaksi. Pada penetralan 50 mL HCl dengan 50 mL NaOH, $m = 100$ g (massa jenis larutan dianggap 1 g/mL), sedangkan n adalah mol air yang terbentuk, bukan jumlah mol semua zat.

KERJAKAN BERSAMA

Kalor penetralan

Sebanyak 50 mL HCl 1,0 M dicampur dengan 50 mL NaOH 1,0 M dalam kalorimeter gelas plastik. Suhu naik dari 27,0 °C menjadi 33,8 °C. Hitung ΔH penetralan per mol air. (c = 4,18 J/g·°C; massa jenis larutan 1 g/mL)

1. Persamaan: $\mathrm{HCl(aq) + NaOH(aq) \longrightarrow NaCl(aq) + H_2O(l)}$.
2. $q_{\text{larutan}} = 100 \times 4{,}18 \times 6{,}8 = 2.842$ J.
3. Mol air $= 0{,}050 \times 1{,}0 = 0{,}050$ mol.
4. $\Delta H = -\dfrac{2.842\ \text{J}}{0{,}050\ \text{mol}} = -56.840$ J/mol $\approx -56{,}8$ kJ/mol.

$\Delta H \approx$ –56,8 kJ/mol, dekat dengan nilai buku ±–57 kJ/mol. Semua penetralan asam kuat oleh basa kuat memberi nilai yang hampir sama, karena reaksinya sebenarnya sama: $\mathrm{H^+ + OH^- \longrightarrow H_2O}$.

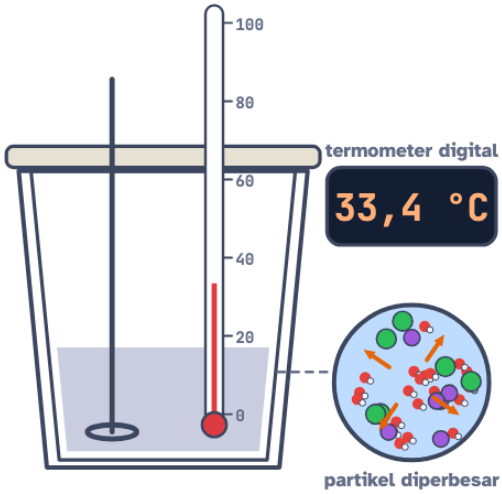
LAB MINI

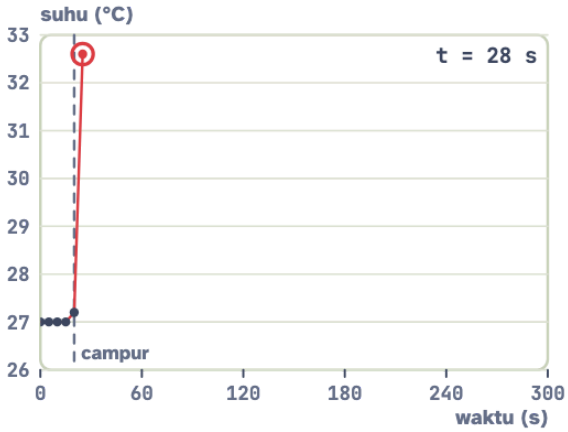
Kalorimeter Gelas Plastik: panas atau dingin?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-19

$HCl(aq) + NaOH(aq) \rightarrow NaCl(aq) + H_2O(l)$

50 mL HCl 1,0 M + 50 mL NaOH 1,0 M · suhu awal 27,0 °C





Suhu NAIK → eksoterm → ΔH negatif

q = m·c·ΔT = 100 g × 4,18 × 5,60 °C = 2.341 J

Menunggu garis pendinginan untuk ekstrapolasi...

Suhu	ΔT (koreksi)	q larutan	ΔH percobaan	ΔH literatur
33,4 °C	5,6 °C	2.341 J	—	-57,1 kJ/mol

Pilih proses, lalu tekan ▶. Suhu dicatat tiap 5 detik dan zat dicampur pada detik ke-20. Bandingkan penetralan, NaOH, dan $CaCl_2$ (penyerap lembap) dengan amonium nitrat (isi kompres dingin). Matikan isolasi: mengapa suhu puncaknya lebih rendah, dan bagaimana garis ekstrapolasi (putus-putus) membantu? Arahkan atau ketuk grafik untuk membaca datanya.

ADU CEPAT

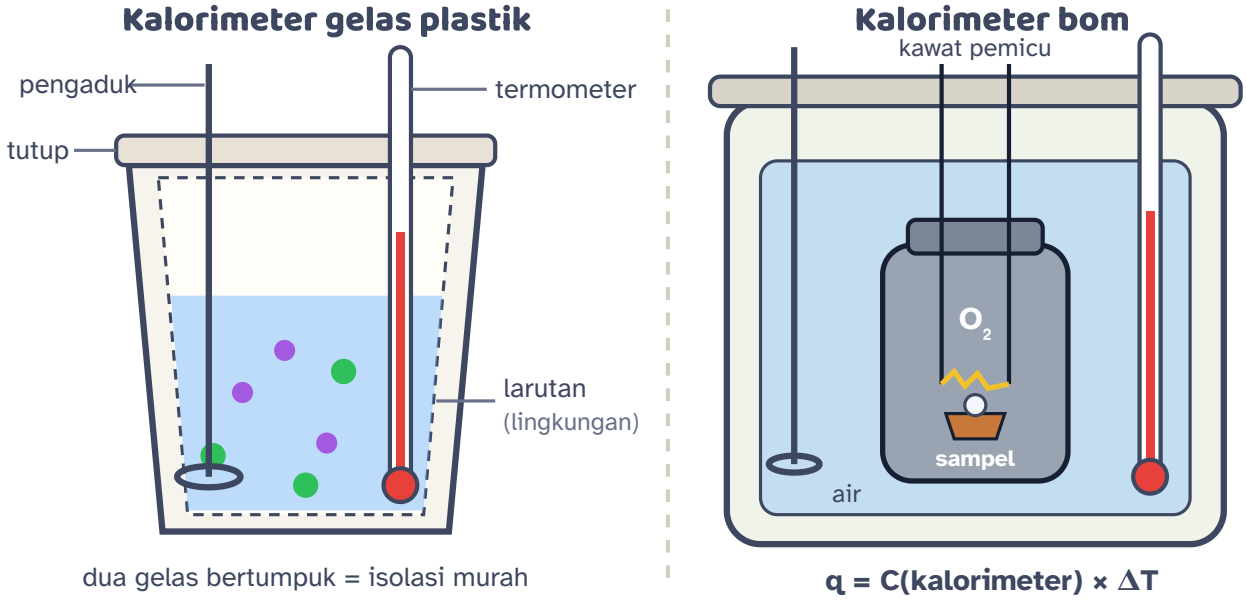
Kilat q = mcΔT

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-19

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

q = m × 4,18 × ΔT dalam joule, lalu bagi 1.000 untuk kJ. Contoh: 100 g, naik 10 °C → 4.180 J = 4,18 kJ.

Untuk reaksi pembakaran (bahan bakar, makanan), kimiawan memakai **kalorimeter bom**: sampel dibakar dalam wadah baja tertutup berisi oksigen bertekanan, dan wadah itu direndam dalam air. Karena kapasitas kalor seluruh alat (C_{kal}, dalam kJ/°C) sudah diketahui dari kalibrasi, kalornya cukup dihitung dari $q = C_{\text{kal}} \times \Delta T$. Angka "kkal" pada label gizi makananmu berasal dari alat seperti ini.



Kiri: kalorimeter gelas plastik untuk reaksi dalam larutan (tekanan tetap, langsung memberi ΔH). Kanan: kalorimeter bom untuk pembakaran; sampel dinyalakan dengan kawat listrik di dalam bom baja berisi oksigen.

ADU CEPAT **Kilat ΔH dari kalorimeter**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-19

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

ΔH = −(m × 4,18 × ΔT) ÷ n ÷ 1.000. Suhu naik → ΔH negatif; suhu turun → ΔH positif.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

EKSTRAPOLASI KURVA SUHU–WAKTU DAN ΔU DI KALORIMETER BOM

Kalorimeter nyata selalu bocor kalor. Karena itu suhu dicatat secara berkala sebelum dan sesudah pencampuran, lalu garis pendinginan diperpanjang (diekstrapolasi) kembali ke saat pencampuran. ΔT hasil ekstrapolasi lebih besar daripada kenaikan maksimum yang terbaca dan lebih mendekati ΔT tanpa kebocoran. Lab Mini di atas melakukannya otomatis (garis putus-putus magenta).

Kalorimeter bom bervolume tetap, sehingga yang terukur adalah perubahan energi dalam, ΔU, bukan ΔH. Keduanya dihubungkan oleh $\Delta H = \Delta U + \Delta n_{\text{gas}} RT$. Untuk pembakaran oktana,

$$\mathrm{C_8H_{18}\,(l)} + \tfrac{25}{2}\,\mathrm{O_2\,(g)} \longrightarrow 8\,\mathrm{CO_2\,(g)} + 9\,\mathrm{H_2O\,(l)}$$

$\Delta n_{\text{gas}} = 8 - 12{,}5 = -4{,}5$, sehingga $\Delta H - \Delta U = -4{,}5 \times 8{,}314 \times 298 \approx -11$ kJ/mol. Sangat kecil dibandingkan $\Delta H_c = -5.470$ kJ/mol, tetapi penting dalam soal olimpiade.

19.4 Hukum Hess: jalan memutar, hasil sama

Ada reaksi yang ΔH-nya mustahil diukur langsung. Contohnya pembentukan karbon monoksida. Membakar arang dengan oksigen terbatas selalu menghasilkan campuran CO dan $\mathrm{CO_2}$, sehingga kalor yang terukur bukan milik

satu reaksi saja. Lalu bagaimana? Jawabannya ditemukan seorang kimiawan di Sankt Peterburg pada tahun 1840.

Bahasa sederhana · Bayangkan kamu naik dari Desa Ngadisari ke puncak Gunung Bromo. Kamu boleh lewat jalan aspal yang landai, lewat tangga yang curam, atau berputar-putar dulu di lautan pasir. Jalannya berbeda-beda, tetapi selisih ketinggian dari desa ke puncak selalu sama. Perubahan entalpi juga begitu: hanya bergantung pada titik awal dan titik akhir.

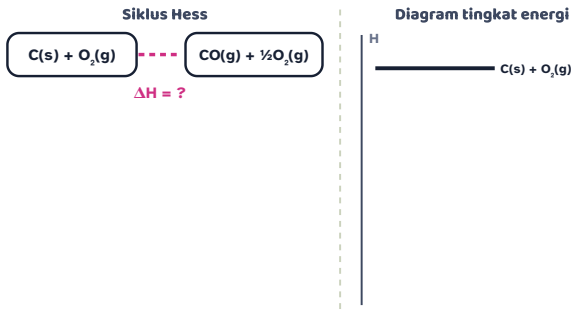
HUKUM HESS

Perubahan entalpi suatu reaksi hanya bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir, tidak bergantung pada jalan atau tahap yang ditempuh. Bila sebuah reaksi dapat ditulis sebagai jumlah beberapa tahap, maka

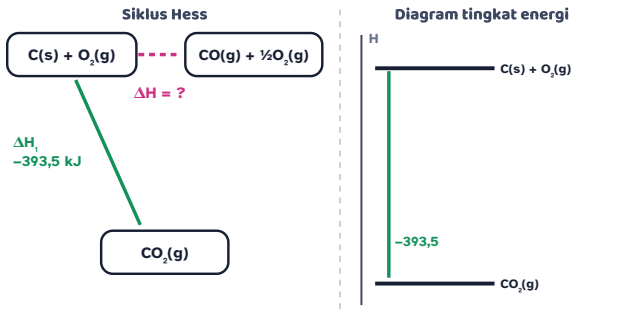
$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots$$

Mengapa begitu? Mesin energi gratis yang mustahil

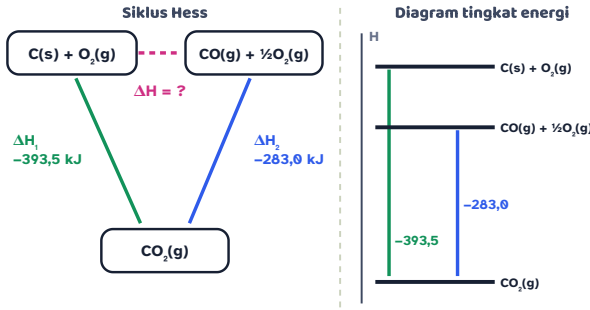
Andaikan jalan A menuju produk melepas 400 kJ, sedangkan jalan B (kebalikannya) hanya butuh 300 kJ untuk kembali ke pereaksi. Kita bisa berputar terus: maju lewat A, mundur lewat B, dan setiap putaran mendapat 100 kJ gratis tanpa mengubah zat apa pun. Mesin seperti itu melanggar hukum kekekalan energi (hukum I termodinamika). Jadi ΔH pasti sama untuk semua jalan. Besaran yang hanya bergantung pada keadaan, seperti entalpi dan ketinggian, disebut **fungsi keadaan**.



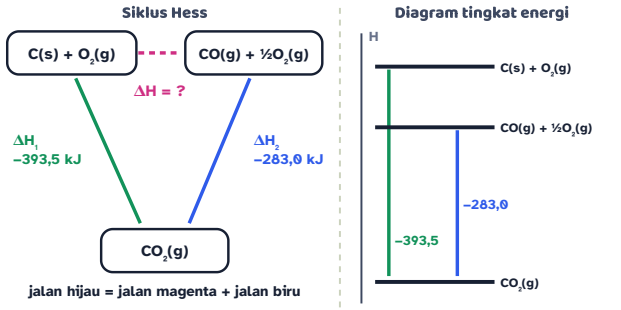
Langkah 1. Kita ingin ΔH untuk $\mathrm{C(s)} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_2(g)} \quad \mathrm{CO(g)}$. Sayangnya, membakar arang dengan oksigen terbatas selalu menghasilkan campuran CO dan $\mathrm{CO_2}$. Tidak bisa diukur langsung!



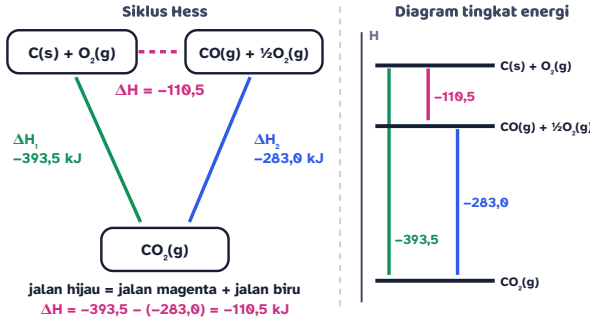
Langkah 2. Jalan memutar, tahap 1: bakar karbon sempurna menjadi $\mathrm{CO_2}$. Ini mudah diukur dengan kalorimeter bom: $\Delta H_1 = -393{,}5$ kJ.



Langkah 3. Tahap 2: bakar CO menjadi $\mathrm{CO_2}$, juga mudah diukur: $\Delta H_2 = -283{,}0$ kJ. Di diagram, CO berada di antara C dan $\mathrm{CO_2}$.



Langkah 4. Hukum Hess: dari $\mathrm{C} + \mathrm{O_2}$ ke $\mathrm{CO_2}$, lewat CO ataupun langsung, perubahan entalpinya sama. Jadi $\Delta H_1 = \Delta H + \Delta H_2$.



Langkah 5. Hasilnya: $\Delta H = -393{,}5 - (-283{,}0) = -110{,}5$ kJ/mol. Inilah ΔH_f° CO, diperoleh tanpa pernah mengukurnya langsung!

TRIK KAK TIRTA

Soal Hess itu seperti menyusun puzzle. (1) Lihat zat di persamaan target: harus di kiri atau di kanan? (2) **Balik** persamaan bila zatnya berada di sisi yang salah (tanda ΔH ikut berbalik). (3) **Kalikan** supaya koefisiennya cocok (ΔH ikut dikali). (4) Jumlahkan semuanya dan coret zat yang muncul di kiri dan kanan. Bila yang tersisa persis persamaan target, jumlahkan ΔH-nya.

COBA SENDIRI **Entalpi pembentukan etanol dari tetes tebu**

Etanol untuk campuran bensin dibuat dengan fermentasi tetes tebu. Hitung ΔH_f° etanol, $2\,C\,(s) + 3\,H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) \longrightarrow C_2H_5OH\,(l)$, dari data pembakaran berikut (kJ/mol): C –393,5; H_2 –285,8; $C_2H_5OH\,(l)$ –1.367.

1. (1) $C\,(s) + O_2\,(g) \longrightarrow CO_2\,(g)$, –393,5 kJ. Target butuh 2C di kiri → kalikan 2: –787,0 kJ.
2. (2) $H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) \longrightarrow H_2O\,(l)$, –285,8 kJ. Target butuh $3\,H_2$ → kalikan 3: –857,4 kJ.
3. (3) $C_2H_5OH\,(l) + 3\,O_2\,(g) \longrightarrow 2\,CO_2\,(g) + 3\,H_2O\,(l)$, –1.367 kJ. Etanol harus di kanan → balik: +1.367 kJ.
4. Jumlahkan: $2\,CO_2$ dan $3\,H_2O$ tercoret; oksigen tersisa $2 + \frac{3}{2} - 3 = \frac{1}{2}$ mol di kiri, cocok dengan target.
5. $\Delta H_f^\circ = -787{,}0 - 857{,}4 + 1.367 = -277{,}4$ kJ/mol.

ΔH_f° etanol ≈ –277 kJ/mol (nilai tabel –277,7; selisih kecil karena pembulatan data).

TAMU DARI MASA LALU

Germain Henri Hess (1802–1850) lahir di Jenewa, Swiss, tetapi besar dan bekerja di Sankt Peterburg, Rusia. Setelah mengukur kalor banyak reaksi, pada 1840 ia menyimpulkan bahwa kalor total selalu sama, berapa pun tahap yang ditempuh. Hukumnya terbit beberapa tahun sebelum hukum kekekalan energi dirumuskan dengan jelas oleh Mayer, Joule, dan Helmholtz. Jadi Hess termasuk perintis termodinamika!

19.5 Entalpi pembentukan standar dan energi ikatan

Menulis siklus Hess untuk setiap reaksi itu melelahkan. Kimiawan lalu menyusun satu tabel besar berisi "ketinggian" setiap senyawa diukur dari unsur-unsurnya. Dengan tabel itu, ΔH reaksi apa pun bisa dihitung dalam satu baris.

DEFINISI · ENTALPI PEMBENTUKAN STANDAR

Entalpi pembentukan standar (ΔH_f°) adalah perubahan entalpi saat 1 mol senyawa dibentuk dari unsur-unsurnya dalam wujud standar, pada 298 K dan 1 bar. ΔH_f° unsur dalam wujud standarnya, misalnya $O_2\,(g)$, $H_2\,(g)$, C (grafit), dan $Fe\,(s)$, adalah **nol**.

Zat	ΔH_f° (kJ/mol)	Zat	ΔH_f° (kJ/mol)

$H_2O\,(l)$	−285,8	$C_2H_5OH\,(l)$	−277,7
$H_2O\,(g)$	−241,8	$C_6H_{12}O_6\,(s)$ glukosa	−1.273,3
$CO_2\,(g)$	−393,5	$NH_3\,(g)$	−46,1
$CO\,(g)$	−110,5	$NaCl\,(s)$	−411,2
$CH_4\,(g)$	−74,8	$CaO\,(s)$	−635,1
$C_2H_6\,(g)$	−84,7	$Ca(OH)_2\,(s)$	−986,1
$C_3H_8\,(g)$ propana	−103,8	$CaCO_3\,(s)$	−1.206,9
$C_4H_{10}\,(g)$ butana	−125,6	$Fe_2O_3\,(s)$	−824,2
$C_2H_4\,(g)$ etena	+52,3	$C_2H_2\,(g)$ etuna	+226,7

ATURAN · ΔH REAKSI DARI ENTALPI PEMBENTUKAN

$$\Delta H^\circ_{\text{reaksi}} = \sum n\,\Delta H^\circ_f(\text{produk}) - \sum m\,\Delta H^\circ_f(\text{pereaksi})$$

n dan m adalah koefisien reaksi. Ingat: "produk dikurangi pereaksi".

Mengapa begitu? Jalan memutar lewat unsur-unsur

Bayangkan pereaksi diurai dulu menjadi unsur-unsurnya ($\Delta H = -\sum m\,\Delta H^\circ_f$ pereaksi, karena penguraian adalah kebalikan pembentukan), lalu unsur-unsur itu disusun menjadi produk ($\Delta H = +\sum n\,\Delta H^\circ_f$ produk). Menurut hukum Hess, jumlah kedua tahap sama dengan ΔH reaksi langsung.

KERJAKAN BERSAMA **Gas di kompor portabel**

Kompor portabel untuk berkemah memakai gas butana. Hitung ΔH pembakaran 1 mol butana, $C_4H_{10}\,(g) + \frac{13}{2}\,O_2\,(g) \longrightarrow 4\,CO_2\,(g) + 5\,H_2O\,(l)$, dengan data tabel di atas.

1. Produk: $4(-393{,}5) + 5(-285{,}8) = -1.574{,}0 - 1.429{,}0 = -3.003{,}0$ kJ.
2. Pereaksi: $-125{,}6 + \frac{13}{2}(0) = -125{,}6$ kJ (oksigen adalah unsur).
3. $\Delta H = -3.003{,}0 - (-125{,}6) = -2.877{,}4$ kJ.

ΔH_c butana ≈ −2.877 kJ/mol. Dibagi M_r 58, setiap gram butana melepas ±49,5 kJ.

Cara kedua memandang reaksi dari dalam: **ikatan apa yang putus dan ikatan apa yang terbentuk?**

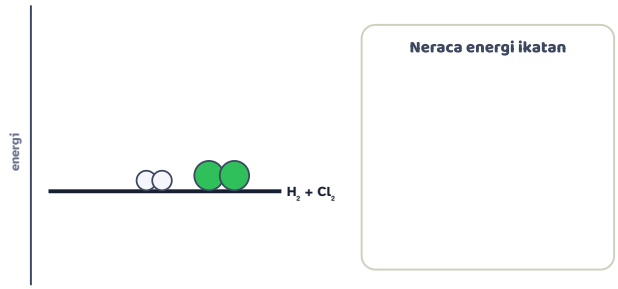
DEFINISI · ENERGI IKATAN

Energi ikatan adalah energi yang dibutuhkan untuk memutus 1 mol ikatan tertentu dalam molekul berwujud gas. Nilainya selalu positif. Karena ikatan C–H dalam metana sedikit berbeda dari C–H dalam etanol, tabel memberi **energi ikatan rata-rata** dari banyak senyawa.

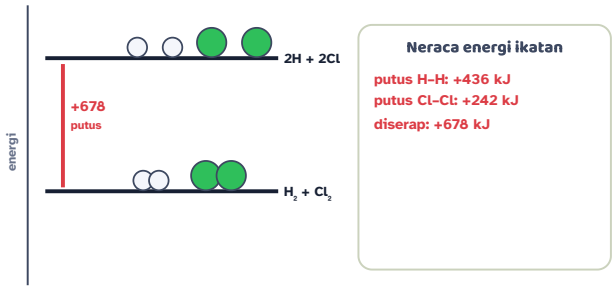
Ikatan	kJ/mol	Ikatan	kJ/mol	Ikatan	kJ/mol
H–H	436	C–C	347	O–H	463
C–H	413	C=C	614	O=O	498
N–H	391	C≡C	839	C–O	358
N≡N	945	C=O (dalam CO_2)	805	Cl–Cl	242
H–Cl	431	C=O (senyawa lain)	±745	H–Br	366

AWAS JEBAKAN

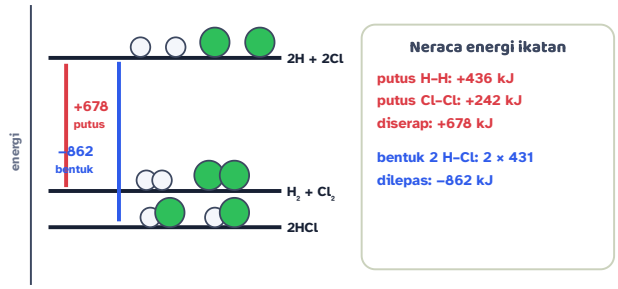
Memutus ikatan selalu **menyerap** energi; membentuk ikatan selalu **melepas** energi. Banyak orang mengira "memutus ikatan melepaskan energi" karena reaksi pembakaran memanaskan. Sebenarnya kalor itu datang dari ikatan baru yang lebih kuat di CO_2 dan H_2O, bukan dari ikatan yang putus.



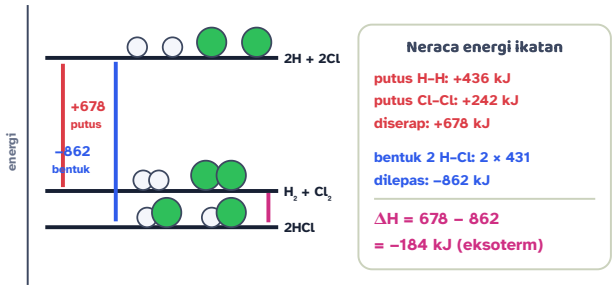
Langkah 1. Pereaksi: satu molekul $\mathrm{H_2}$ (putih) dan satu molekul $\mathrm{Cl_2}$ (hijau). Ikatan adalah tarikan yang menahan dua atom tetap berpasangan.



Langkah 2. Memutus ikatan selalu **menyerap** energi, seperti menarik lepas dua magnet yang menempel. Atom-atom bebas berada jauh di atas: $+436 + 242 = +678$ kJ.



Langkah 3. Membentuk ikatan selalu **melepas** energi, seperti dua magnet yang saling menyambar. Dua ikatan H–Cl melepas $2 \times 431 = 862$ kJ.



Langkah 4. Neraca: $\Delta H = +678 - 862 = -184$ kJ. Ikatan baru lebih kuat daripada ikatan lama, jadi reaksinya eksoterm. Data kalorimeter: $2 \times (-92{,}3) = -184{,}6$ kJ. Cocok!

$$\Delta H = \sum E_{\text{ikatan yang diputus}} - \sum E_{\text{ikatan yang dibentuk}}$$

TRIK KAK TIRTA

Dua rumus, dua arah! Dengan ΔH_f°: produk − pereaksi ("kanan − kiri"). Dengan **energi ikatan**: putus − bentuk, artinya pereaksi − produk ("kiri − kanan"). Kalau tertukar, tanda jawabanmu terbalik. Hitung jumlah ikatan dengan menggambar rumus strukturnya dulu.

RUMUS HIDUP

ΔH pembakaran metana dari energi ikatan

$$\Delta H = \underbrace{4E_{\mathrm{C-H}} + 2E_{\mathrm{O=O}}}_{\text{diputus}} - \underbrace{\left(2E_{\mathrm{C=O}} + 4E_{\mathrm{O-H}}\right)}_{\text{dibentuk}}$$

Energi untuk memutus semua ikatan pereaksi dikurangi energi yang dilepas saat ikatan produk terbentuk.

- $E_{\mathrm{C-H}}$ Energi ikatan C–H kJ/mol
- $E_{\mathrm{O=O}}$ Energi ikatan O=O kJ/mol
- $E_{\mathrm{C=O}}$ Energi ikatan C=O dalam CO_2 kJ/mol
- $E_{\mathrm{O-H}}$ Energi ikatan O–H kJ/mol
- ΔH ΔH pembakaran (air berwujud gas) kJ/mol

ΔH PEMBAKARAN (AIR BERWUJUD GAS)

-814

kJ/mol

eksoterm: ikatan baru lebih kuat

nilai buku −814; data eksperimen −802 (air berwujud gas)

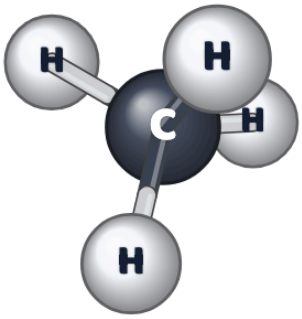
Diputus **2.648** kJ, dibentuk **3.462** kJ, jadi ΔH = **-814** kJ per mol metana.

Cek satuan: kJ/mol − kJ/mol = kJ/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-TERMO-ENERGI-IKATAN

MOLEKUL 3D

Hitung ikatannya sebelum menghitung ΔH



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Metana CH_4 Mr ≈ 16,04 PubChem ↗

Tetrahedral sempurna (109,5°). Gas rumah kaca dari sawah, sampah, dan peternakan; komponen utama gas alam.

Putar setiap molekul dan hitung ikatannya. Metana punya 4 ikatan C–H; berapa ikatan C–H dan C–C di propana? Etanol punya satu ikatan O–H: temukan! Ketuk dua atom untuk mengukur panjang ikatan: ikatan C=O di CO_2 lebih pendek dan lebih kuat daripada C–O tunggal.

MITOS

"Memutus ikatan melepaskan energi, makanya kayu terbakar jadi panas."

FAKTA

Memutus ikatan selalu butuh energi. Kayu terbakar menjadi panas karena ikatan baru di CO_2 dan H_2O jauh lebih kuat; selisihnya keluar sebagai kalor dan cahaya.

MITOS

"ATP menyimpan energi dalam 'ikatan berenergi tinggi' yang melepas energi saat diputus."

FAKTA

Energi dilepas oleh **reaksi hidrolisis** ATP secara keseluruhan: ikatan yang terbentuk dengan air dan ion fosfat yang lebih stabil melepas energi lebih besar daripada energi pemutusan ikatannya.

COBA SENDIRI **Dari minyak sawit menjadi margarin**

Margarin dibuat dengan hidrogenasi ikatan C=C dalam minyak sawit memakai katalis nikel. Perkirakan ΔH untuk setiap ikatan C=C yang dihidrogenasi, memakai model kecil $\mathrm{CH_2{=}CH_2\,(g) + H_2\,(g) \longrightarrow CH_3{-}CH_3\,(g)}$ dan tabel energi ikatan.

1. Ikatan diputus: 1 C=C (614) + 1 H–H (436) = 1.050 kJ. Empat ikatan C–H etena tidak berubah, jadi boleh diabaikan.
2. Ikatan dibentuk: 1 C–C (347) + 2 C–H baru (2 × 413 = 826) = 1.173 kJ.
3. $\Delta H = 1.050 - 1.173 = -123$ kJ.
4. Cek dengan ΔH_f°: $-84{,}7 - (+52{,}3 + 0) = -137$ kJ. Perkiraan energi ikatan meleset ±10% karena memakai nilai rata-rata.

Setiap ikatan C=C yang dihidrogenasi melepas ±120–140 kJ/mol. Pabrik margarin harus mendinginkan reaktornya supaya suhunya tidak melonjak.

19.6 Nilai kalor bahan bakar: dari kayu bakar sampai biodiesel

Dapur Indonesia sudah beberapa kali berganti bahan bakar: kayu bakar dan arang, lalu minyak tanah, dan sejak program konversi tahun 2007 kebanyakan rumah memakai LPG tabung 3 kg yang hijau. Mengapa LPG? Salah satu alasannya bisa dihitung, yaitu seberapa banyak kalor yang keluar dari setiap gram bahan bakar.

DEFINISI · NILAI KALOR

Nilai kalor bahan bakar adalah kalor yang dilepas pada pembakaran sempurna 1 gram (atau 1 kg) bahan bakar. Satuannya kJ/g atau MJ/kg (angkanya sama). Dari entalpi pembakaran:

$$\text{nilai kalor} = \frac{|\Delta H_c|}{M_r}$$

Bahan bakar	Zat utama	ΔH_c (kJ/mol)	Nilai kalor (kJ/g)	Catatan
hidrogen	$\mathrm{H_2}$	−285,8	142	juara per gram, tetapi sulit disimpan
gas alam, biogas	$\mathrm{CH_4}$	−890	55,5	biogas dari kotoran sapi di desa

LPG	C_3H_8 + C_4H_{10}	−2.220 / −2.877	±50	tabung 3 kg dan 12 kg
bensin	C_8H_{18} (model)	−5.470	±48	nilai oktana tidak sama dengan nilai kalor!
lilin parafin	$C_{25}H_{52}$ (±)	—	±46	sering berjelaga
biodiesel sawit	$C_{17}H_{34}O_2$ (metil palmitat)	±−10.680	±40	dicampur ke solar (B35)
arang batok kelapa	C	−393,5	±33	bara sate
etanol, spiritus	C_2H_5OH	−1.367	29,7	nyala bersih, lampu laboratorium
kayu kering	selulosa	—	±16	banyak asap bila basah

RUMUS HIDUP

Nilai kalor bahan bakar

$$\text{nilai kalor} = \frac{|\Delta H_c|}{M_r}$$

Berapa kilojoule yang didapat dari setiap gram bahan bakar yang terbakar sempurna.

- $|\Delta H_c|$ Kalor pembakaran per mol `kJ/mol`
- M_r Massa molar `g/mol`
- nilai kalor Nilai kalor `kJ/g`

NILAI KALOR

50,5

kJ/g

🔥 **propana (LPG): ±50 kJ/g**

Setiap gram melepas **50,5** kJ. Satu tabung LPG 3 kg berbahan ini menyimpan **151,364** MJ, cukup untuk mendidihkan **±165,349** panci berisi 1,5 L air (efisiensi kompor 50%).

Cek satuan: kJ/mol ÷ g/mol = kJ/g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-TERMO-NILAI-KALOR

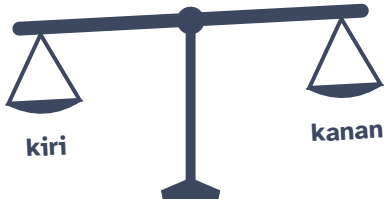
Sebelum menghitung kalor pembakaran, persamaannya harus setara. Coba setarakan bahan bakar-bahan bakar berikut, termasuk metil palmitat dari minyak sawit yang koefisiennya cukup menantang:

PENYETARA REAKSI

Setarakan pembakaran bahan bakar Nusantara

− 1 + CH_4 + − 1 + O_2 → − 1 + CO_2 + − 1 + H_2O

Unsur	Kiri	Kanan	
C	1 ●	1 ●	✓
H	4 ○○○○	2 ○○	✗



Unsur	Kiri	Kanan	
O	2 ●●	3 ●●●	✕

Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 8 null

Berturut-turut: biogas (metana), LPG (propana dan butana), etanol dari tetes tebu, bensin (oktana), biodiesel sawit (metil palmitat), glukosa dalam respirasi, dan pembakaran tidak sempurna propana yang menghasilkan gas CO beracun. Bandingkan banyaknya O_2 yang dibutuhkan per mol bahan bakar: mana yang paling "rakus" oksigen?

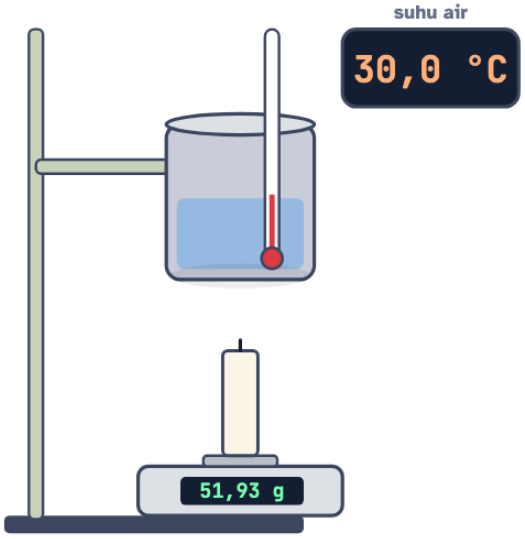
LAB MINI

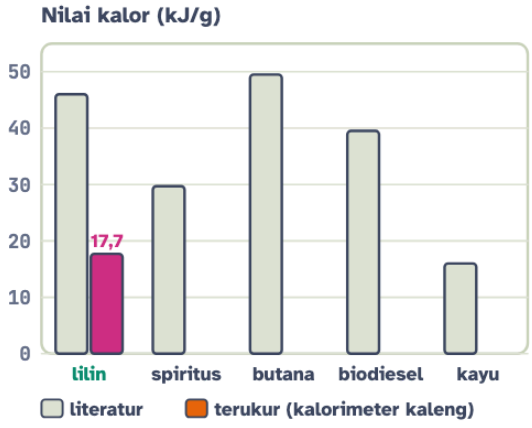
Kalorimeter Kaleng: adu nilai kalor

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-19

Lilin (parafin) · literatur ±46 kJ/g

Panaskan 100 g air sampai naik 20 °C, lalu hitung kJ per gram.





q = 100 g × 4,18 × 3,0 °C = 1,25 kJ

terbakar 0,07 g → nilai kalor = 17,7 kJ/g

efisiensi ±39%: sisanya hilang ke udara dan kaleng

waktu nyata: 0 menit 35 detik

Massa terbakar	ΔT air	Nilai kalor terukur	Literatur	Efisiensi
0,07 g	3 °C	17,7 kJ/g	46 kJ/g	39 %

Pilih bahan bakar, tekan ▶, dan amati neraca serta termometernya. Percobaan berhenti saat air naik sesuai target. Uji kelima bahan bakar: diagram batang di kanan menyimpan hasilmu. Mengapa nilai terukur selalu lebih kecil daripada literatur? Nyalakan perisai angin dan ulangi. Siapa yang paling berjelaga?

KIMIA NUSANTARA · BIODIESEL B35 DARI SAWIT

Indonesia adalah penghasil minyak sawit terbesar di dunia. Minyak sawit direaksikan dengan metanol menjadi metil ester (biodiesel), misalnya metil palmitat $\mathrm{C_{17}H_{34}O_2}$. Sejak 2023, solar di SPBU wajib dicampur 35% biodiesel (B35), dan kadarnya terus dinaikkan. Nilai kalor biodiesel (±40 kJ/g) sedikit di bawah solar (±45 kJ/g) karena molekulnya sudah mengandung atom oksigen, seolah sudah "setengah terbakar". Imbalannya, karbon di dalamnya baru saja diambil pohon sawit dari udara, dan asap knalpotnya lebih sedikit jelaga.

KERJAKAN BERSAMA

Berapa gram LPG untuk sepanci air?

Laras merebus 1,5 L air (1.500 g) dari 28 °C sampai mendidih (100 °C) di kompor LPG. Nilai kalor LPG ±50 kJ/g dan efisiensi kompor ±50%. Berapa gram LPG yang terbakar?

1. Kalor untuk air: $q = 1.500 \times 4{,}18 \times 72 = 451.440$ J ≈ 451 kJ.
2. Hanya 50% kalor nyala yang masuk ke air, jadi LPG harus melepas $451 / 0{,}50 = 903$ kJ.
3. Massa LPG $= 903\ \mathrm{kJ} \div 50\ \mathrm{kJ/g} \approx 18$ g.

±18 g LPG. Satu tabung 3 kg cukup untuk ±165 kali merebus sepanci air seperti ini. Menutup panci dan memakai api biru yang tidak melebar keluar panci menaikkan efisiensinya.

KESELAMATAN · PEMBAKARAN TIDAK SEMPURNA

Bila oksigen kurang, LPG terbakar tidak sempurna: $2\,\mathrm{C_3H_8} + 7\,\mathrm{O_2} \longrightarrow 6\,\mathrm{CO} + 8\,\mathrm{H_2O}$. Gas CO tidak berbau tetapi beracun karena mengikat hemoglobin darah. Nyala kompor yang sehat berwarna biru; nyala kuning-merah yang berjelaga menandakan udara kurang. Jangan menyalakan kompor arang atau genset di ruang tertutup, periksa selang dan regulator LPG secara berkala, dan bila tercium bau gas, jangan menyalakan api atau sakelar listrik: buka pintu dan jendela lebar-lebar.



LPG mudah menyala



Gas bertekanan

MITOS

"Bahan bakar dengan ΔH pembakaran per mol paling besar pasti paling hemat."

FAKTA

Oktana melepas 5.470 kJ/mol dan metana hanya 890 kJ/mol, tetapi per gram metana justru lebih unggul (55,5 vs 48 kJ/g). Untuk tabung dan tangki, yang penting adalah kJ per gram atau per liter.

MITOS

"Api yang lebih besar pasti berasal dari bahan bakar yang lebih kuat."

FAKTA

Besar nyala bergantung pada laju pembakaran (seberapa banyak gram per detik), bukan nilai kalornya. Kayu kering bisa berkobar besar padahal nilai kalornya hanya sepertiga LPG.

TUBUHMU JUGA "MEMBAKAR" BAHAN BAKAR

Respirasi sel, $\mathrm{C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O}$, melepas energi yang sama dengan membakar glukosa di kalorimeter (−2.803 kJ/mol), tetapi bertahap lewat puluhan reaksi enzim sehingga tubuhmu tidak terbakar. Itulah sebabnya label gizi memakai angka dari kalorimeter bom: karbohidrat dan protein ±17 kJ/g (±4 kkal/g), lemak ±37 kJ/g (±9 kkal/g).

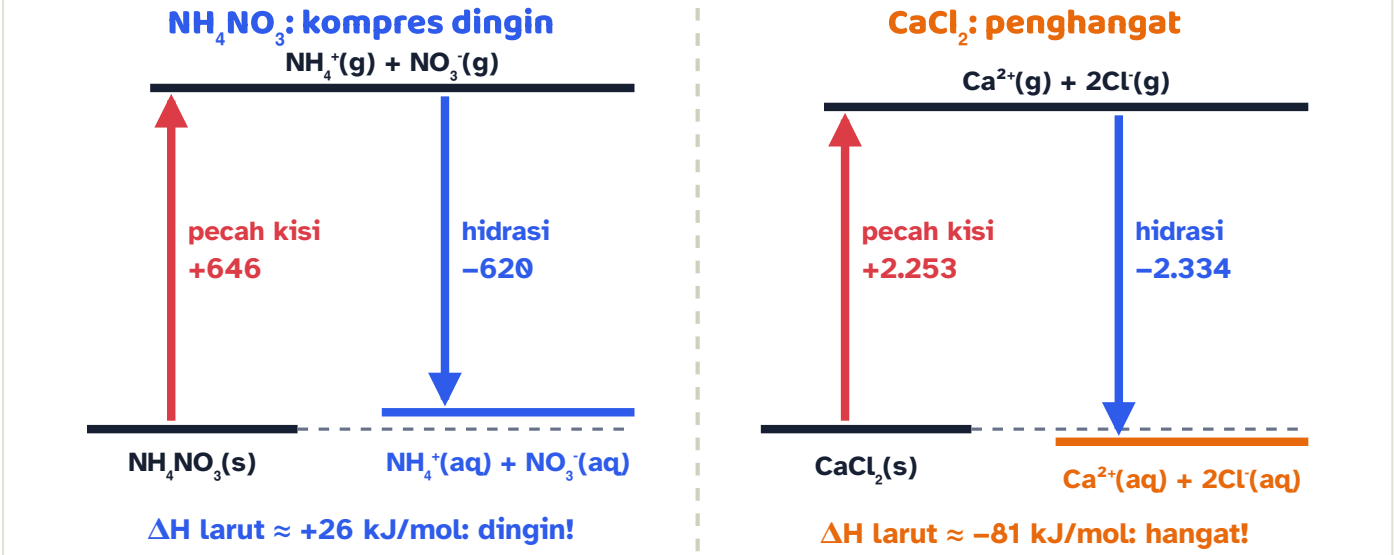
19.7 Rahasia kompres dingin: pelarutan, hidrasi, dan siklus Born–Haber

Kembali ke komik. Kompres dingin berisi kristal amonium nitrat (kadang urea) dan sekantong air. Kantong penghangat jenis lain berisi kalsium klorida. Keduanya hanya garam yang dilarutkan dalam air, tetapi yang satu menjadi dingin dan yang lain menjadi panas. Bagaimana mungkin?

Bahasa sederhana · Melarutkan garam terjadi dalam dua langkah. Pertama, ion-ion di kristal harus **dipisahkan** satu sama lain. Ini seperti membongkar barisan tari saman yang saling bergandengan erat: butuh tenaga. Kedua, setiap ion yang lepas langsung **dipeluk** molekul-molekul air, dan pelukan ini melepas energi. Kalau tenaga membongkar lebih besar daripada energi pelukan, larutan menjadi dingin. Kalau sebaliknya, larutan menjadi panas.

Langkah kedua disebut **hidrasi**. Ujung oksigen molekul air (bermuatan parsial negatif) mengerumuni kation, sedangkan ujung hidrogennya mengerumuni anion. Secara singkat:

$$\Delta H_{\text{pelarutan}} = \underbrace{\Delta H_{\text{pemisahan kisi}}}_{\text{positif}} + \underbrace{\Delta H_{\text{hidrasi}}}_{\text{negatif}}$$



Pelarutan adalah tarik-menarik dua angka besar. Pada amonium nitrat, energi hidrasi sedikit kalah dari energi pemisahan kisi (endoterm). Pada kalsium klorida, ion $\mathrm{Ca^{2+}}$ yang kecil dan bermuatan +2 dihidrasi sangat kuat (eksoterm). Nilai dalam kJ/mol, dibulatkan; skala kiri dan kanan berbeda.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SIKLUS BORN–HABER: HUKUM HESS UNTUK KRISTAL ION

Entalpi kisi tidak bisa diukur langsung, tetapi bisa dihitung dengan siklus Hess yang melewati atom dan ion berwujud gas (lihat juga siklus NaCl di Bab 10). Untuk kalsium klorida (kJ/mol):

Tahap	Persamaan	ΔH
atomisasi kalsium	$\mathrm{Ca\,(s) \longrightarrow Ca\,(g)}$	+178
energi ionisasi pertama	$\mathrm{Ca\,(g) \longrightarrow Ca^{+}\,(g) + e^{-}}$	+590
energi ionisasi kedua	$\mathrm{Ca^{+}\,(g) \longrightarrow Ca^{2+}\,(g) + e^{-}}$	+1.145
atomisasi klorin	$\mathrm{Cl_2\,(g) \longrightarrow 2\,Cl\,(g)}$	+242
afinitas elektron (×2)	$\mathrm{2\,Cl\,(g) + 2\,e^{-} \longrightarrow 2\,Cl^{-}\,(g)}$	2(−349) = −698
pembentukan kisi	$\mathrm{Ca^{2+}\,(g) + 2\,Cl^{-}\,(g) \longrightarrow CaCl_2\,(s)}$	U = ?
total = pembentukan	$\mathrm{Ca\,(s) + Cl_2\,(g) \longrightarrow CaCl_2\,(s)}$	**−796**

Hess: $-796 = 178 + 590 + 1.145 + 242 - 698 + U$, sehingga $U = -796 - 1.457 \approx -2.253$ kJ/mol. Kisi $\mathrm{CaCl_2}$ hampir tiga kali lebih kuat daripada NaCl (−787) karena muatan +2 menarik anion jauh lebih kuat.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ENTALPI HIDRASI: ION KECIL BERMUATAN BESAR MENANG

Entalpi hidrasi (kJ/mol, kira-kira): Li^+ −519, Na^+ −406, K^+ −322, Mg^{2+} −1.920, Ca^{2+} −1.577, Cl^- −378. Makin kecil ion dan makin besar muatannya, makin rapat molekul air mengerumuninya, sehingga hidrasinya makin eksoterm.

Contoh NaCl: $\Delta H_{\text{pelarutan}} = +787 + (-406) + (-378) = +3$ kJ/mol (data percobaan +3,9). Dua angka raksasa hampir saling meniadakan, sehingga garam dapur larut hampir tanpa perubahan suhu. Pelarutan tetap terjadi walaupun sedikit endoterm. Mengapa? Rahasianya ada di Bab 20.

Kimia di sekitarmu

Kompor LPG 3 kg

Setiap gram LPG melepas ±50 kJ. Satu tabung hijau menyimpan ±150 MJ, cukup untuk mendidihkan lebih dari 150 panci berisi 1,5 L air.

Penghangat pendaki Semeru

Serbuk besi, garam, karbon aktif, dan sedikit air bereaksi dengan oksigen: $4\,Fe + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,Fe_2O_3$, $\Delta H = -1.648$ kJ. Garam mempercepat karat sehingga kalor keluar berjam-jam.

Makanan swapanas

Banyak kantong pemanasnya berisi kapur tohor: $CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$, $\Delta H \approx -65$ kJ/mol. Cukup untuk menghangatkan nasi tanpa kompor.

Kompres dingin instan

Amonium nitrat atau urea larut sambil menyerap kalor (+25,7 kJ/mol untuk amonium nitrat). Isi kantong bisa turun hingga beberapa derajat di atas 0 °C.

Air kendi tetap sejuk

Air merembes dan menguap dari pori-pori kendi tanah liat. Penguapan menyerap kalor (+44 kJ/mol), sehingga air di dalamnya sejuk tanpa kulkas. Keringatmu bekerja dengan cara yang sama.

Bara sate arang batok

Arang batok kelapa hampir murni karbon: $C + O_2 \longrightarrow CO_2$, $\Delta H = -393{,}5$ kJ/mol (±33 kJ/g). Kipasan penjual sate menambah oksigen sehingga bara makin membara.

Cek Cepat

Saat zat X dilarutkan dalam kalorimeter, termometer turun dari 28 °C menjadi 24 °C. Pelarutan X bersifat ...

- eksoterm, ΔH negatif
- eksoterm, ΔH positif
- endoterm, ΔH positif
- endoterm, ΔH negatif

Diketahui $\mathrm{C\,(s) + O_2\,(g) \longrightarrow CO_2\,(g)}$, $\Delta H = -393{,}5$ kJ. Berapa ΔH bila 2 mol karbon terbakar sempurna?

- –787 kJ
- –393,5 kJ
- +787 kJ
- –196,75 kJ

Zat manakah yang entalpi pembentukan standarnya nol?

- $\mathrm{H_2O\,(l)}$
- $\mathrm{CO_2\,(g)}$
- $\mathrm{O_3\,(g)}$
- $\mathrm{O_2\,(g)}$

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: kompres dingin dan penghangat buatanmu

Bahan: 2 gelas plastik bening (ditumpuk) dan tutup karton, termometer dapur atau termometer digital (bukan termometer raksa), garam inggris dari apotek, soda kue, cuka dapur, segumpal sabut baja cuci piring, toples kaca kecil bertutup, sendok takar, air keran, stopwatch HP, sarung tangan.

1. Isi gelas bertumpuk dengan 100 mL air keran. Catat suhunya tiap 30 detik selama 2 menit.
2. Masukkan 2 sendok teh garam inggris, aduk pelan, dan catat suhu tiap 30 detik selama 5 menit.
3. Ulangi dengan 50 mL cuka lalu tambahkan 1 sendok teh soda kue (pakai gelas yang lebih besar karena berbuih).
4. Penghangat: pakai sarung tangan, rendam sabut baja dalam cuka selama 1 menit, peras, lalu bungkuskan ke ujung termometer di dalam toples dan tutup. Catat suhu tiap menit selama 10 menit.
5. Buat grafik suhu–waktu ketiga percobaan dalam satu gambar.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Pakai sarung tangan saat memegang sabut baja karena serpihannya tajam. Jangan mencicipi larutan apa pun. Bila cuka terkena mata, segera bilas dengan air mengalir. Buang larutan ke wastafel sambil dialiri banyak air, dan bungkus sabut baja bekas dengan kertas sebelum dibuang.

Pertanyaan: Percobaan mana yang eksoterm dan mana yang endoterm? Mana yang mirip kompres dingin dan mana yang mirip kantong penghangat Laras? Mengapa sabut baja harus direndam cuka dulu?

RINGKASAN KILAT — Bab 19 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan **sistem** dan **lingkungan**, serta reaksi **eksoterm** dan **endoterm**, dengan diagram tingkat energi dan profil energi
- menulis **persamaan termokimia** dan memakai jenis-jenis ΔH standar
- menghitung kalor dengan $q = mc\Delta T$ dan ΔH reaksi dari data **kalorimeter**
- menghitung ΔH dengan **hukum Hess**, **entalpi pembentukan standar**, dan **energi ikatan** rata-rata
- membandingkan **nilai kalor** bahan bakar (LPG, bensin, biodiesel sawit, kayu) dan menjelaskan mengapa melarutkan garam bisa terasa panas atau dingin

Istilah kunci

sistem · lingkungan · Reaksi eksoterm · Reaksi endoterm · energi aktivasi · perubahan entalpi · Entalpi · persamaan termokimia · kalorimeter · kalorimetri · kalor jenis · Entalpi pembentukan standar · Energi ikatan · Nilai kalor · hidrasi

Rumus penting

$$q = m \times c \times \Delta T$$

Kalor yang diserap atau dilepas zat. Kalor sama dengan massa dikali kalor jenis dikali perubahan suhu. Zat yang banyak dan 'sulit panas' membutuhkan kalor besar.

$$\Delta H = -\frac{m \times 4{,}18 \times \Delta T}{n}$$

ΔH reaksi dari data kalorimeter. Kalor yang diterima larutan berasal dari reaksi, jadi tandanya dibalik, lalu dibagi jumlah mol zat yang bereaksi.

$$\Delta H = \underbrace{4E_{\text{C–H}} + 2E_{\text{O=O}}}_{\text{diputus}} - \underbrace{(2E_{\text{C=O}} + 4E_{\text{O–H}})}_{\text{dibentuk}}$$

ΔH pembakaran metana dari energi ikatan. Energi untuk memutus semua ikatan pereaksi dikurangi energi yang dilepas saat ikatan produk terbentuk.

$$\text{nilai kalor} = \frac{|\Delta H_c|}{M_r}$$

Nilai kalor bahan bakar. Berapa kilojoule yang didapat dari setiap gram bahan bakar yang terbakar sempurna.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Endoterm tidak berarti "tidak butuh kalor"; justru reaksi endoterm terus-menerus menyerap kalor.
- Massa dalam $q = mc\Delta T$ adalah massa larutan yang suhunya berubah, bukan massa zat yang bereaksi.
- Memutus ikatan selalu menyerap energi; membentuk ikatan selalu melepas energi.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=19

🧩 Teka-teki untuk Bab 20

Es di gelas es teh mencair sendiri pada suhu kamar, walaupun pelelehan es adalah proses endoterm ($\Delta H = +6{,}01$ kJ/mol). Sebaliknya, air tidak pernah membeku sendiri di siang hari Jakarta, walaupun pembekuan melepaskan kalor. Garam dapur pun tetap larut walaupun sedikit endoterm. Jadi, kalau bukan ΔH, apa yang sebenarnya menentukan suatu proses "mau" terjadi?

▼ **Intip petunjuk**

Selain energi, alam juga "menghitung" banyaknya cara partikel dapat tersusun. Molekul air cair bisa berkeliaran dengan jauh lebih banyak cara daripada molekul yang terkunci di kristal es. Ukuran "banyaknya cara" ini disebut **entropi**. Di Bab 20 kamu akan menggabungkan energi dan entropi dalam energi bebas Gibbs, $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$.

20 Entropi & Energi Bebas Gibbs: Mengapa Alam Punya Arah?

Es batu di warung mencair sendiri, tetapi air di gelas tidak pernah membeku sendiri pada siang hari. Kamar yang rapi bisa berantakan sendiri, tetapi kamar berantakan tidak pernah rapi sendiri. Ada "hakim" tersembunyi yang menentukan arah setiap proses di alam, dan bab ini memperkenalkannya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan proses **spontan** dan tidak spontan, serta menjelaskan bahwa spontan tidak sama dengan cepat;
- menjelaskan **entropi** sebagai ukuran banyaknya cara (mikrostate) melalui $S = k \ln W$, dan meramalkan tanda ΔS untuk perubahan wujud dan reaksi gas;
- menghitung ΔS° reaksi dari data entropi standar dan menerapkan **hukum II termodinamika**;
- menghitung **energi bebas Gibbs** $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ dengan satuan yang benar, membaca empat kombinasi tanda, dan menentukan **suhu peralihan**;
- (Lanjut) menghubungkan ΔG° dengan tetapan kesetimbangan K dan potensial sel E°.

KAMAR YANG BERANTAKAN SENDIRI

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Besi berkarat di udara lembap adalah proses *spontan*. Apa arti kata "spontan" itu?

- Prosesnya pasti berlangsung cepat, dalam hitungan detik.
- Prosesnya dapat berlangsung dengan sendirinya tanpa dorongan terus-menerus dari luar, walaupun mungkin sangat lambat.
- Prosesnya pasti melepaskan kalor yang sangat banyak sampai terasa panas.
- Prosesnya terjadi tanpa sebab, tanpa pereaksi apa pun.

Jawabannya: dapat berlangsung sendiri, walaupun lambat. Pagar besi butuh berbulan-bulan untuk berkarat, tetapi prosesnya tetap spontan: ia berjalan sendiri dan tidak pernah berbalik menjadi besi mengilap. Dalam kimia, "spontan" menjawab pertanyaan *ke arah mana*, bukan *secepat apa*. Kecepatan adalah urusan Bab 21.

20.1 Spontan: ke mana alam melangkah?

Perhatikan hal-hal yang terjadi **dengan sendirinya** di sekitarmu. Wangi parfum menyebar ke seluruh kamar. Teh panas mendingin sampai sesuhu ruangan. Gula larut dalam kopi. Pagar besi berkarat. Kayu bakar yang sudah disulut terus menyala sampai menjadi abu.

Kebalikannya tidak pernah kita lihat. Wangi parfum tidak berkumpul kembali ke dalam botolnya. Teh dingin tidak memanas sendiri dengan menyedot kalor dari udara kamar. Abu tidak berubah kembali menjadi kayu. Alam ternyata punya **arah**.

Bahasa sederhana · Bayangkan sebuah bola di lereng bukit. Bola itu menggelinding **turun** dengan sendirinya, tetapi tidak pernah naik sendiri. Proses kimia juga begitu: ada arah "turun" yang terjadi sendiri (spontan) dan arah "naik" yang hanya terjadi bila kita terus mendorongnya. Bola bisa saja tersangkut kerikil dan diam lama sekali, tetapi arahnya tetap ke bawah.

DEFINISI · PROSES SPONTAN

Proses **spontan** adalah proses yang, pada kondisi tertentu (suhu, tekanan), dapat berlangsung **dengan sendirinya** tanpa campur tangan terus-menerus dari luar. Kebalikan dari proses spontan selalu **tidak spontan** pada kondisi yang sama: ia hanya terjadi bila terus "didorong" dengan energi dari luar (misalnya listrik, cahaya, atau kerja pompa).

Ilmuwan abad ke-19 mula-mula menduga: *reaksi spontan adalah reaksi eksoterm*, seperti bola yang menggelinding turun dan melepas energi. Dugaan itu sering benar. Pembakaran LPG, karat, dan reaksi logam natrium dengan air semuanya eksoterm dan spontan. Namun ada banyak pengecualian yang mengganggu:

Proses	ΔH (kJ/mol)	Spontan pada 25 °C?	Apa yang terjadi pada partikel?
Es mencair, $\mathrm{H_2O\,(s) \longrightarrow H_2O\,(l)}$	+6,01 (endoterm)	✔ ya	kisi teratur → molekul bebas bergeser
Garam dapur larut, $\mathrm{NaCl\,(s) \longrightarrow Na^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)}$	+3,9 (endoterm)	✔ ya	kristal → ion tersebar dalam air
Amonium nitrat larut (kompres dingin, Bab 19)	+25,7 (endoterm)	✔ ya	kristal → ion tersebar dalam air
Air di jemuran menguap ke udara yang belum jenuh uap air	+44,0 (endoterm)	✔ ya, perlahan	cairan → gas yang menyebar ke udara
Air membeku pada 10 °C, $\mathrm{H_2O\,(l) \longrightarrow H_2O\,(s)}$	−6,01 (eksoterm)	✘ tidak!	molekul bebas → kisi teratur

Lihat kolom terakhir. Semua proses endoterm yang tetap spontan punya satu kesamaan: partikelnya menjadi **lebih bebas dan lebih tersebar**. Sebaliknya, air yang membeku pada 10 °C justru melepas kalor, tetapi tidak terjadi. Jadi energi (ΔH) bukan satu-satunya hakim. Ada hakim kedua yang menghitung **banyaknya cara partikel dan energi dapat tersusun**. Hakim itu bernama **entropi**.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Spontan **tidak** berarti cepat. Pembakaran kertas oleh oksigen udara adalah proses spontan (ΔG sangat negatif), tetapi bukumu tidak terbakar sendiri di rak karena reaksinya butuh "dorongan awal" berupa api. Intan bahkan spontan berubah menjadi grafit, tetapi lajunya begitu lambat sehingga tidak teramati selama jutaan tahun. Termodinamika menjawab *boleh atau tidak*; kinetika (Bab 21) menjawab *secepat apa*.

20.2 Entropi: menghitung banyaknya cara

Tebak Dulu!

Kamu melempar 4 koin sekaligus. Hasil mana yang paling sering muncul bila kamu mengulangnya ratusan kali?

"4 gambar" sama seringnya dengan "2 gambar, 2 angka", karena setiap koin peluangnya 50 : 50.

"4 gambar", karena koin cenderung jatuh sama.

"2 gambar, 2 angka", karena hasil itu bisa terjadi dengan paling banyak cara.

Tidak bisa ditebak sama sekali karena acak.

Jawabannya: 2 gambar, 2 angka. Setiap urutan khusus (misalnya G-A-G-A) memang sama peluangnya, yaitu 1/16. Namun "2 gambar, 2 angka" bisa tersusun dengan **6 urutan berbeda**, sedangkan "4 gambar" hanya dengan 1 urutan. Hasil acak pun punya pola: yang menang adalah keadaan dengan cara terbanyak. Itulah inti entropi.

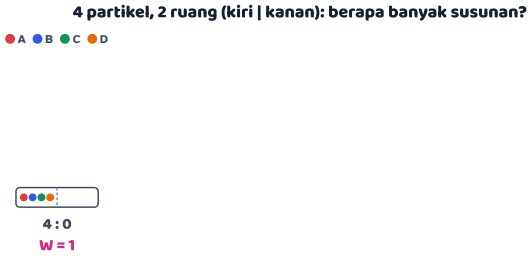
Kembali ke kamar Bima. Misalkan ada 10 barang dan masing-masing punya satu tempat yang "benar". Hanya ada **1** susunan yang rapi. Banyak susunan seluruhnya adalah $10! = 3.628.800$. Kalau barang-barang dipindah secara acak (dipakai, dilempar, dipinjam adik), hampir pasti hasilnya "berantakan". Bukan karena alam membenci kerapian, tetapi karena cara untuk berantakan **jauh lebih banyak**.

Bahasa sederhana · Coba pikirkan sebungkus kancing merah dan putih yang dikocok. Hanya sedikit sekali cara agar semua kancing merah berkumpul di satu sisi, tetapi ada sangat banyak cara agar merah dan putih bercampur. Karena itu, setelah dikocok, kancing hampir selalu tercampur. Partikel zat juga terus "terkocok" oleh gerakannya sendiri.

DEFINISI · MAKROSTATE, MIKROSTATE, DAN W

Makrostate adalah keadaan yang kita amati secara keseluruhan, misalnya "3 partikel di ruang kiri, 1 di ruang kanan". **Mikrostate** adalah susunan rinci yang mewujudkannya: partikel *mana* berada *di mana* dan membawa energi *berapa*. Banyaknya mikrostate untuk satu makrostate diberi lambang W.

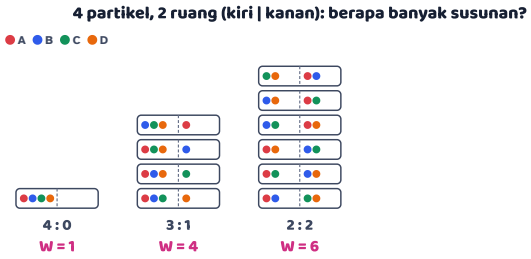
Mari menghitung W untuk 4 partikel gas (A, B, C, D) dalam kotak yang dibagi dua ruang sama besar.



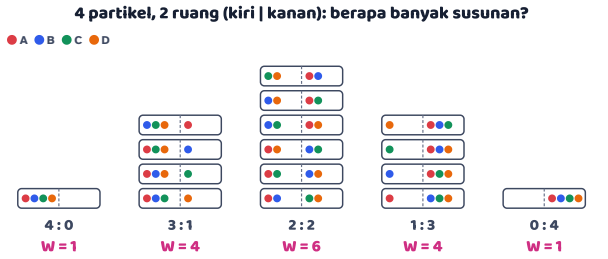
Langkah 1. Sekat masih tertutup: keempat partikel ada di ruang kiri. Makrostate "4 : 0" hanya dapat terjadi dengan **1 cara**, jadi $W = 1$.



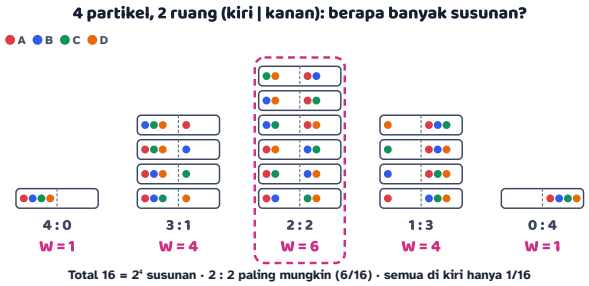
Langkah 2. Sekat dibuka. Makrostate "3 : 1": partikel yang berada di kanan bisa A, B, C, atau D. Ada **4 cara**, $W = 4$.



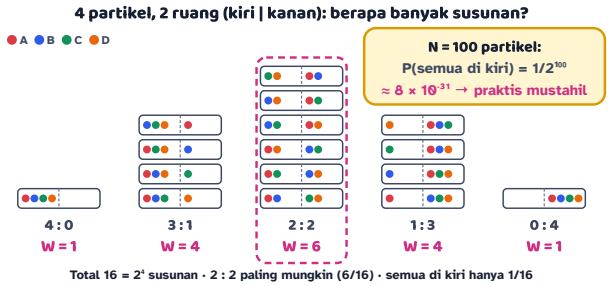
Langkah 3. Makrostate "2 : 2": pasangan di kiri bisa AB, AC, AD, BC, BD, atau CD. Ada **6 cara**, $W = 6$, paling banyak!



Langkah 4. "1 : 3" juga punya 4 cara dan "0 : 4" hanya 1 cara. Susunan cara membentuk pola 1, 4, 6, 4, 1. Tumpukannya sudah mirip grafik batang.



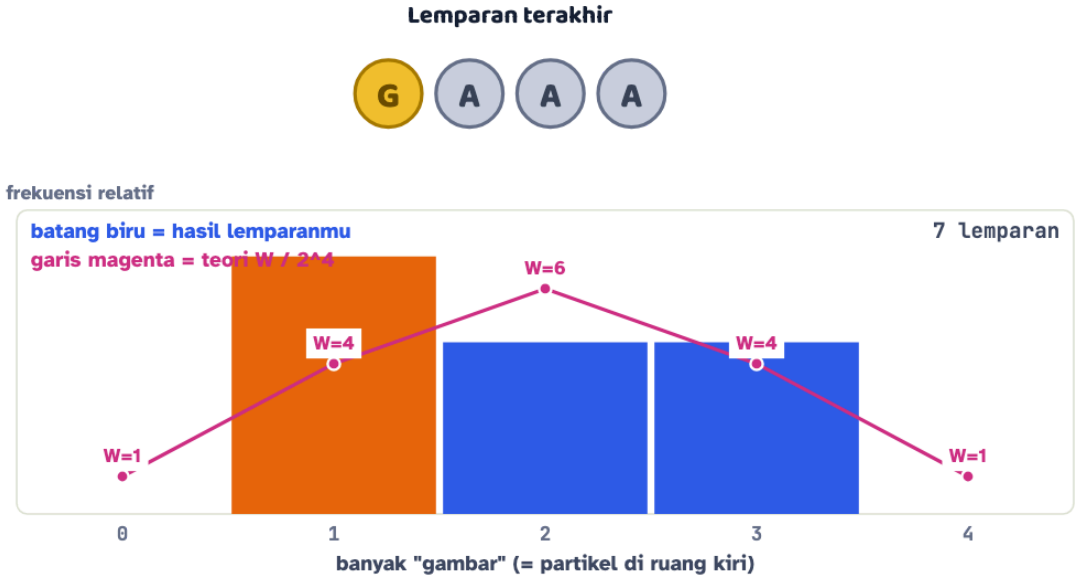
Langkah 5. Total ada $2^4 = 16$ mikrostate yang sama peluangnya. Makrostate "2 : 2" muncul $6/16 = 37{,}5\%$ dari waktu; "semua kembali ke kiri" hanya $1/16$.



Langkah 6. Dengan 100 partikel, peluang semua kembali ke kiri adalah $1/2^{100} \approx 8 \times 10^{-31}$. Satu mol gas berisi 6×10^{23} partikel: gas yang sudah menyebar **praktis tidak pernah** berkumpul kembali sendiri.

LAB MINI **Pelempar Koin Entropi: yang teratur atau yang acak?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-20



jumlah lemparan	lemparan terakhir	makrostate tersering
7	1 gambar, 3 angka	1 gambar (W = 4)

"semua gambar" muncul	peluang teori semua gambar
0	0,06

Anggap setiap koin sebuah partikel: **gambar** = di ruang kiri, **angka** = di ruang kanan. Lempar 4 koin seratus kali dan bandingkan batang biru dengan garis teori $W/2^N$. Lalu pilih 20, 50, dan 100 koin. Mengapa sebarannya makin runcing di tengah? Berapa kali "semua gambar" (susunan paling rapi) muncul?

Ludwig Boltzmann menyadari bahwa **entropi** tidak lain adalah ukuran banyaknya mikrostate. Karena W bisa luar biasa besar, ia memakai logaritmanya:

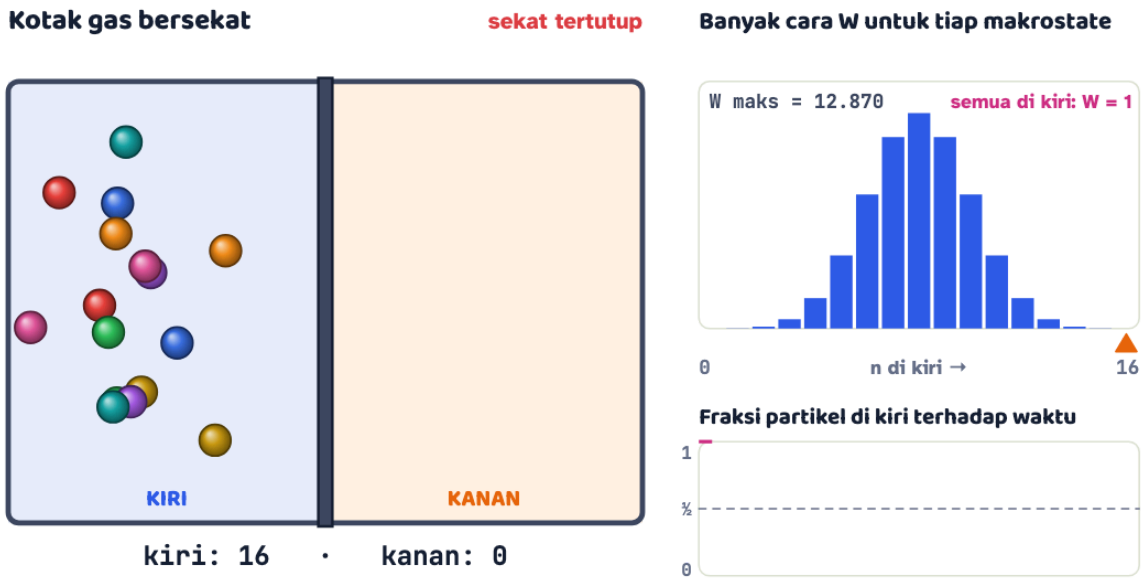
RUMUS BOLTZMANN · ENTROPI

$$S = k \ln W \qquad k = \frac{R}{N_A} = 1{,}381 \times 10^{-23}\ \mathrm{J/K}$$

S adalah **entropi**, W banyaknya mikrostate, dan k **tetapan Boltzmann**. Makin banyak cara partikel dan energinya dapat tersusun, makin besar entropinya. Satuan entropi J/K; entropi molar memakai J/(mol·K).

LAB MINI **Kotak Mikrostate: partikel menyebar dari satu sisi**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-20



Sekat tertutup. Buka sekatnya, lalu amati: apakah partikel pernah kembali semua ke kiri?

partikel di kiri	partikel di kanan	W (banyak cara) saat ini	S/k = ln W
16	0	1	0

peluang semua di kiri = 1/2^N	Keadaan
$1{,}53 \times 10^{-5}$	teratur: semua di kiri

Buka sekatnya dan amati partikel menyebar. Grafik batang di kanan menunjukkan banyak cara W untuk setiap makrostate: batang oranye adalah keadaanmu sekarang. Coba dengan N = 4: seberapa sering semua partikel kembali ke kiri? Lalu coba N = 40. Mau jadi "setan Maxwell"? **Seret** partikel kembali ke kiri satu per satu, lalu tutup sekatnya. Rasakan betapa repotnya menurunkan entropi!

Ketika volume gas menjadi dua kali lipat, setiap partikel punya dua kali lebih banyak tempat. Untuk N partikel, banyak cara bertambah 2^N kali, sehingga $\Delta S = k \ln 2^N = Nk \ln 2$. Untuk satu mol gas, $Nk = N_A k = R$, jadi $\Delta S = R \ln 2 = 5{,}76$ J/K. Secara umum, untuk gas ideal pada suhu tetap:

RUMUS HIDUP **Entropi gas yang memuai**

$$\Delta S = n\,R\,\ln\frac{V_2}{V_1}$$

Saat volume gas membesar, setiap partikel punya lebih banyak tempat, sehingga banyaknya cara W melonjak dan entropi naik.

n Jumlah gas mol | V_2/V_1 Perbandingan volume akhir/awal | ΔS Perubahan entropi J/K

PERUBAHAN ENTROPI
5,76
J/K

R ln 2 = 5,76 J/K | **memuai: entropi naik**

1 mol gas, volumenya dikali **2**: ΔS = **5,76** J/K. Setiap partikel kini punya **2** kali lebih banyak tempat.

Cek satuan: mol × J/(mol·K) × (tanpa satuan) = J/K ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENTROPI-GAS-MEMUAI

Apa yang membuat entropi besar?

- **Wujud.** Gas jauh lebih besar daripada cair, dan cair sedikit lebih besar daripada padat: $S_{\text{gas}} \gg S_{\text{cair}} > S_{\text{padat}}$. Molekul gas bebas berkeliaran di ruang yang luas.
- **Suhu.** Makin panas, makin banyak cara energi dapat dibagikan ke partikel, sehingga entropi naik.
- **Jumlah mol gas.** Reaksi yang menghasilkan lebih banyak molekul gas hampir selalu menaikkan entropi.
- **Ukuran dan kerumitan molekul.** Molekul besar dengan banyak atom punya lebih banyak cara bergetar dan berputar (bandingkan $\mathrm{CH_4}$ dengan $\mathrm{C_3H_8}$).
- **Pelarutan dan pencampuran.** Kristal yang larut menjadi ion-ion yang tersebar biasanya menaikkan entropi.

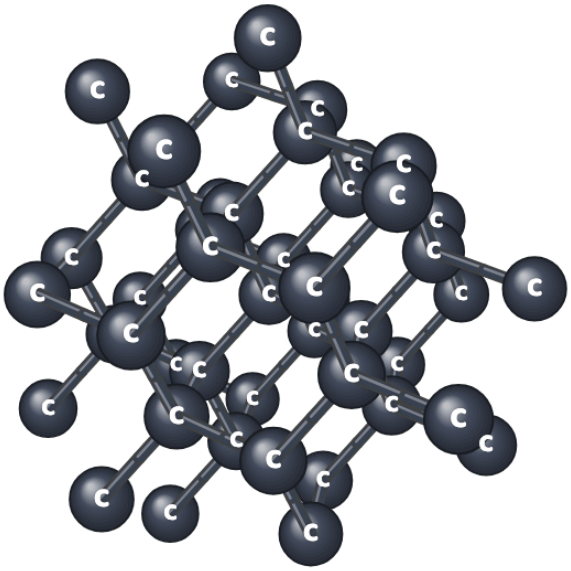
Padat	S° (J mol^{-1} K^{-1})	Cair	S°	Gas	S°
C (intan)	2,4	$\mathrm{H_2O\,(l)}$	69,9	$\mathrm{H_2}$	130,7
C (grafit)	5,7	$\mathrm{Hg\,(l)}$	76,0	$\mathrm{CH_4}$	186,3

MgO	26,9	$H_2O_2\,(l)$	109,6	$H_2O\,(g)$	188,8
Fe	27,3	$Br_2\,(l)$	152,2	N_2	191,6
CaO	39,7	$C_2H_5OH\,(l)$	160,7	NH_3	192,8
$H_2O\,(s)$, es pada 0 °C	±41			O_2	205,2
$NaCl$	72,1			CO_2	213,8
$CaCO_3$	92,9			$Br_2\,(g)$	245,5
$C_6H_{12}O_6$ (glukosa)	212,1			C_3H_8 (propana)	270,3

Entropi molar standar S° pada 298 K dan 1 bar. Bandingkan brom cair (152,2) dengan uap brom (245,5): zat yang sama, wujud berbeda, entropi melonjak.

MOLEKUL 3D

Intan atau grafit: mana yang lebih leluasa bergoyang?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Intan (kisi kovalen raksasa) C

Setiap atom C berikatan kovalen dengan 4 atom C lain secara tetrahedral. Jaringan 3D ini membuat intan sangat keras.

Keduanya hanya berisi atom karbon. Putar intan: setiap atom C terkunci kaku oleh 4 ikatan ke segala arah. Putar grafit: lapisan-lapisannya hanya ditahan gaya lemah dan bisa bergeser serta bergetar lebih leluasa. Itulah sebabnya S° grafit (5,7) lebih besar daripada intan (2,4).

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Entropi standar unsur bebas **tidak nol**! Untuk entalpi, ΔH_f° unsur bebas memang ditetapkan nol (Bab 19), tetapi entropi adalah nilai mutlak: S° gas O_2 = 205,2 J mol^{-1} K^{-1}. Hanya kristal sempurna pada 0 K yang entropinya nol (hukum III termodinamika). Jangan lupa memasukkan S° unsur saat menghitung ΔS° reaksi.

Karena entropi adalah nilai mutlak, perubahan entropi reaksi standar dihitung langsung dari tabel:

$$\Delta S^\circ_{\text{reaksi}} = \sum n\, S^\circ(\text{produk}) - \sum n\, S^\circ(\text{pereaksi})$$

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

"Hitung gas dulu!" Sebelum membuka tabel, hitung perubahan jumlah mol gas, Δn_{gas}. Entropi gas (130–280 J mol^{-1} K^{-1}) jauh lebih besar daripada padatan dan cairan, jadi tanda Δn_{gas} hampir selalu menebak tanda ΔS dengan benar. Gas bertambah → ΔS positif; gas berkurang → ΔS negatif. Pakai tebakan ini untuk mengecek hasil hitunganmu.

CONTOH **Menebak tanda ΔS**

Tebak tanda ΔS setiap proses: (a) $\mathrm{H_2O\,(l)} \longrightarrow \mathrm{H_2O\,(g)}$; (b) $\mathrm{N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g)} \longrightarrow \mathrm{2\,NH_3\,(g)}$; (c) $\mathrm{CaCO_3\,(s)} \longrightarrow \mathrm{CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$; (d) $\mathrm{NaCl\,(s)} \longrightarrow \mathrm{Na^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)}$.

1. (a) Cair menjadi gas: partikel jauh lebih bebas → ΔS **positif**.
2. (b) 4 mol gas menjadi 2 mol gas: $\Delta n_{\text{gas}} = -2$ → ΔS **negatif**.
3. (c) Dari padatan saja terbentuk 1 mol gas: $\Delta n_{\text{gas}} = +1$ → ΔS **positif**.
4. (d) Kristal teratur pecah menjadi ion-ion yang tersebar dalam air → ΔS **positif**.

(a) +, (b) –, (c) +, (d) +. Tebakan cepat ini akan kita uji dengan angka pada contoh berikutnya.

KERJAKAN BERSAMA **ΔS° reaksi Haber**

Hitung ΔS° untuk $\mathrm{N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g) \longrightarrow 2\,NH_3\,(g)}$ memakai tabel di atas.

1. Produk: $2 \times S^\circ(\mathrm{NH_3}) = 2 \times 192{,}8 = 385{,}6$ J/K.
2. Pereaksi: $S^\circ(\mathrm{N_2}) + 3 \times S^\circ(\mathrm{H_2}) = 191{,}6 + 3 \times 130{,}7 = 583{,}7$ J/K.
3. $\Delta S^\circ = 385{,}6 - 583{,}7 = -198{,}1$ J/K.

$\Delta S^\circ = -198{,}1$ **J/K (per mol reaksi seperti tertulis). Tanda negatif cocok dengan tebakan "4 mol gas → 2 mol gas" ✔**

20.3 Hukum II termodinamika: hakim sejati adalah semesta

Tebak Dulu!

Air yang membeku menjadi es justru makin teratur: entropinya *turun*. Mengapa air tetap bisa membeku dengan sendirinya di dalam freezer?

- Tidak mungkin; freezer melanggar hukum alam selama listriknya menyala.
- Karena membeku adalah perubahan fisika, sehingga entropi tidak berlaku.
- Karena di dalam freezer tidak ada entropi sama sekali.
- Karena kalor yang dilepas air menaikkan entropi lingkungan lebih banyak daripada penurunan entropi air itu sendiri.

Jawabannya: entropi lingkungan naik lebih banyak. Saat membeku, air melepas kalor ke udara freezer yang dingin. Kalor itu membuat partikel lingkungan bergerak lebih acak. Yang harus naik bukan entropi air saja, tetapi entropi **semesta** (sistem + lingkungan).

Sejauh ini kita hanya melihat sistem (zat yang bereaksi). Padahal, sistem selalu bertukar kalor dengan **lingkungan**. Kalor yang dilepas sistem membuat partikel-partikel lingkungan bergerak lebih kencang dan lebih acak, sehingga entropi lingkungan naik. Pada tekanan tetap, kalor itu sama dengan $-\Delta H_{\text{sistem}}$:

$$\Delta S_{\text{lingkungan}} = -\frac{\Delta H_{\text{sistem}}}{T}$$

TRIK KAK TIRTA

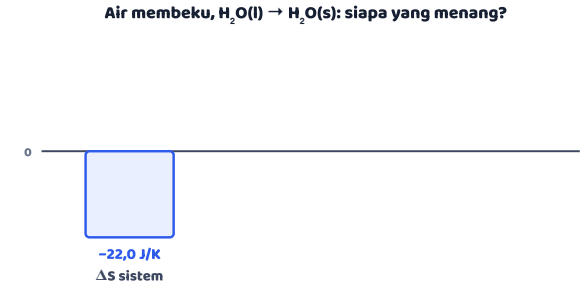
Mengapa dibagi T? Bayangkan kamu bersin. Di perpustakaan yang sunyi, bersinmu membuat heboh. Di pasar yang sudah riuh, bersin yang sama hampir tidak terasa. Kalor yang sama juga "lebih terasa" bagi lingkungan yang dingin (T kecil) daripada bagi lingkungan yang panas (T besar).

HUKUM II TERMODINAMIKA

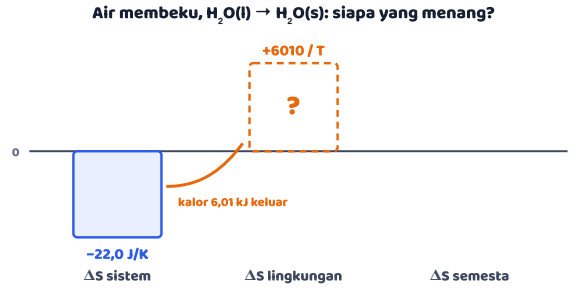
Pada setiap proses spontan, entropi total semesta bertambah:

$$\Delta S_{\text{semesta}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{lingkungan}} > 0$$

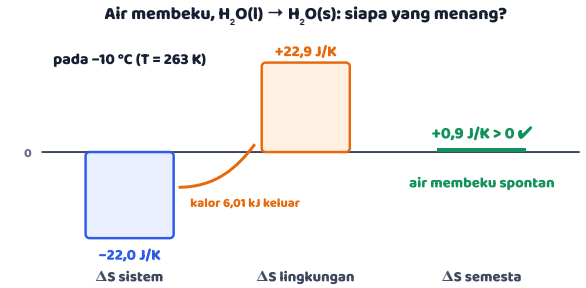
Bila $\Delta S_{\text{semesta}} = 0$, sistem berada dalam **kesetimbangan**. Proses dengan $\Delta S_{\text{semesta}} < 0$ tidak terjadi dengan sendirinya; kebalikannyalah yang spontan.



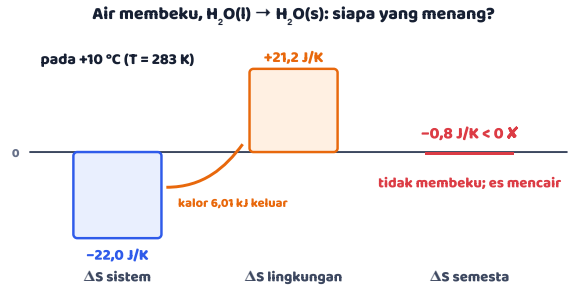
Langkah 1. Sistem: air yang membeku. Molekul air terkunci dalam kisi es yang teratur, sehingga entropi sistem **turun**: $\Delta S_{\text{sistem}} \approx -22{,}0$ J/K per mol.



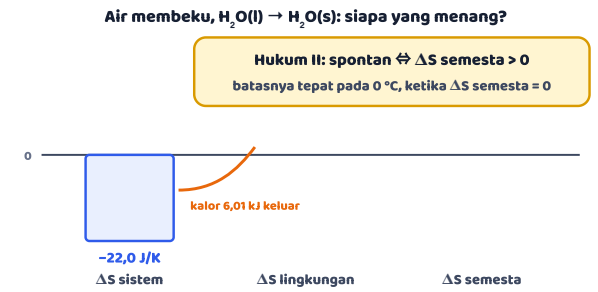
Langkah 2. Saat membeku, air melepas kalor 6,01 kJ/mol ke lingkungan. Kalor itu mengacak partikel lingkungan: $\Delta S_{\text{lingkungan}} = -\Delta H/T = +6010/T$. Besarnya bergantung pada suhu!



Langkah 3. Pada −10 °C (263 K): $\Delta S_{\text{lingkungan}} = 6010/263 = +22{,}9$ J/K, sedikit lebih besar daripada penurunan entropi air. $\Delta S_{\text{semesta}} = +0{,}9$ J/K > 0, jadi air membeku spontan.



Langkah 4. Pada +10 °C (283 K): kalor yang sama "kurang terasa" bagi lingkungan yang lebih hangat: $6010/283 = +21{,}2$ J/K. $\Delta S_{\text{semesta}} = -0{,}8$ J/K < 0. Air tidak membeku; justru es yang mencair.



Langkah 5. Kesimpulan: proses berlangsung spontan bila entropi semesta naik. Pada 0 °C (273 K), $6010/273 \approx 22{,}0$ sehingga $\Delta S_{\text{semesta}} = 0$: es dan air setimbang. (Kita menganggap ΔH dan ΔS hampir tetap pada rentang suhu ini.)

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Hukum II **tidak** mengatakan entropi setiap benda selalu naik. Entropi sebuah sistem boleh turun: air membeku, kristal garam tumbuh rapi di tambak garam Madura, dan tubuhmu menyusun protein yang sangat teratur. Syaratnya, entropi lingkungan harus naik lebih banyak. Di tambak garam, air laut yang menguap ke udara menyumbang entropi jauh lebih besar daripada keteraturan kristal garamnya. Yang selalu naik pada proses spontan adalah entropi **semesta**.

HUKUM III TERMODINAMIKA

Entropi kristal sempurna pada suhu nol mutlak (0 K) adalah nol, sebab hanya ada satu susunan ($W = 1$, $\ln 1 = 0$). Dengan titik nol ini, kimiawan bisa mengukur entropi mutlak setiap zat dengan memanaskannya perlahan dari dekat 0 K sambil mencatat kalor yang diserap. Hasilnya adalah tabel S° di subbab 20.2.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1865, fisikawan Jerman **Rudolf Clausius** memberi nama "entropi" (dari bahasa Yunani *tropē*, perubahan) dan merumuskan bahwa entropi semesta cenderung naik. Satu dekade kemudian, **Ludwig Boltzmann** dari Austria menjelaskan entropi sebagai banyaknya susunan partikel. Gagasannya sempat ditentang karena banyak ilmuwan saat itu belum percaya pada atom. Kini rumus $S = k \log W$ terpahat di batu nisannya di Wina. Di Amerika, **Josiah Willard Gibbs** dari Universitas Yale menerbitkan karya panjang tentang kesetimbangan zat (1875–1878) yang melahirkan besaran energi bebas, yang kini memakai namanya.

MITOS

"Reaksi spontan pasti berlangsung cepat."

FAKTA

Spontan hanya soal **arah**. Intan menjadi grafit dan kertas bereaksi dengan oksigen adalah proses spontan, tetapi sangat lambat pada suhu kamar karena energi aktivasinya besar (Bab 21).

MITOS

"Entropi selalu naik di mana pun dan kapan pun."

FAKTA

Entropi sistem boleh turun (air membeku, makhluk hidup tumbuh teratur, kulkas mendinginkan), asalkan entropi lingkungan naik lebih banyak. Yang selalu naik adalah entropi **semesta**.

MITOS

"Reaksi eksoterm pasti spontan; reaksi endoterm tidak pernah spontan."

FAKTA

Es mencair dan garam larut adalah proses endoterm yang spontan. Air membeku pada 10 °C adalah eksoterm, tetapi tidak terjadi. Yang menentukan adalah ΔG, gabungan ΔH dan $T\Delta S$.

20.4 Energi bebas Gibbs: satu angka penentu arah

Menghitung entropi lingkungan setiap kali tentu merepotkan. Josiah Willard Gibbs menemukan jalan pintas: gabungkan kedua hakim, entalpi dan entropi, menjadi satu besaran yang hanya menyangkut **sistem**. Besaran itu adalah **energi bebas Gibbs**, G.

Bahasa sederhana · Bayangkan dua hakim dalam lomba. Hakim pertama, **ΔH**, menyukai proses yang melepas kalor. Hakim kedua, **TΔS**, menyukai proses yang membuat partikel lebih bebas, dan suaranya makin keras ketika suhu makin tinggi. Keputusan akhir dihitung dengan ΔG. Kalau ΔG negatif, proses jalan sendiri.

$$\Delta G = \Delta H - T\,\Delta S$$

Mengapa begitu? Dari hukum II ke ΔG

Mulai dari hukum II pada suhu dan tekanan tetap: $\Delta S_{\text{semesta}} = \Delta S - \dfrac{\Delta H}{T}$, dengan ΔS dan ΔH milik sistem.

Kalikan kedua ruas dengan $-T$: $-T\Delta S_{\text{semesta}} = \Delta H - T\Delta S$.

Ruas kanan inilah yang didefinisikan sebagai ΔG. Jadi $\Delta G = -T\Delta S_{\text{semesta}}$. Karena T selalu positif, $\Delta S_{\text{semesta}} > 0$ sama artinya dengan $\Delta G < 0$. Satu angka milik sistem cukup untuk mengetahui keputusan seluruh semesta!

KRITERIA SPONTANITAS (SUHU DAN TEKANAN TETAP)

- $\Delta G < 0$: proses **spontan** ke arah yang tertulis.
- $\Delta G = 0$: sistem dalam **kesetimbangan**; tidak ada arah yang lebih disukai.
- $\Delta G > 0$: proses **tidak spontan**; kebalikannya yang spontan.

Nilai $-\Delta G$ juga menyatakan kerja berguna maksimum (selain kerja pemuaian) yang dapat diperoleh dari proses itu. Karena itulah G disebut energi "bebas": energi yang bebas dipakai untuk bekerja.

RUMUS HIDUP

Energi bebas Gibbs

$$\Delta G = \Delta H - T\,\Delta S$$

Perubahan energi bebas sama dengan perubahan entalpi dikurangi suhu mutlak kali perubahan entropi. Hasil negatif berarti proses spontan.

- ΔH Perubahan entalpi `kJ/mol`
- ΔS Perubahan entropi `J/(mol·K)`
- T Suhu mutlak `K`
- ΔG Perubahan energi bebas `kJ/mol`

PERUBAHAN ENERGI BEBAS

-0,55

kJ/mol

ΔH +, ΔS +: spontan pada suhu tinggi **es mencair**

Pada **298** K: ΔG = **6,01** − **298** × (**22** ÷ 1000) = **-0,55** kJ/mol → **SPONTAN**.

Cek satuan: kJ/mol − K × J/(mol·K) ÷ 1000 = kJ/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENERGI-BEBAS-GIBBS

AWAS JEBAKAN

Satuan! ΔH biasanya dalam **kJ**/mol, sedangkan ΔS dalam **J**/(mol·K). Ubah ΔS ke kJ dengan membaginya 1000 sebelum mengalikan dengan T. Lupa membagi 1000 adalah kesalahan paling umum di bab ini: hasilnya meleset seribu kali lipat. Pastikan juga T dalam kelvin, bukan derajat Celsius.

CONTOH **Kapan es mencair?**

Untuk $\mathrm{H_2O\,(s)} \longrightarrow \mathrm{H_2O\,(l)}$, $\Delta H = +6{,}01$ kJ/mol dan $\Delta S = +22{,}0$ J/(mol·K). Hitung ΔG pada 25 °C dan pada –10 °C.

1. Ubah satuan: $\Delta S = +22{,}0$ J/(mol·K) $= +0{,}0220$ kJ/(mol·K).
2. Pada 25 °C, $T = 298$ K: $\Delta G = 6{,}01 - 298 \times 0{,}0220 = 6{,}01 - 6{,}56 = -0{,}55$ kJ/mol.
3. Pada –10 °C, $T = 263$ K: $\Delta G = 6{,}01 - 263 \times 0{,}0220 = 6{,}01 - 5{,}79 = +0{,}22$ kJ/mol.

Pada 25 °C, $\Delta G < 0$: es mencair spontan. Pada –10 °C, $\Delta G > 0$: es tidak mencair; justru air yang membeku spontan. Hasil ini cocok dengan neraca entropi pada subbab 20.3.

Karena T selalu positif, tanda ΔG ditentukan oleh tanda ΔH dan ΔS. Ada empat kemungkinan:

ΔH	ΔS	$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$	**Spontan?**	**Contoh**
– (eksoterm)	+	selalu negatif	**pada semua suhu**	$2\,\mathrm{H_2O_2\,(l)} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2O\,(l)} + \mathrm{O_2\,(g)}$; fermentasi tapai: glukosa → etanol + $\mathrm{CO_2}$
+ (endoterm)	–	selalu positif	**tidak pernah** (kebalikannya yang spontan)	$3\,\mathrm{O_2\,(g)} \longrightarrow 2\,\mathrm{O_3\,(g)}$; fotosintesis, yang harus "didorong" energi cahaya
– (eksoterm)	–	negatif bila T kecil	**di bawah** suhu peralihan	air membeku, uap mengembun menjadi embun pagi, pembuatan amonia
+ (endoterm)	+	negatif bila T besar	**di atas** suhu peralihan	es mencair, air mendidih, $\mathrm{CaCO_3}$ terurai di tungku kapur

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

Ingat rumusnya seperti gaji bulanan: **G**aji = **H**onor – **T**agihan **S**ewa, yaitu $G = H - TS$. Untuk empat kuadran, ingat satu kalimat: "**tanda beda, nasib pasti; tanda sama, tunggu suhu**". Jika ΔH dan ΔS bertanda berbeda, hasilnya pasti (selalu atau tidak pernah spontan). Jika tandanya sama, suhulah yang menentukan.

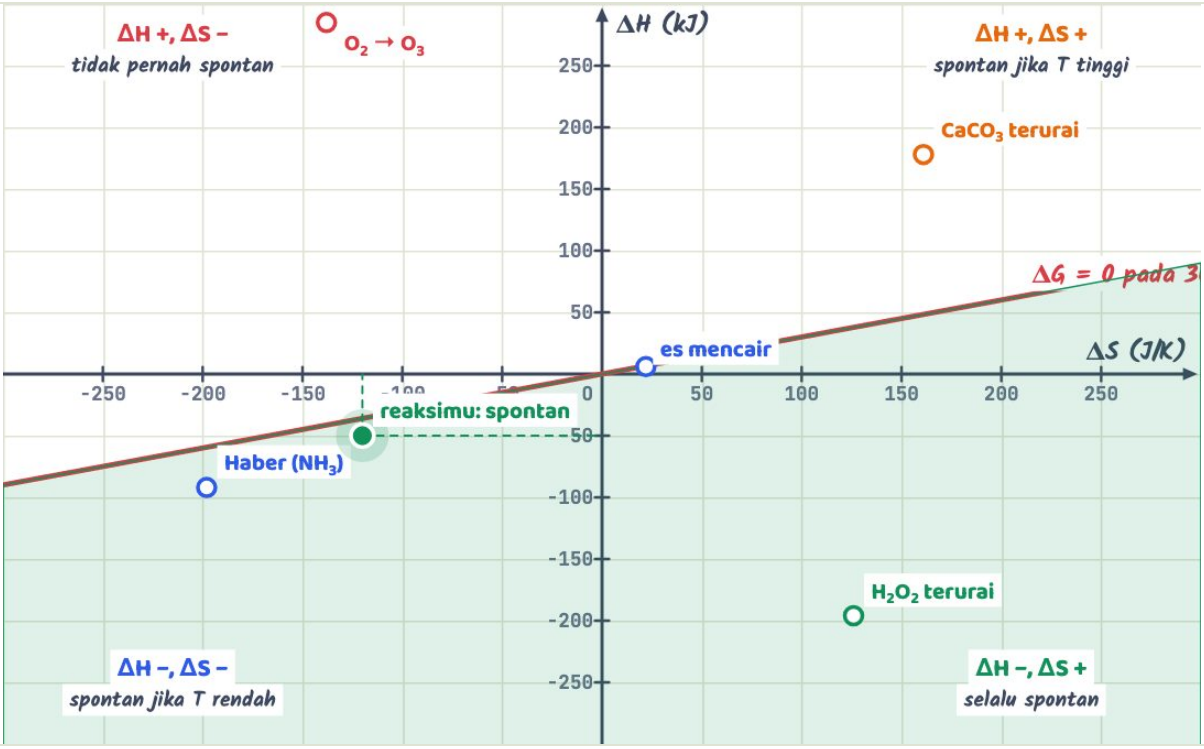
GRAFIK HIDUP

Peta empat kuadran ΔH–ΔS

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-20

$$\Delta G < 0 \iff \Delta H < T\,\Delta S$$

$$\Delta G = -14\ \text{kJ}\ \ (T = 300\ \text{K})$$



✔ titikmu di daerah hijau: spontan pada 300 K

ΔG pada suhu ini	T peralihan	Kuadran
-14 kJ	417 K	spontan di bawah T peralihan

Daerah hijau adalah semua pasangan $(\Delta S, \Delta H)$ yang spontan pada suhu T; batasnya garis merah $\Delta H = T\Delta S$. Seret titik "reaksimu", lalu geser suhu. Perhatikan garis merah **berputar**: makin panas, makin curam garisnya, sehingga reaksi di kuadran kanan atas (seperti $\mathrm{CaCO_3}$ terurai) masuk ke daerah hijau. Kuadran kanan bawah selalu hijau, kuadran kiri atas tidak pernah.

KERJAKAN BERSAMA **Pabrik amonia: dingin atau panas?**

Untuk $\mathrm{N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g) \longrightarrow 2\,NH_3\,(g)}$, $\Delta H^\circ = -92{,}2$ kJ dan $\Delta S^\circ = -198{,}1$ J/K. Hitung ΔG° pada 298 K dan pada 700 K (suhu pabrik pupuk). Di bawah suhu berapa reaksi ini spontan pada keadaan standar?

1. $\Delta S^\circ = -0{,}1981$ kJ/K. Pada 298 K: $\Delta G^\circ = -92{,}2 - 298(-0{,}1981) = -92{,}2 + 59{,}0 = -33{,}2$ kJ → spontan.
2. Pada 700 K: $\Delta G^\circ = -92{,}2 - 700(-0{,}1981) = -92{,}2 + 138{,}7 = +46{,}5$ kJ → tidak spontan pada keadaan standar.
3. Suhu peralihan: $T = \dfrac{\Delta H}{\Delta S} = \dfrac{-92{,}2}{-0{,}1981} = 465$ K (±192 °C). Reaksi spontan di bawah suhu ini.

Termodinamika "menyukai" suhu rendah, tetapi pada suhu rendah reaksinya terlalu lambat. Pabrik pupuk di Bontang, Gresik, dan Palembang memilih jalan tengah: sekitar 400–450 °C dengan katalis besi, ditambah tekanan sangat tinggi yang menggeser kesetimbangan ke arah amonia (Bab 22). Kimia industri adalah seni berkompromi!

ADU CEPAT **Hitung ΔG**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-20

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Bagi ΔS dengan 1000 dulu! Contoh: −92 − 500 × (−0,200) = +8 kJ/mol.

20.5 Suhu peralihan: kapan es mencair dan kapur terurai?

Bila ΔH dan ΔS bertanda sama, ada satu suhu istimewa ketika kedua hakim seri: $\Delta H = T\Delta S$, sehingga $\Delta G = 0$. Suhu ini disebut **suhu peralihan**. Di satu sisinya proses spontan, di sisi lain tidak.

$$\Delta G = 0 \;\Rightarrow\; T_{\text{peralihan}} = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

RUMUS HIDUP **Suhu peralihan**

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

Suhu ketika ΔG tepat nol: di sini hakim entalpi dan hakim entropi seimbang.

ΔH Perubahan entalpi `kJ/mol` · ΔS Perubahan entropi `J/(mol·K)` · T Suhu peralihan `K`

SUHU PERALIHAN

1.106

K

rentang tungku kapur

T = 1000 × **178** ÷ **161** = **1.106** K, atau **832,44** °C.

Satuan Nusantara: ≈ 85% dari lava Merapi (±) · ≈ 3 × air mendidih · ≈ 3,6 × suhu tubuh

Cek satuan: (kJ/mol × 1000) ÷ J/(mol·K) = K ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-SUHU-PERALIHAN

Coba hitung untuk es: $T = 6010/22{,}0 = 273$ K = 0 °C. Untuk air mendidih ($\Delta H = 40{,}7$ kJ/mol, $\Delta S = 109$ J mol^{-1} K^{-1}): $T = 40.700/109 = 373$ K = 100 °C. **Titik leleh dan titik didih adalah suhu peralihan!** Pada suhu itu kedua wujud setimbang.

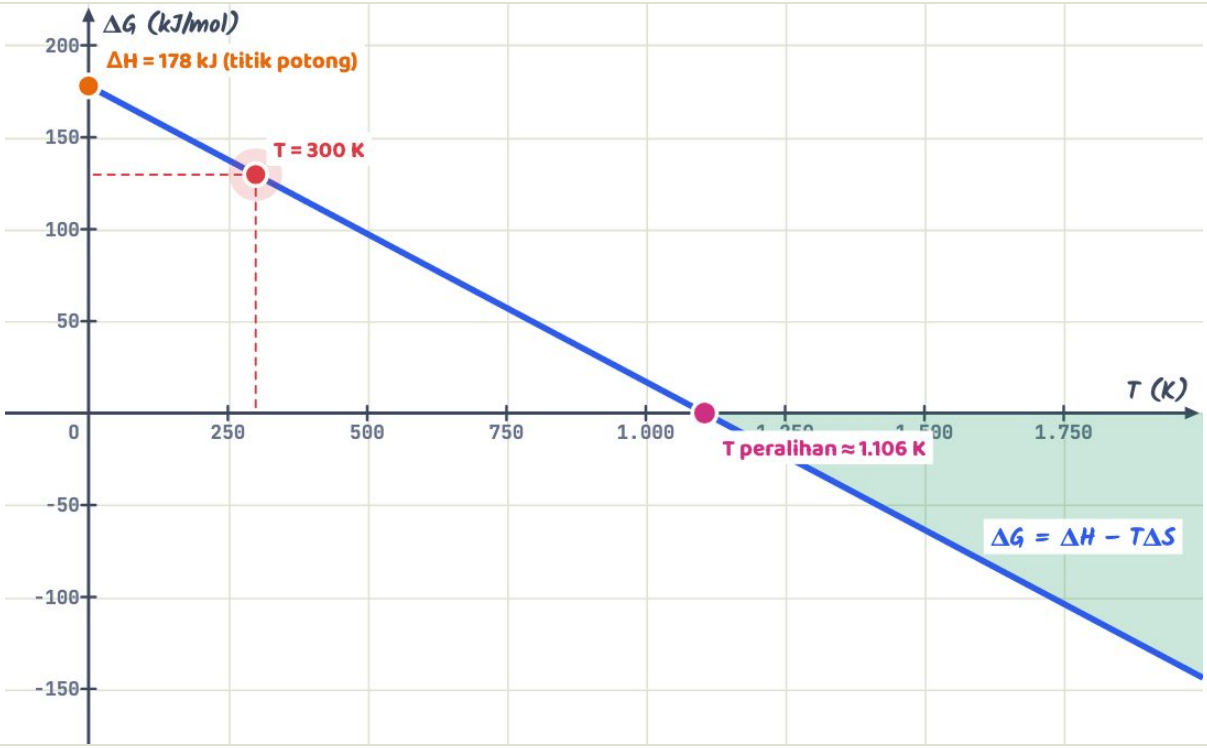
GRAFIK HIDUP

ΔG terhadap suhu: garis lurus bermiring −ΔS

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-20

$$\Delta G(T) = \Delta H - T\,\Delta S$$

$$\Delta G = 129{,}7\ \text{kJ/mol}\ \ (T = 300\ \text{K})$$



ΔG > 0: tidak spontan

batu kapur: T peralihan ≈ 1.106 K

ΔG pada T	T peralihan	kemiringan = −ΔS
129,7 kJ/mol	1.106 K	-0,161 kJ/(mol·K)

Garis biru memotong sumbu tegak di ΔH dan kemiringannya $-\Delta S$. Daerah hijau menandai suhu-suhu ketika $\Delta G < 0$. Seret titik merah untuk mengubah suhu. Coba masukkan es ($\Delta H = 6$, $\Delta S = 22$), lalu reaksi Haber ($\Delta H = -92$, $\Delta S = -198$): garisnya kini **naik**, dan daerah hijau pindah ke suhu rendah.

ID

KIMIA NUSANTARA · TUNGKU KAPUR PADALARANG DAN GUNUNG KIDUL

Di perbukitan kapur Citatah, Padalarang, dan di kawasan karst Gunung Kidul, perajin membakar batu gamping ($\mathrm{CaCO_3}$) dalam tungku berbahan bakar kayu atau batu bara selama berhari-hari. Reaksinya $\mathrm{CaCO_3\,(s) \longrightarrow CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$ bersifat endoterm ($\Delta H = +178$ kJ/mol), tetapi menghasilkan gas sehingga $\Delta S = +161$ J mol^{-1} K^{-1}. Hasilnya, kapur tohor (CaO), disiram air menjadi kapur padam $\mathrm{Ca(OH)_2}$ untuk melabur dinding, campuran adukan bangunan, menjernihkan air, menetralkan tanah sawah yang masam, dan kapur sirih untuk menginang. Batu gamping di bukit-bukit karst tetap utuh selama jutaan tahun karena pada suhu udara ΔG penguraiannya sangat positif.

COBA SENDIRI **Berapa panas tungku kapur?**

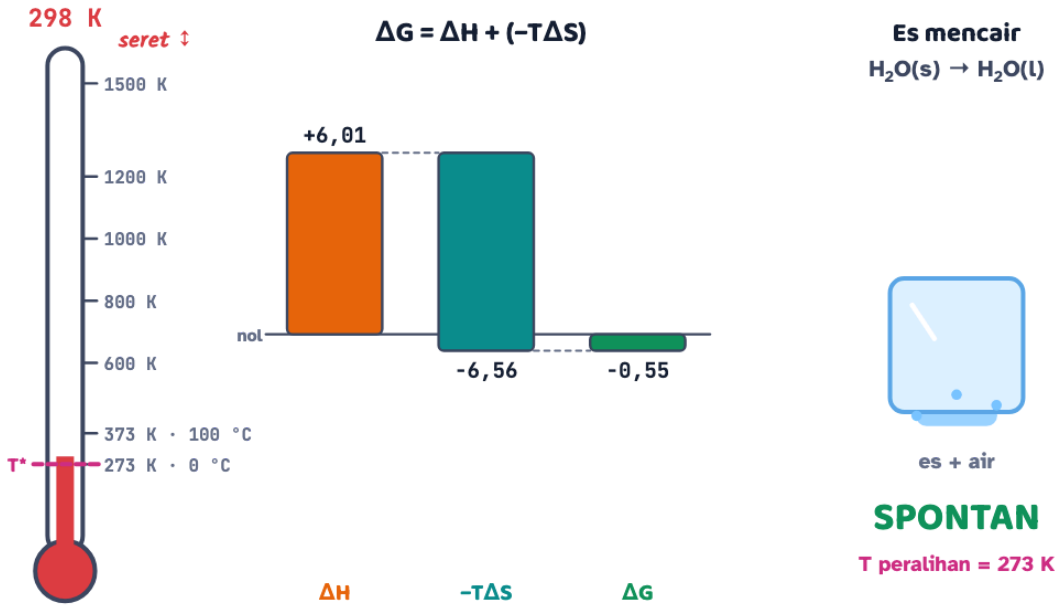
Data: ΔH_f° (kJ/mol): $\mathrm{CaCO_3}$ −1206,9; CaO −635,1; $\mathrm{CO_2}$ −393,5. S° (J mol^{-1} K^{-1}): $\mathrm{CaCO_3}$ 92,9; CaO 39,7; $\mathrm{CO_2}$ 213,8. Tentukan suhu minimum agar $\mathrm{CaCO_3\,(s) \longrightarrow CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$ spontan pada keadaan standar.

1. $\Delta H^\circ = [-635{,}1 + (-393{,}5)] - (-1206{,}9) = +178{,}3$ kJ (cara Bab 19).
2. $\Delta S^\circ = (39{,}7 + 213{,}8) - 92{,}9 = +160{,}6$ J/K $= +0{,}1606$ kJ/K.
3. Kuadran "+, +": spontan di atas suhu peralihan. $T = \dfrac{178{,}3}{0{,}1606} = 1110$ K.
4. Ubah ke Celsius: $1110 - 273 = 837$ °C. Cek: pada 298 K, $\Delta G^\circ = 178{,}3 - 298(0{,}1606) = +130{,}4$ kJ, sangat positif ✔

Batu kapur baru terurai spontan di atas ±1.110 K (±840 °C). Hitungan ini menganggap ΔH dan ΔS tetap; data percobaan menunjukkan tekanan $\mathrm{CO_2}$ mencapai 1 atm sekitar 900 °C. Tungku kapur biasanya bekerja pada 900–1.000 °C agar bongkahan batu terurai cukup cepat sampai ke bagian dalamnya.

LAB MINI Termometer Gibbs: geser suhunya, lihat siapa yang menang

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-20



suhu	ΔH	TΔS	ΔG = ΔH − TΔS	T peralihan
25 °C	6,01 kJ/mol	6,56 kJ/mol	-0,55 kJ/mol	273 K (0 °C)

Arah
spontan ke kanan

Pilih sebuah proses, lalu **seret termometer** (atau geser slider suhu). Batang oranye adalah ΔH, batang toska adalah $-T\Delta S$, dan jumlah keduanya adalah ΔG. Amati es di 263 K dan 298 K, batu kapur di 298 K dan 1.200 K, serta reaksi Haber di 300 K dan 700 K. Proses mana yang tidak pernah berubah keputusannya, berapa pun suhunya? (Model ini menganggap ΔH dan ΔS tidak bergantung suhu.)

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA KARBON BISA MEREBUT OKSIGEN DARI BIJIH TIMAH BANGKA?

Bijih timah dari Bangka-Belitung berupa kasiterit, $\mathrm{SnO_2}$. Di tanur peleburan, bijih dipanaskan bersama karbon: $\mathrm{SnO_2\,(s) + 2\,C\,(s) \longrightarrow Sn\,(s) + 2\,CO\,(g)}$. Reaksi ini sangat endoterm, tetapi menghasilkan 2 mol gas dari padatan saja.

- $\Delta H^\circ = 2(-110{,}5) - (-580{,}7) = +359{,}7$ kJ
- $\Delta S^\circ = [51{,}2 + 2(197{,}7)] - [49{,}0 + 2(5{,}7)] = +386{,}2$ J/K (data S°: Sn 51,2; CO 197,7; $\mathrm{SnO_2}$ 49,0; C 5,7)
- $T_{\text{peralihan}} = 359{,}7 / 0{,}3862 \approx 931$ K (±660 °C)

Di atas sekitar 930 K, suku $T\Delta S$ mengalahkan ΔH, sehingga karbon "menang" merebut oksigen. Tanur peleburan bekerja jauh di atas suhu itu (lebih dari 1.100 °C) supaya reaksinya cepat dan timah keluar dalam keadaan cair. Grafik ΔG° terhadap T untuk pembentukan berbagai oksida logam disebut **diagram Ellingham**; para metalurg memakainya untuk memilih suhu dan zat pereduksi.

Aturan Trouton: untuk banyak cairan, $\Delta S_{\text{penguapan}} \approx 85$–$88$ J mol^{-1} K^{-1} pada titik didihnya, karena kenaikan "kebebasan" dari cair ke gas kira-kira sama. Air menyimpang (109 J mol^{-1} K^{-1}) karena ikatan hidrogen membuat air cair lebih teratur daripada cairan biasa (Bab 13).

20.6 Lanjut: ΔG°, tetapan kesetimbangan, dan potensial sel

Tanda bulat ° pada ΔG° berarti **keadaan standar**: setiap gas bertekanan 1 bar dan setiap zat terlarut berkonsentrasi 1 mol/L. Dalam campuran nyata, komposisi terus berubah selama reaksi, sehingga ΔG pun berubah. Reaksi berjalan ke arah $\Delta G < 0$ sampai akhirnya $\Delta G = 0$: saat itulah tercapai **kesetimbangan** (Bab 22).

Hubungan antara ΔG dan komposisi campuran dinyatakan oleh $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q$, dengan Q hasil bagi reaksi. Pada kesetimbangan $\Delta G = 0$ dan $Q = K$, sehingga diperoleh hubungan yang sangat penting:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \qquad \Longleftrightarrow \qquad K = e^{-\Delta G^\circ / RT}$$

ΔG° (kJ/mol) pada 298 K	K	Artinya saat setimbang
−100	3×10^{17}	hampir seluruhnya produk
−10	57	produk lebih banyak
0	1	seimbang
+10	$1{,}8 \times 10^{-2}$	pereaksi lebih banyak
+100	3×10^{-18}	hampir tidak bereaksi

RUMUS HIDUP

Tetapan kesetimbangan dari ΔG°

$$K = e^{-\Delta G^\circ/(RT)}$$

Makin negatif ΔG°, makin besar K: produk makin disukai ketika kesetimbangan tercapai.

- ΔG° Energi bebas standar kJ/mol
- T Suhu K
- K Tetapan kesetimbangan

TETAPAN KESETIMBANGAN

608.950,234

ΔG° < 0 → K > 1 · **Haber pada 25 °C: K ≈ 6 × 10⁵**

K = e^(–(**-33** × 1000) ÷ (8,314 × **298**)) = **608.950,234** → **produk sangat disukai.**

Cek satuan: (J/mol) ÷ (J/(mol·K) × K) = tanpa satuan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-K-DARI-GIBBS

COBA SENDIRI

K reaksi Haber pada 25 °C

Dengan $\Delta G^\circ = -33{,}0$ kJ/mol untuk $\mathrm{N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,NH_3\,(g)}$ pada 298 K, hitung K. ($R = 8{,}314$ J mol⁻¹ K⁻¹)

1. Ubah satuan: $\Delta G^\circ = -33.000$ J/mol.
2. $\ln K = -\dfrac{\Delta G^\circ}{RT} = \dfrac{33.000}{8{,}314 \times 298} = 13{,}32.$
3. $K = e^{13{,}32} \approx 6{,}1 \times 10^5.$

$K \approx 6 \times 10^5$: pada suhu kamar, kesetimbangan sangat condong ke amonia. Sayangnya reaksinya nyaris tidak berjalan pada suhu kamar tanpa katalis. Lagi-lagi: spontan belum tentu cepat!

Energi bebas juga terhubung dengan listrik. Dalam sel volta (Bab 30), n mol elektron yang didorong oleh beda potensial E° melakukan kerja listrik:

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ \qquad F = 96.485\ \text{C/mol}$$

Sel Daniell (Zn–Cu) dengan $E^\circ = 1{,}10$ V dan $n = 2$ memberi $\Delta G^\circ = -2 \times 96.485 \times 1{,}10 \approx -212.000$ J, yaitu sekitar −212 kJ. Potensial sel positif selalu berarti ΔG° negatif: baterai yang "hidup" adalah reaksi spontan yang energinya kita panen sebagai listrik.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

REAKSI KOPLING: CARA SEL HIDUP "MENDORONG" REAKSI YANG TIDAK SPONTAN

Tubuhmu terus membuat molekul yang lebih teratur daripada bahan bakunya. Misalnya, sel mengikatkan gugus fosfat pada glukosa sebagai langkah pertama mengolah gula: $\Delta G^{\circ\prime} \approx +13{,}8$ kJ/mol, tidak spontan. Sel lalu "memasangkan" reaksi ini dengan penguraian ATP menjadi ADP, yang $\Delta G^{\circ\prime} \approx -30{,}5$ kJ/mol.

Karena G adalah fungsi keadaan, ΔG reaksi yang dijumlahkan juga dijumlahkan (seperti hukum Hess di Bab 19): $+13{,}8 + (-30{,}5) = -16{,}7$ kJ/mol. Reaksi gabungannya spontan! Enzim memastikan kedua reaksi benar-benar terjadi bersamaan. Prinsip yang sama dipakai industri: reaksi yang "rugi" dipasangkan dengan reaksi yang sangat "untung", seperti peleburan timah di subbab 20.5 yang memanfaatkan pembentukan CO.

Kimia di sekitarmu

Es batu di warung

Kotak gabus hanya memperlambat aliran kalor; ia tidak mengubah arah. Pada 30 °C, $T\Delta S$ lebih besar daripada ΔH, sehingga es pasti mencair, cepat atau lambat.

Es puter dan garam kasar

Pedagang es puter mencampur es batu dengan garam kasar. Air asin punya entropi lebih besar, sehingga es "terdorong" mencair sambil menyerap kalor dari adonan, dan campuran bisa turun di bawah −10 °C.

Tapai singkong

Ragi mengubah glukosa menjadi etanol dan gas CO_2. Reaksinya eksoterm dan entropinya naik, jadi spontan pada semua suhu. Enzim ragi hanya mempercepatnya.

Fotosintesis di sawah

Membuat glukosa dari CO_2 dan air punya ΔH positif dan ΔS negatif: tidak pernah spontan. Padi "membayarnya" dengan energi cahaya matahari.

Tungku kapur

Batu gamping baru terurai spontan di atas ±840 °C. Karena itu bukit karst Gunung Sewu tetap berdiri, sementara tungku kapur harus menyala berhari-hari.

Kulkas dan freezer

Di dalam freezer, entropi air turun saat membeku. Kompresor membuang kalor yang lebih besar ke dapur (bagian belakang kulkas terasa hangat), sehingga entropi semesta tetap naik.

Cek Cepat

Proses dengan $\Delta H > 0$ dan $\Delta S > 0$ akan spontan pada ...

- suhu rendah saja
- suhu tinggi saja
- semua suhu
- tidak pernah

$\Delta H = -100$ kJ/mol, $\Delta S = +50$ J/(mol·K), $T = 300$ K. Berapa ΔG?

- −15.100 kJ/mol
- −85 kJ/mol
- +15 kJ/mol
- −115 kJ/mol

Proses manakah yang ΔS-nya negatif?

- Uap air mengembun menjadi embun pagi
- Gula larut dalam teh
- Batu kapur terurai di tungku
- Parfum menguap dari kulit

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: kancing rapi, kancing acak

Bahan: 6 kancing baju (3 merah dan 3 putih, atau tutup botol dua warna), 1 gelas plastik, 1 wadah telur berlubang 6 (atau 6 kotak yang digambar di kertas), pensil, dan kertas catatan.

1. Tandai 3 lubang di sisi kiri wadah telur sebagai "KIRI" dan 3 lubang di sisi kanan sebagai "KANAN".
2. Masukkan keenam kancing ke gelas, tutup dengan telapak tangan, lalu kocok.
3. Tanpa melihat, ambil kancing satu per satu dan isi lubang secara berurutan dari kiri ke kanan.
4. Catat berapa kancing merah yang berada di sisi KIRI (0, 1, 2, atau 3).
5. Ulangi 40 kali, lalu buat diagram batang hasilmu.

Keselamatan: kancing kecil mudah tertelan, jadi jauhkan dari adik balita dan jangan dimasukkan ke mulut. Bekerjalah di atas meja supaya kancing tidak tercecer ke lantai dan membuat orang terpeleset. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Ada $\binom{6}{3} = 20$ cara menempatkan 3 kancing merah di 6 lubang. Hanya 1 cara yang "rapi" (ketiga merah di kiri). Berapa kali susunan rapi muncul dari 40 percobaanmu? Cocokkah dengan perkiraan $40 \times \frac{1}{20} = 2$ kali? Bayangkan kamar dengan 100 barang!

RINGKASAN KILAT Bab 20 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan proses **spontan** dan tidak spontan, serta menjelaskan bahwa spontan tidak sama dengan cepat
- menjelaskan **entropi** sebagai ukuran banyaknya cara (mikrostate) melalui $S = k \ln W$, dan meramalkan tanda ΔS untuk perubahan wujud dan reaksi gas
- menghitung ΔS° reaksi dari data entropi standar dan menerapkan **hukum II termodinamika**
- menghitung **energi bebas Gibbs** $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ dengan satuan yang benar, membaca empat kombinasi tanda, dan menentukan **suhu peralihan**

- (Lanjut) menghubungkan ΔG° dengan tetapan kesetimbangan K dan potensial sel E°

🔑 Istilah kunci

spontan · tidak spontan · entropi · Makrostate · Mikrostate · tetapan Boltzmann · kesetimbangan · energi bebas Gibbs · suhu peralihan

🧮 Rumus penting

$$\Delta S = n\,R\,\ln\frac{V_2}{V_1}$$

Entropi gas yang memuai. Saat volume gas membesar, setiap partikel punya lebih banyak tempat, sehingga banyaknya cara W melonjak dan entropi naik.

$$\Delta G = \Delta H - T\,\Delta S$$

Energi bebas Gibbs. Perubahan energi bebas sama dengan perubahan entalpi dikurangi suhu mutlak kali perubahan entropi. Hasil negatif berarti proses spontan.

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

Suhu peralihan. Suhu ketika ΔG tepat nol: di sini hakim entalpi dan hakim entropi seimbang.

$$K = e^{-\Delta G^\circ/(RT)}$$

Tetapan kesetimbangan dari ΔG°. Makin negatif ΔG°, makin besar K: produk makin disukai ketika kesetimbangan tercapai.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Spontan tidak berarti cepat.
- Entropi standar unsur bebas tidak nol!
- Hukum II tidak mengatakan entropi setiap benda selalu naik.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=20

🧩 Teka-teki untuk Bab 21

Untuk perubahan intan menjadi grafit, $\Delta G^\circ \approx -2{,}9$ kJ/mol pada suhu kamar. Secara termodinamika, intan "ingin" berubah menjadi grafit. Lalu mengapa cincin intan nenekmu tidak berubah menjadi serbuk hitam seperti isi pensil?

▼ **Intip petunjuk**

Termodinamika hanya mengatakan *boleh*. Untuk berubah, setiap atom karbon intan harus memutus ikatan kovalen yang sangat kuat dulu. "Bukit" energi yang harus didaki, yaitu **energi aktivasi**, begitu tinggi sehingga pada suhu kamar perubahan itu butuh waktu jauh lebih lama daripada umur Bumi. Di Bab 21 kita belajar tentang laju reaksi: *seberapa cepat* sebuah proses spontan benar-benar terjadi.

BAB 21 · ENERGI, LAJU & KESETIMBANGAN

21 Laju Reaksi: Balapan Para Molekul

Kembang api meletus dalam sekejap, sedangkan paku butuh berminggu-minggu untuk berkarat. Pisang di dalam karung cepat menguning, tetapi sayur di kulkas tetap segar berhari-hari. Siapa yang mengatur kecepatan reaksi, dan bisakah kita memutar "kenop gas"-nya?

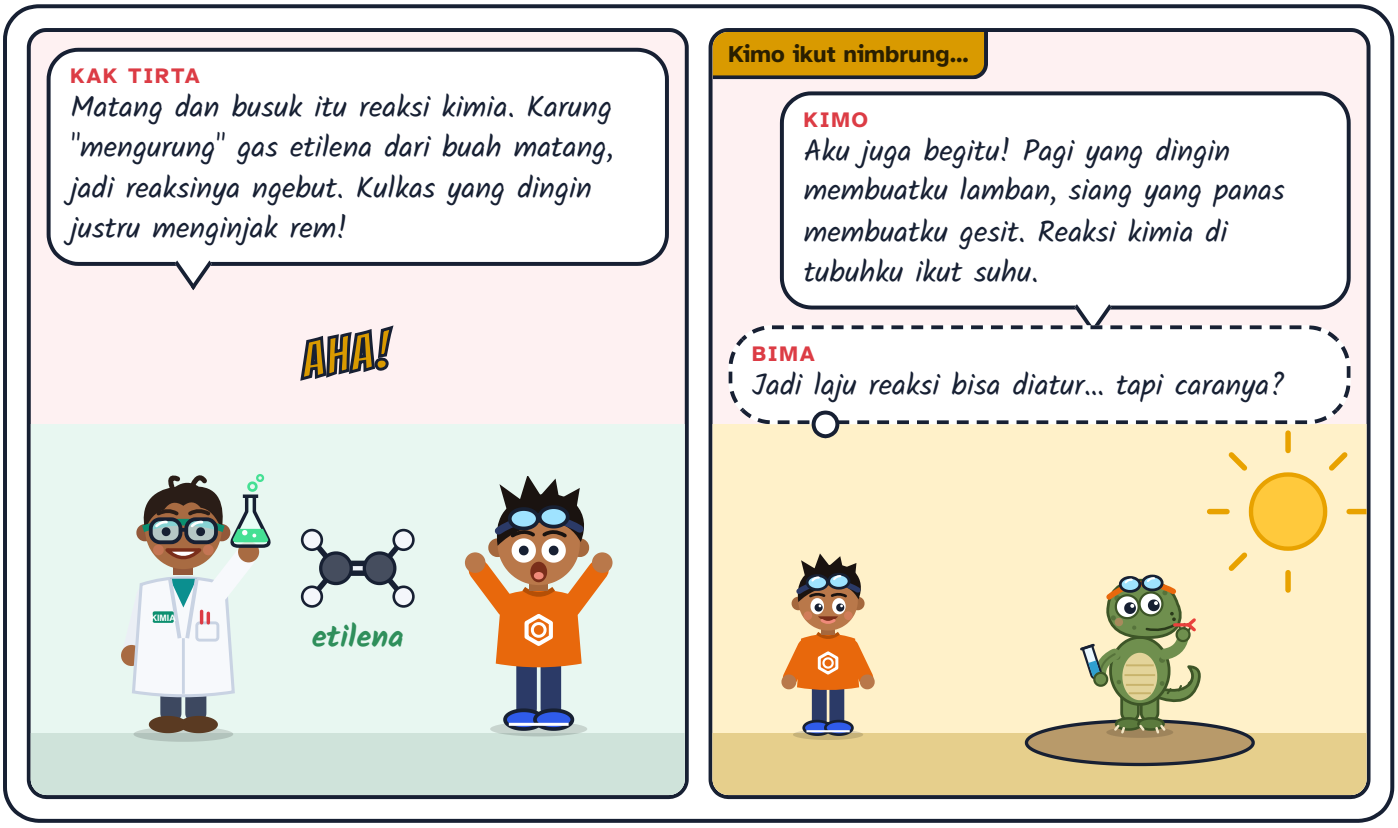
Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan arti **laju reaksi**, cara mengukurnya, serta membedakan laju rata-rata dan laju sesaat;
- memakai **teori tumbukan**, **energi aktivasi**, dan kurva **Maxwell–Boltzmann** untuk menjelaskan pengaruh konsentrasi, luas permukaan, suhu, dan katalis;
- menentukan **persamaan laju**, **orde reaksi**, dan satuan tetapan laju dari data laju awal;
- menghitung **waktu paruh** reaksi orde satu, misalnya sisa obat dalam darah;
- memakai **persamaan Arrhenius** dan menjelaskan **mekanisme reaksi**, tahap penentu laju, serta kerja **enzim**.

PISANG DI DALAM KARUNG

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Dua tablet vitamin C effervescent yang sama dimasukkan ke dua gelas air yang sama. Tablet pertama utuh, tablet kedua digerus halus dulu. Apa yang terjadi?

- Serbuk habis lebih cepat dan menghasilkan gas lebih banyak.
- Serbuk habis lebih cepat, tetapi jumlah gas totalnya sama.
- Tablet utuh lebih cepat karena lebih padat dan berat.
- Keduanya sama cepat karena massanya sama.

Jawabannya: serbuk lebih cepat, gasnya sama banyak. Menggerus membuka jauh lebih banyak permukaan sehingga lebih banyak partikel air dan asam yang bisa "menabrak" tablet setiap detik. Tetapi jumlah zat di dalam tablet tidak berubah, jadi gas karbon dioksida yang terbentuk tetap sama. *Laju* menjawab "seberapa cepat", bukan "seberapa banyak".

21.1 Seberapa cepat? Mengukur laju reaksi

Ada reaksi secepat kilat dan ada yang selambat siput. Kembang api meletus dalam seperseratus detik. Pisang di karung butuh beberapa hari untuk menguning. Paku di halaman berkarat dalam hitungan minggu. Stalaktit di gua-gua karst Gunung Sewu hanya tumbuh sekitar satu sentimeter dalam seratus tahun.



Reaksi kimia punya "jam" yang sangat berbeda-beda, dari seperseratus detik sampai ribuan tahun.

Bahasa sederhana · Laju reaksi mirip kecepatan motor. Kecepatan motor adalah jarak yang ditempuh dibagi waktu. Laju reaksi adalah banyaknya zat yang berubah dibagi waktu. Kalau banyak zat berubah dalam waktu singkat, reaksinya cepat. Kalau sedikit sekali yang berubah dalam waktu lama, reaksinya lambat.

Kimiawan mengukur laju dengan mengamati seberapa cepat **pereaksi berkurang** atau **produk bertambah**. Biasanya yang dipantau adalah konsentrasi dalam mol per liter (M).

DEFINISI · LAJU REAKSI

Laju reaksi (v) adalah perubahan konsentrasi pereaksi atau produk setiap satuan waktu:

$$v = -\frac{\Delta[\text{pereaksi}]}{\Delta t} = +\frac{\Delta[\text{produk}]}{\Delta t}$$

Satuannya mol L^{-1} s^{-1} (ditulis M/s). Tanda minus dipasang karena konsentrasi pereaksi *turun*, padahal laju selalu bernilai positif.

Hati-hati dengan koefisien reaksi. Di pabrik pupuk, amonia dibuat lewat reaksi $N_2 + 3\,H_2 \longrightarrow 2\,NH_3$. Setiap satu molekul N_2 yang habis disertai tiga molekul H_2 yang habis dan dua molekul NH_3 yang terbentuk. Jadi H_2 berkurang tiga kali lebih cepat daripada N_2. Supaya "laju reaksi" hanya punya satu nilai, setiap laju dibagi dengan koefisiennya:

$$v = -\frac{\Delta[N_2]}{\Delta t} = -\frac{1}{3}\frac{\Delta[H_2]}{\Delta t} = +\frac{1}{2}\frac{\Delta[NH_3]}{\Delta t}$$

Konsentrasi tidak selalu mudah diukur langsung. Kimiawan memilih sifat yang ikut berubah selama reaksi:

Yang diamati	Contoh reaksi	Alat
Volume gas bertambah	pualam + asam klorida: $CaCO_3 + 2\,HCl \longrightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2\uparrow$	suntikan gas atau gelas ukur terbalik dalam air, stopwatch

Massa berkurang	reaksi yang sama: gas $\mathrm{CO_2}$ lepas ke udara	neraca digital, kapas di mulut labu
Warna berubah	larutan kalium permanganat yang ungu memudar	kolorimeter, bahkan sensor cahaya HP
Kekeruhan	$\mathrm{Na_2S_2O_3 + 2\,HCl \longrightarrow 2\,NaCl + S\downarrow + SO_2 + H_2O}$: belerang membuat larutan keruh	"tanda X" di bawah gelas, dicatat waktu sampai X hilang
Daya hantar listrik / pH	reaksi yang menghabiskan atau menghasilkan ion	konduktometer, pH meter

Perhatikan grafik volume gas di bawah. Garisnya curam di awal lalu makin landai. Kemiringan garis antara dua titik memberi **laju rata-rata**. Kemiringan **garis singgung** di satu titik memberi **laju sesaat**, laju "detik itu juga", seperti angka di spidometer motor.

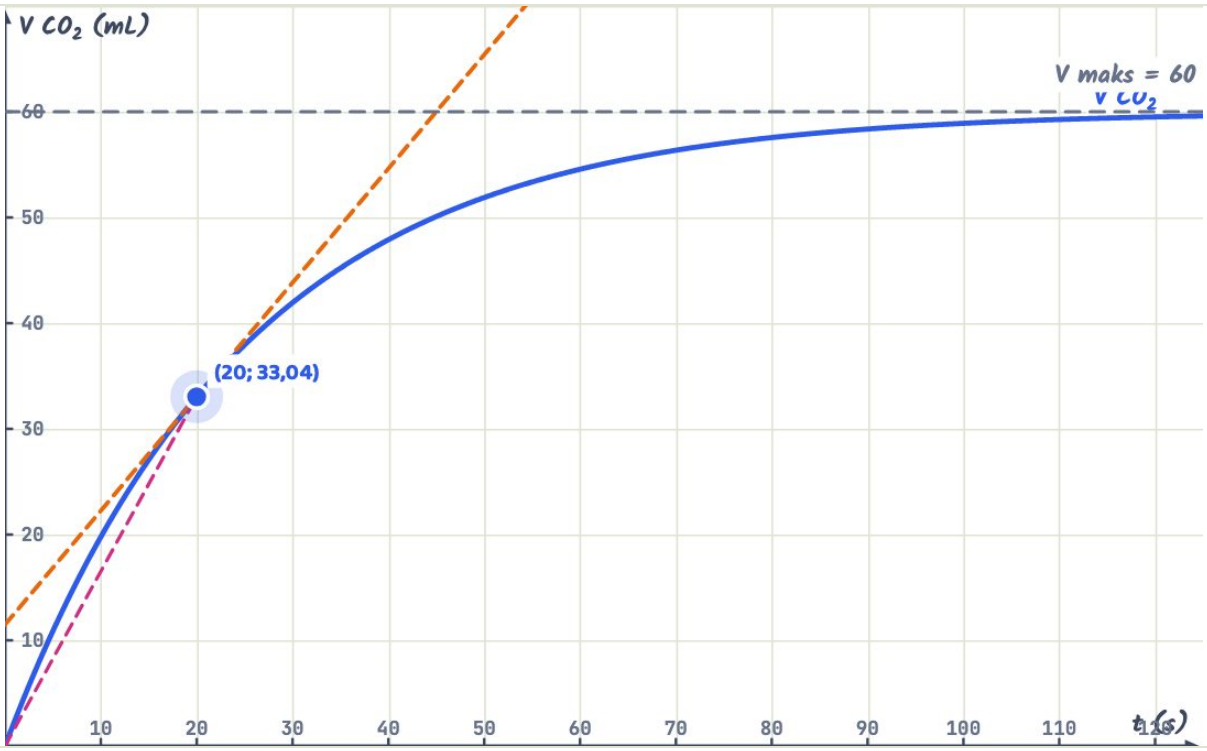
GRAFIK HIDUP

Volume CO_2 dari pualam + asam: laju rata-rata vs laju sesaat

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21

$$V(t) = V_{\text{maks}}\left(1 - e^{-kt}\right)$$

$$t = 20\ \text{s}: \quad V = 33{,}04\ \text{mL}, \quad v_{\text{sesaat}} = 1{,}08\ \text{mL/s}$$



V(t)	laju sesaat (garis singgung)	laju rata-rata 0 → t (garis putus ungu)
33 mL	1,08 mL/s	1,65 mL/s

Seret titik biru. Garis oranye (garis singgung) makin landai: laju sesaat terus turun karena pualam dan asamnya makin sedikit. Bandingkan dengan garis putus ungu (laju rata-rata dari awal): mana yang lebih besar di t = 40 s?

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Laju reaksi biasanya tidak tetap. Kebanyakan reaksi paling cepat di awal, lalu melambat karena pereaksinya makin sedikit. Jadi "laju rata-rata selama 2 menit" berbeda dengan "laju sesaat pada detik ke-10". Bacalah soal dengan teliti: yang diminta laju rata-rata, laju sesaat, atau laju awal?

CONTOH **Menghitung laju rata-rata**

Pualam direaksikan dengan asam klorida. Volume CO_2 yang terkumpul 0 mL saat $t = 0$ dan 48 mL saat $t = 40$ s. (a) Berapa laju rata-rata pembentukan CO_2 dalam mL/s? (b) Bila 1 mol gas bervolume 24 L pada suhu kamar, nyatakan laju itu dalam mol/s.

1. (a) $v = \dfrac{\Delta V}{\Delta t} = \dfrac{48 - 0}{40 - 0} = 1{,}2$ mL/s.

2. (b) 1,2 mL = 0,0012 L, jadi $v = \dfrac{0{,}0012\ \text{L/s}}{24\ \text{L/mol}} = 5{,}0 \times 10^{-5}$ mol/s.

Rata-rata terbentuk 1,2 mL CO_2 setiap detik, yaitu $5{,}0 \times 10^{-5}$ mol/s. Ingat: ini rata-rata. Di detik-detik awal lajunya lebih besar, menjelang akhir lebih kecil.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1850, **Ludwig Wilhelmy** dari Jerman mengamati gula tebu (sukrosa) yang terurai menjadi glukosa dan fruktosa dalam larutan asam. Ia tidak menimbang apa pun. Ia memakai **polarimeter**: larutan gula memutar arah cahaya terpolarisasi, dan putaran itu berubah perlahan selama reaksi. Wilhelmy menemukan bahwa laju reaksi sebanding dengan jumlah gula yang tersisa. Itulah hukum laju pertama dalam sejarah kimia, dan ternyata sebuah reaksi orde satu (subbab 21.5).

21.2 Teori tumbukan dan energi aktivasi

Agar bereaksi, partikel harus **bertemu**. Molekul gas di udara bertumbukan miliaran kali setiap detik. Kalau setiap tumbukan menghasilkan reaksi, semua reaksi gas akan selesai dalam sekejap dan kayu di sekitar kita sudah lama terbakar habis. Kenyataannya, hanya sebagian sangat kecil tumbukan yang berhasil.

Bahasa sederhana · Tumbukan partikel mirip menendang bola ke gawang. Tendangan yang terlalu pelan tidak sampai. Tendangan yang keras tetapi arahnya salah juga meleset. Gol hanya terjadi kalau tendangannya cukup keras **dan** arahnya tepat. Partikel pun begitu: reaksi hanya terjadi pada tumbukan yang cukup kuat dan dari arah yang pas.

TEORI TUMBUKAN

Reaksi terjadi bila partikel pereaksi:

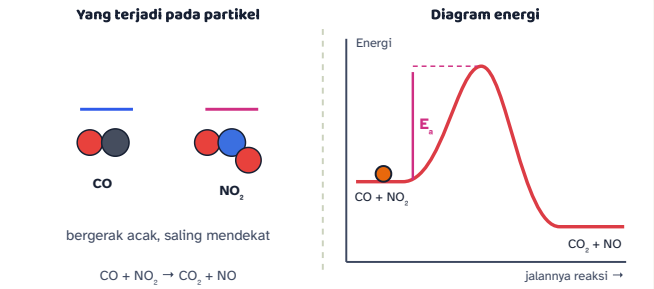
1. **bertumbukan**;
2. bertumbukan dengan energi **sama dengan atau lebih besar daripada energi aktivasi** E_a;
3. bertumbukan dengan **arah (orientasi) yang tepat**.

Tumbukan yang memenuhi ketiganya disebut **tumbukan efektif**. Laju reaksi sebanding dengan banyaknya tumbukan efektif setiap detik.

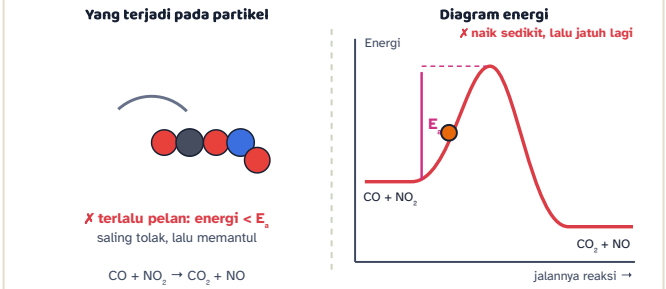
DEFINISI · ENERGI AKTIVASI

Energi aktivasi (E_a) adalah energi minimum yang harus dimiliki partikel yang bertumbukan agar reaksi terjadi. Di puncak "bukit energi", ikatan lama sedang putus dan ikatan baru sedang terbentuk. Susunan sesaat yang tidak stabil itu disebut **kompleks teraktivasi** (keadaan transisi).

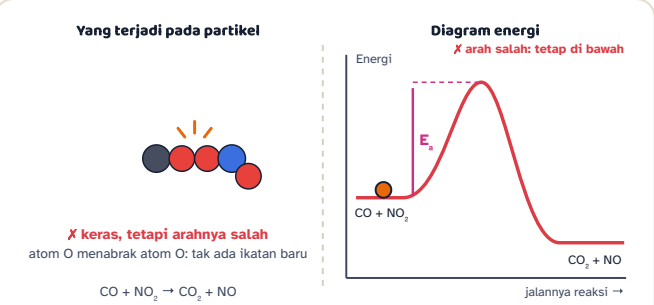
Bayangkan Kak Tirta mendorong gerobak bakso melewati polisi tidur. Kalau dorongannya kurang kuat, gerobak naik sedikit lalu mundur lagi. Kalau cukup kuat, gerobak melewati puncak dan meluncur turun di sisi lain. Tinggi polisi tidur itulah energi aktivasi. Ikuti perjalanan satu tumbukan berikut.



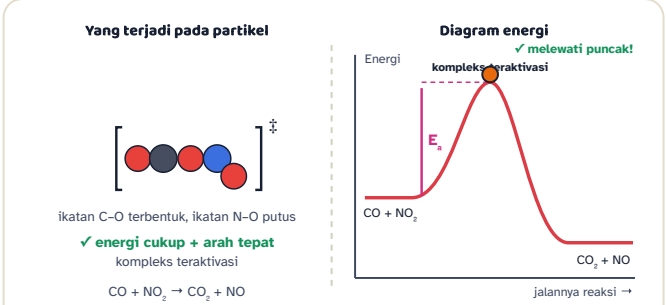
Langkah 1. Molekul CO dan $\mathrm{NO_2}$ bergerak acak dan saling mendekat. Di diagram energi, bola oranye berada di tingkat energi pereaksi.



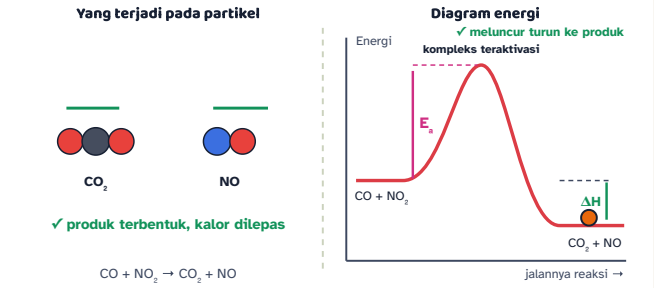
Langkah 2. Tumbukan pelan: energinya kurang dari E_a. Awan elektron kedua molekul saling tolak dan mereka memantul tanpa berubah. Bola naik sedikit di bukit lalu jatuh kembali.



Langkah 3. Tumbukan keras tetapi arahnya salah: ujung O dari CO menabrak atom O dari $\mathrm{NO_2}$. Ikatan baru C–O tidak mungkin terbentuk, jadi molekul memantul lagi.



Langkah 4. Tumbukan efektif: energinya cukup **dan** atom C menghadap atom O. Di puncak bukit terbentuk **kompleks teraktivasi**: ikatan N–O sedang putus, ikatan C–O sedang terbentuk.



Langkah 5. Produk $\mathrm{CO_2}$ dan NO terbentuk dan saling menjauh. Energi yang dilepas lebih besar daripada E_a yang "dipinjam", jadi reaksi ini eksoterm ($\Delta H < 0$). (Model satu tumbukan ini berlaku pada suhu tinggi; di 21.6 kamu akan melihat kejutannya pada suhu rendah.)

JAWABAN TEKA-TEKI BAB 20

Intan memang "ingin" menjadi grafit: ΔG° perubahannya sekitar −2,9 kJ/mol, jadi spontan. Tetapi setiap atom karbon intan terkunci oleh empat ikatan kovalen yang sangat kuat. Untuk menyusun ulang menjadi lapisan grafit, ikatan itu harus diputus dulu, sehingga energi aktivasinya luar biasa besar. Pada suhu kamar lajunya praktis nol. **Spontan tidak sama dengan cepat!** Termodinamika menjawab "ke mana", kinetika menjawab "secepat apa".

21.3 Empat kenop pengatur laju

Kalau laju bergantung pada banyaknya tumbukan efektif, cara mempercepat reaksi jelas: buat tumbukan lebih **sering**, atau buat lebih banyak tumbukan yang **cukup bertenaga**. Ada empat kenop utama.

JEMBATAN KELEDAI KIMO

Empat kenop laju: **"Kopi Luwak Selalu Kental"**, yaitu **Ko**nsentrasi, **L**uas permukaan, **S**uhu, dan **K**atalis. Dua kenop pertama menambah *jumlah* tumbukan, suhu menambah jumlah *dan* tenaga tumbukan, katalis menurunkan "polisi tidur"-nya.

Kenop 1 · Konsentrasi (dan tekanan gas)

Makin pekat larutan, makin banyak partikel dalam setiap liter, sehingga makin sering mereka bertumbukan. Soda kue berbuih lebih hebat dalam cuka dapur asli daripada dalam cuka yang diencerkan. Untuk gas, menaikkan tekanan berarti memampatkan partikel ke ruang yang lebih kecil: konsentrasinya naik.

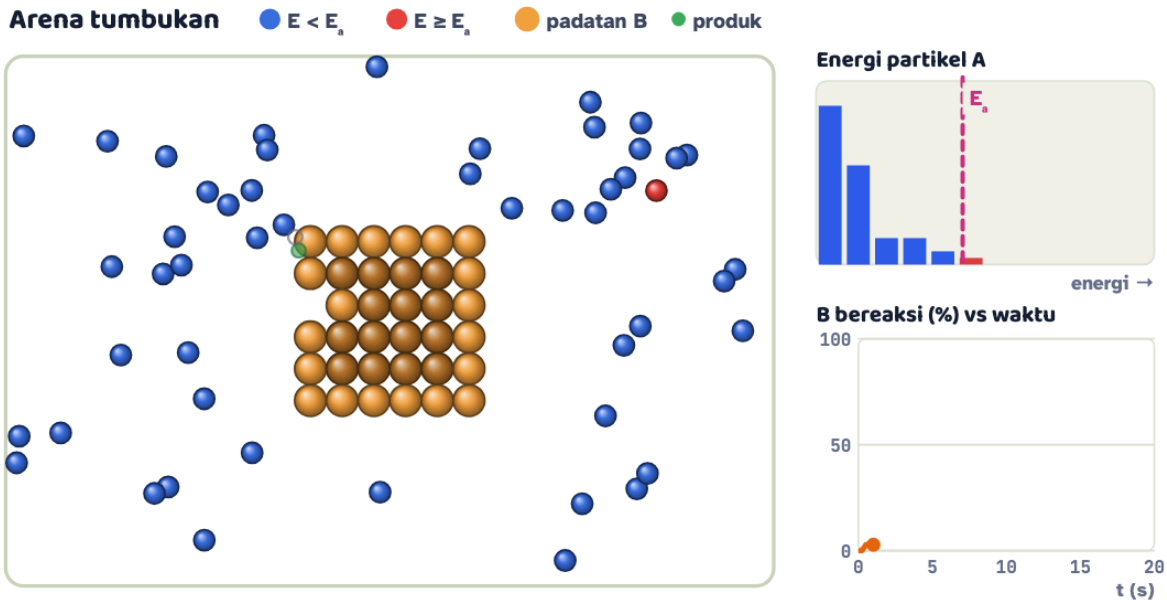
Kenop 2 · Luas permukaan

Pada padatan, hanya partikel di permukaan yang bisa ditabrak. Memotong atau menggerus padatan membuka permukaan baru. Serutan kayu lebih mudah menyala daripada balok kayu. Mengunyah makanan juga mempercepat kerja enzim pencernaan. Di pabrik tepung, debu tepung yang beterbangan bahkan bisa meledak bila tersulut, karena setiap butirnya sangat kecil dan dikelilingi oksigen.

LAB MINI

Arena Tumbukan: berburu tumbukan efektif

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21



Tumbukan per detik	Tumbukan efektif per detik	Bagian yang efektif	Atom B di permukaan
4,8	0,39	8,3 %	20

B sudah bereaksi	Waktu
3 %	1,2 s

Partikel **biru** energinya kurang dari E_a; partikel **merah** cukup bertenaga. Atom padatan B (oranye) hanya bisa bereaksi bila ditabrak partikel merah. Coba: (1) bandingkan "1 bongkah" dengan "36 butir serbuk" pada suhu yang sama; (2) naikkan suhu dari 300 K ke 400 K dan lihat histogram energi; (3) nyalakan katalis. Grafik kanan menyimpan percobaan sebelumnya (garis abu-abu) untuk dibandingkan. Ketuk satu partikel untuk melihat energinya. (Lab ini menyederhanakan: arah tumbukan dianggap selalu tepat.)

Kenop 3 · Suhu

Tebak Dulu!

Banyak reaksi menjadi kira-kira dua kali lebih cepat bila suhu naik dari 25 °C ke 35 °C. Apa penyebab utamanya?

Jumlah tumbukan per detik menjadi dua kali lipat.

Partikel memuai sehingga lebih mudah bertabrakan.

Jumlah tumbukan yang energinya ≥ E_a bertambah tajam, padahal jumlah tumbukan total hanya naik sekitar 2%.

Energi aktivasi reaksi turun saat suhu naik.

Jawabannya: fraksi tumbukan bertenaga melonjak. Dari 298 K ke 308 K, kelajuan rata-rata partikel hanya naik sekitar $\sqrt{308/298} \approx 1{,}017$ kali, jadi tumbukan bertambah ±2% saja. Tetapi bagian partikel yang energinya melewati E_a bisa naik hampir dua kali lipat. Energi aktivasinya sendiri tidak berubah. Kurva di bawah ini memperlihatkannya.

Partikel dalam suatu zat tidak bergerak sama cepat. Ada yang lambat, banyak yang sedang, dan sedikit yang sangat cepat. Sebaran energi itu digambarkan oleh **distribusi Maxwell–Boltzmann**. Luas di bawah kurva menyatakan seluruh partikel (100%). Hanya partikel di **kanan garis** E_a yang mampu bereaksi saat bertumbukan.

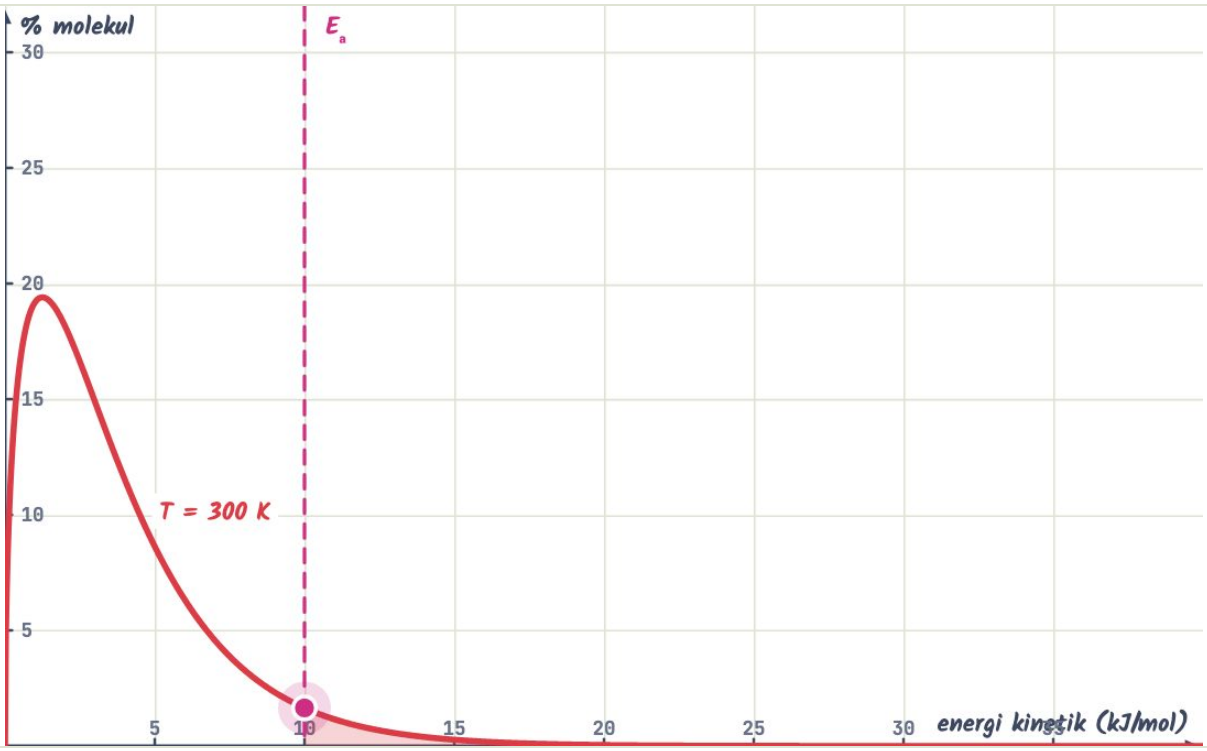
GRAFIK HIDUP

Kurva Maxwell–Boltzmann: siapa yang lolos garis E_a?

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21

$$\text{fraksi } (E \geq E_a) = \text{luas arsiran}$$

$$T = 300\ \text{K}\ (27\ ^\circ\text{C}), \quad E_a = 10\ \text{kJ/mol}$$



fraksi E ≥ E_a (luas arsiran merah)	fraksi E ≥ E_a dengan katalis	dibanding pada 300 K (tanpa katalis)
4,563 %	4,559 %	1 kali

Sumbu tegak menyatakan persen molekul per kJ/mol. Geser suhu: kurva memipih dan melebar, tetapi luas totalnya tetap 100%. Perhatikan arsiran merah di kanan E_a membengkak. Lalu naikkan "penurunan E_a oleh katalis": kurvanya tidak berubah sama sekali, hanya garis batasnya yang mundur, dan arsiran hijau menambah molekul yang lolos. Supaya arsirannya terlihat, E_a di grafik ini dibuat kecil; E_a reaksi nyata umumnya 40–120 kJ/mol, sehingga fraksinya jauh lebih kecil lagi.

Jadi suhu menaikkan laju dengan dua cara: tumbukan sedikit lebih sering, dan, jauh lebih penting, **lebih banyak tumbukan yang energinya melewati** E_a. Itulah sebabnya panci presto memasak rendang lebih cepat (air di dalamnya mendidih pada ±120 °C) dan kulkas memperlambat pembusukan.

Di buku soal sering muncul aturan praktis: "setiap kenaikan 10 °C, laju menjadi n kali". Aturan ini berguna untuk perkiraan cepat.

RUMUS HIDUP

Aturan kenaikan suhu (perkiraan cepat)

$$t_2 = \frac{t_1}{n^{(T_2 - T_1)/10}}$$

Setiap suhu naik 10 °C, laju menjadi n kali, sehingga waktu reaksinya menjadi 1/n kali.

- t_1 Waktu reaksi awal — s
- n Faktor per 10 °C — kali
- T_1 Suhu awal — °C
- T_2 Suhu akhir — °C
- t_2 Waktu reaksi baru — s

WAKTU REAKSI BARU

10

s

Dari **20** °C ke **50** °C laju menjadi **8** kali, sehingga waktu **80** s menjadi **10** s.

Satuan Nusantara: ≈ 17% dari satu menit · ≈ 33 × kedipan mata

Cek satuan: s ÷ (tanpa satuan) = s ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAJU-ATURAN-SUHU

⚠ **AWAS JEBAKAN**

"Suhu naik 10 °C, laju pasti tepat dua kali" itu **keliru**. Aturan dua kali hanya kebetulan cocok untuk reaksi dengan E_a sekitar 50 kJ/mol di dekat suhu kamar. Reaksi dengan E_a besar jauh lebih peka terhadap suhu (bisa lima kali atau lebih), reaksi dengan E_a kecil hampir tidak peka. Pakai faktor n yang diberikan soal, dan hitung dengan persamaan Arrhenius (21.6) bila datanya ada.

CONTOH **Telur rebus di dua suhu**

Setiap kenaikan 10 °C, laju suatu reaksi menjadi 2 kali. Pada 30 °C reaksi selesai dalam 120 detik. Berapa lama reaksi itu pada 60 °C?

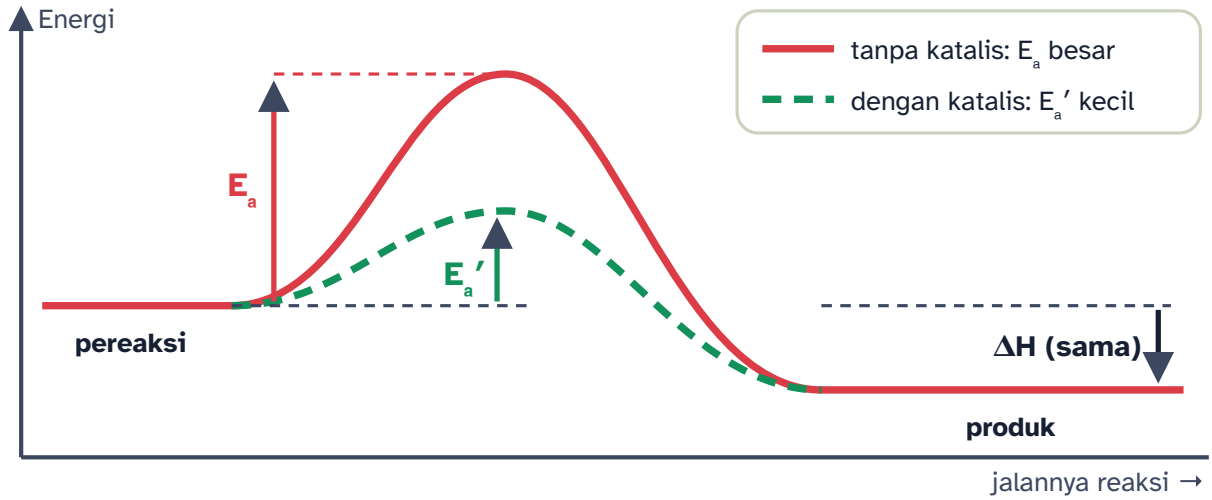
1. Kenaikan suhu: 60 − 30 = 30 °C, yaitu 3 kali "langkah 10 °C".
2. Laju menjadi $2^3 = 8$ kali lebih cepat.
3. Waktu menjadi $\frac{1}{8}$ kali: $120/8 = 15$ detik.

Reaksi selesai dalam 15 detik. Ingat: laju naik, waktu turun. Keduanya berbanding terbalik.

Kenop 4 · Katalis

DEFINISI · KATALIS

Katalis adalah zat yang mempercepat reaksi dengan menyediakan **jalur reaksi lain yang energi aktivasinya lebih rendah**. Katalis ikut bereaksi di tengah jalan, tetapi terbentuk kembali di akhir reaksi, sehingga jumlahnya tetap. Katalis yang sefase dengan pereaksi disebut **katalis homogen**; yang berbeda fase (biasanya padatan untuk pereaksi gas/cair) disebut **katalis heterogen**. Katalis biologis disebut **enzim**.



Katalis membuka "jalan pintas" di bawah bukit. Tingkat energi pereaksi dan produk tidak berubah, jadi ΔH tetap sama.

Contoh yang bisa kamu temui: enzim katalase dalam irisan kentang atau hati ayam menguraikan obat luka hidrogen peroksida menjadi air dan gas oksigen, $2\,H_2O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + O_2$, sehingga muncul busa. Di knalpot mobil, **konverter katalitik** berlapis platina (Pt), paladium, dan rodium mengubah gas beracun CO dan NO

menjadi CO_2 dan N_2. Pabrik margarin mengubah minyak sawit cair menjadi lemak padat dengan gas hidrogen dan katalis serbuk nikel (Ni), logam yang banyak ditambang di Sulawesi.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

"Katalis tidak ikut bereaksi sama sekali" itu keliru. Katalis **ikut bereaksi**, lalu **terbentuk kembali**. Contohnya ion iodida pada penguraian hidrogen peroksida:

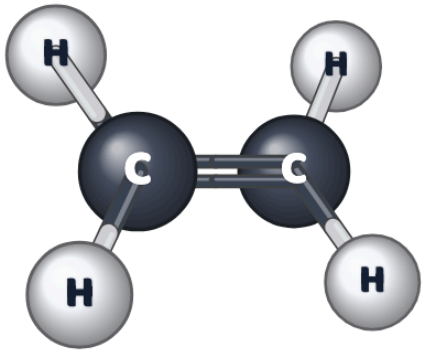
$$H_2O_2 + I^- \longrightarrow H_2O + IO^- \quad (\text{lambat})$$

$$H_2O_2 + IO^- \longrightarrow H_2O + O_2 + I^- \quad (\text{cepat})$$

Ion I^- dipakai di tahap 1 dan kembali di tahap 2. Jumlahkan kedua tahap: hasilnya $2\,H_2O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + O_2$, tanpa I^-. Katalis juga **tidak** mengubah ΔH dan tidak menambah jumlah produk akhir.

MOLEKUL 3D

Molekul pemeran bab laju reaksi



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etena (etilena) C_2H_4

Mr ≈ 28,05 · PubChem ↗

Segitiga datar di tiap karbon (120°). Hormon pematang buah dan bahan baku plastik polietilena.

Etilena (C_2H_4) adalah hormon pematang buah. Asetilena (C_2H_2) dari karbit meniru kerjanya. Putar keduanya: mana yang datar, mana yang lurus? Ketuk tiga atom pada NO_2 untuk mengukur sudut O–N–O.

KIMIA NUSANTARA · MEMERAM PISANG

Buah yang matang menghasilkan gas **etilena**, hormon yang memicu enzim-enzim pematangan: pati diubah menjadi gula, klorofil hijau dirombak, dan buah melunak. Dalam karung atau lubang tertutup, etilena dari satu buah matang terkumpul (konsentrasinya naik), sehingga pisang lain ikut matang serentak. Petani di Jawa mengenal cara tradisional "pengemposan": pisang diperam dalam lubang yang diberi asap, dan asap pembakaran juga mengandung sedikit etilena. Pedagang yang memakai karbit ($\mathrm{CaC_2}$) memanfaatkan reaksi $\mathrm{CaC_2 + 2\,H_2O \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2}$; asetilena yang terbentuk meniru etilena. Tetapi karbit teknis dapat mengandung pengotor senyawa arsenik dan fosfor, sehingga banyak negara melarang pemeraman dengan karbit. Cara yang lebih aman: memeram bersama buah yang sudah matang.

TAMU DARI MASA LALU

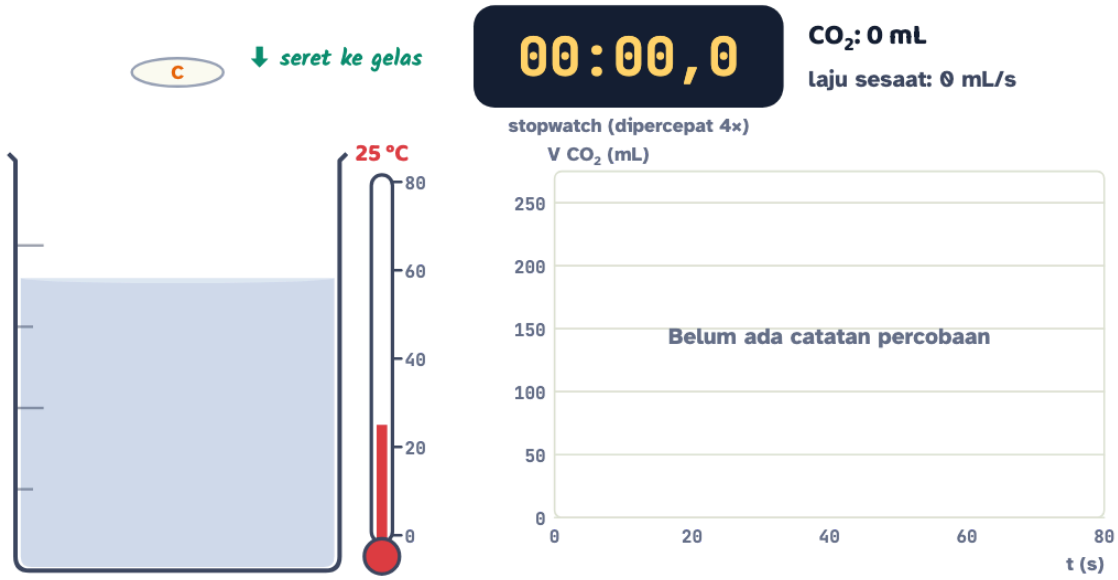
Pada 1835, kimiawan Swedia **Jöns Jacob Berzelius** memperhatikan banyak reaksi yang dipercepat oleh zat yang "tidak habis", misalnya pati yang diubah menjadi gula oleh asam. Ia menamai gejala itu *katalisis*, dari bahasa Yunani yang berarti "melepaskan". Kini katalis menjadi jantung industri kimia: sebagian besar proses kimia di pabrik (sekitar 80–90%) memakai katalis.

Sekarang uji semua kenop itu dengan percobaan yang bisa kamu ulangi di rumah.

LAB MINI

Tablet Effervescent & Stopwatch

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21



Stopwatch	CO_2 terbentuk	Laju rata-rata	Sisa tablet
0 s	0 mL	0 mL/s	100 %

Keadaan
siap: seret tablet ke gelas

Seret tablet ke dalam gelas (atau tekan 💊). Stopwatch berjalan sampai tablet habis, dan grafik mencatat volume CO_2. Coba: tablet utuh di air 25 °C, lalu air 5 °C, lalu air 50 °C; kemudian bandingkan bentuk utuh, dibelah 4, dan serbuk. Kurva mana yang paling curam di awal? Apakah volume akhirnya berbeda? (Model ini memakai E_a ±40 kJ/mol dan menganggap satu tablet melepas 250 mL CO_2; stopwatch dipercepat 4×.)

MITOS

"Reaksi yang lebih cepat menghasilkan produk lebih banyak."

FAKTA

Laju hanya menyatakan **kecepatan**. Jumlah produk ditentukan jumlah pereaksi (stoikiometri, Bab 18). Tablet serbuk dan tablet utuh menghasilkan gas yang sama banyak; serbuk hanya lebih cepat selesai.

MITOS

"Kulkas membunuh kuman di makanan."

FAKTA

Dingin hanya **memperlambat** reaksi pembusukan dan pertumbuhan mikroba. Begitu makanan keluar dari kulkas, prosesnya berlanjut. Yang membunuh kuman adalah memasak sampai matang.

MITOS

"Katalis menggeser hasil reaksi supaya produknya lebih banyak."

FAKTA

Katalis mempercepat reaksi maju
dan
reaksi balik sama besar. Hasil akhirnya tetap; yang berubah hanya waktu untuk mencapainya (Bab 22).

21.4 Persamaan laju dan orde reaksi

"Makin pekat makin cepat" masih terlalu kabur. Kimiawan ingin tahu *seberapa* cepat. Kalau konsentrasi dua kali lipat, apakah laju dua kali, empat kali, atau tidak berubah sama sekali? Jawabannya tertulis dalam persamaan laju.

DEFINISI · PERSAMAAN LAJU

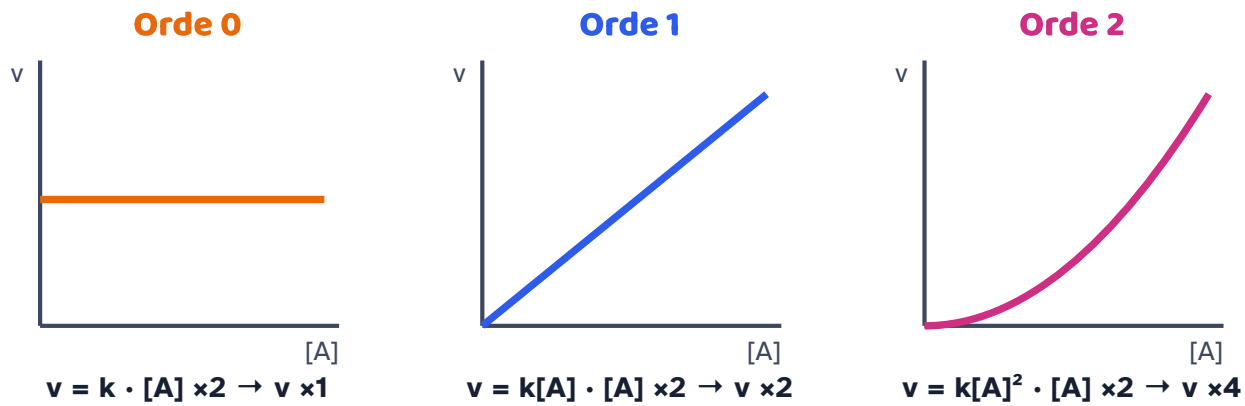
Untuk reaksi $a\,\mathrm{A} + b\,\mathrm{B} \rightarrow \text{produk}$, **persamaan laju** (hukum laju) berbentuk

$$v = k\,[\mathrm{A}]^m\,[\mathrm{B}]^n$$

k adalah **tetapan laju**: nilainya bergantung pada suhu dan katalis, tetapi tidak pada konsentrasi. m dan n adalah **orde reaksi** terhadap A dan B; jumlahnya $m + n$ disebut orde total. Orde **ditentukan dari percobaan**.

AWAS JEBAKAN

Orde reaksi **tidak** dibaca dari koefisien persamaan reaksi! Reaksi $\mathrm{NO_2} + \mathrm{CO} \longrightarrow \mathrm{NO} + \mathrm{CO_2}$ punya koefisien 1 dan 1, tetapi pada suhu rendah hukum lajunya $v = k[\mathrm{NO_2}]^2$: orde 2 terhadap $\mathrm{NO_2}$ dan orde 0 terhadap CO. Koefisien hanya sama dengan orde untuk satu tahap elementer (21.6).



Bentuk grafik laju terhadap konsentrasi langsung membocorkan ordenya: datar (orde 0), garis lurus lewat titik nol (orde 1), atau parabola (orde 2).

RUMUS HIDUP **Persamaan laju**

$$v = k\,[\mathrm{A}]^{m}\,[\mathrm{B}]^{n}$$

Laju sama dengan tetapan laju dikali konsentrasi setiap pereaksi yang dipangkatkan ordenya.

k Tetapan laju $\mathrm{M}^{1-(m+n)}\ \mathrm{s}^{-1}$ · [A] Konsentrasi A M · [B] Konsentrasi B M · m Orde terhadap A · n Orde terhadap B · v Laju reaksi M/s

LAJU REAKSI

0,004

M/s

orde total 3: satuan k = $\mathrm{M}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}$

Orde total = **3**. Jika [A] dilipatduakan, laju menjadi **4** kali; jika [B] dilipatduakan, laju menjadi **2** kali.

Cek satuan: k × M^{m+n} harus menjadi M/s, jadi satuan k = $\mathrm{M}^{1-(m+n)}\ \mathrm{s}^{-1}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAJU-HUKUM-LAJU

Orde total	Persamaan laju (contoh)	Satuan k	Bila semua konsentrasi ×2
0	$v = k$	$\mathrm{M\ s^{-1}}$	laju tetap
1	$v = k[\mathrm{A}]$	$\mathrm{s^{-1}}$	laju ×2
2	$v = k[\mathrm{A}]^2$ atau $k[\mathrm{A}][\mathrm{B}]$	$\mathrm{M^{-1}\ s^{-1}}$	laju ×4
3	$v = k[\mathrm{A}]^2[\mathrm{B}]$	$\mathrm{M^{-2}\ s^{-1}}$	laju ×8

Bagaimana orde ditemukan? Cara paling populer adalah **metode laju awal**. Beberapa percobaan dilakukan dengan konsentrasi awal berbeda, lalu laju di awal reaksi diukur (saat konsentrasi belum sempat berubah). Kuncinya: bandingkan dua percobaan yang hanya **satu** konsentrasinya berbeda.

TRIK KAK TIRTA

"Satu kenop diputar, yang lain dikunci." Cari dua baris tabel yang hanya berbeda pada satu zat. Lalu tulis: (perbandingan konsentrasi)^{orde} = perbandingan laju. Konsentrasi ×2, laju ×4 → $2^m = 4$ → $m = 2$. Konsentrasi ×3, laju ×3 → $m = 1$. Laju tidak berubah → $m = 0$. Kalau angkanya tidak bulat, pakai $m = \dfrac{\log(\text{rasio laju})}{\log(\text{rasio konsentrasi})}$.

KERJAKAN BERSAMA

Metode laju awal: reaksi NO dan H_2

Untuk reaksi $2\,NO\,(g) + 2\,H_2\,(g) \longrightarrow N_2\,(g) + 2\,H_2O\,(g)$ pada suhu tetap diperoleh data berikut. Tentukan persamaan laju, nilai k beserta satuannya, dan laju bila $[NO] = 0{,}30$ M dan $[H_2] = 0{,}05$ M.

Percobaan	$[NO]$ (M)	$[H_2]$ (M)	Laju awal (M/s)
1	0,10	0,10	0,0030
2	0,20	0,10	0,012
3	0,10	0,20	0,0060

1. Orde NO (bandingkan 1 dan 2, $[H_2]$ tetap): $[NO]$ ×2, laju $0{,}012/0{,}0030 = 4$ kali. $2^m = 4$ → $m = 2$.
2. Orde H_2 (bandingkan 1 dan 3, $[NO]$ tetap): $[H_2]$ ×2, laju ×2 → $n = 1$.
3. Persamaan laju: $v = k[NO]^2[H_2]$, orde total 3. Perhatikan: koefisien H_2 adalah 2, tetapi ordenya 1!
4. Dari percobaan 1: $k = \dfrac{0{,}0030}{(0{,}10)^2(0{,}10)} = 3{,}0$ M^{-2} s^{-1}.
5. Laju baru: $v = 3{,}0 \times (0{,}30)^2 \times 0{,}05 = 0{,}0135$ M/s.

$v = 3{,}0\,[NO]^2[H_2]$ dengan $k = 3{,}0$ M^{-2} s^{-1}. Pada kondisi baru, laju = 0,0135 M/s.

ADU CEPAT

Tebak orde dari laju awal

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Cari m pada $x^m = y$. Contoh: konsentrasi ×2, laju ×4 → $2^m = 4$ → m = 2. Laju ×1 berarti orde 0.

21.5 Waktu paruh: jam pasir reaksi orde satu

Saat kamu minum obat penurun demam, obat itu masuk ke darah lalu perlahan diurai hati dan dibuang ginjal. Kecepatan pembuangannya sebanding dengan kadar obat yang ada: makin banyak obat, makin cepat dibuang. Itulah ciri **reaksi orde satu**.

Bahasa sederhana · Bayangkan sekantong permen yang setiap jamnya dibagi dua: separuh dimakan, separuh disimpan. Mula-mula 64 permen, sejam kemudian 32, lalu 16, lalu 8. Jumlah yang dimakan makin sedikit, tetapi selalu s*eparuh* dari sisanya. Obat di dalam darah dan zat radioaktif berkurang dengan cara yang sama.

ATURAN · REAKSI ORDE SATU

Bila $v = k[\mathrm{A}]$, konsentrasi turun secara eksponensial:

$$[\mathrm{A}]_t = [\mathrm{A}]_0\, e^{-kt} \qquad \Longleftrightarrow \qquad \ln[\mathrm{A}]_t = \ln[\mathrm{A}]_0 - kt$$

Waktu paruh ($t_{1/2}$) adalah waktu yang dibutuhkan sampai konsentrasi tinggal separuhnya. Untuk orde satu:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \approx \frac{0{,}693}{k}$$

Waktu paruh orde satu **tidak bergantung pada konsentrasi awal**: dari 100% ke 50% sama lamanya dengan dari 50% ke 25%.

RUMUS HIDUP

Peluruhan orde satu

$$[\mathrm{A}]_t = [\mathrm{A}]_0 \, e^{-k\,t}$$

Pada reaksi orde satu, dalam selang waktu yang sama selalu hilang persentase yang sama, bukan jumlah yang sama.

- $[\mathrm{A}]_0$ Konsentrasi awal M
- k Tetapan laju s^{-1}
- t Waktu s
- $[\mathrm{A}]_t$ Konsentrasi tersisa M

KONSENTRASI TERSISA

0,2231

M

Setelah **30** s tersisa **0,2231** M (**22,313**% dari semula). Waktu paruhnya **13,863** s, jadi sudah lewat **2,164** kali waktu paruh.

Cek satuan: $\mathrm{s}^{-1} \times \mathrm{s}$ = tanpa satuan, jadi $[\mathrm{A}]_t$ bersatuan M seperti $[\mathrm{A}]_0$ ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAJU-ORDE-SATU

Bandingkan tiga orde dalam satu grafik. Ketiga kurva di bawah dimulai dari konsentrasi yang sama dengan angka k yang sama.

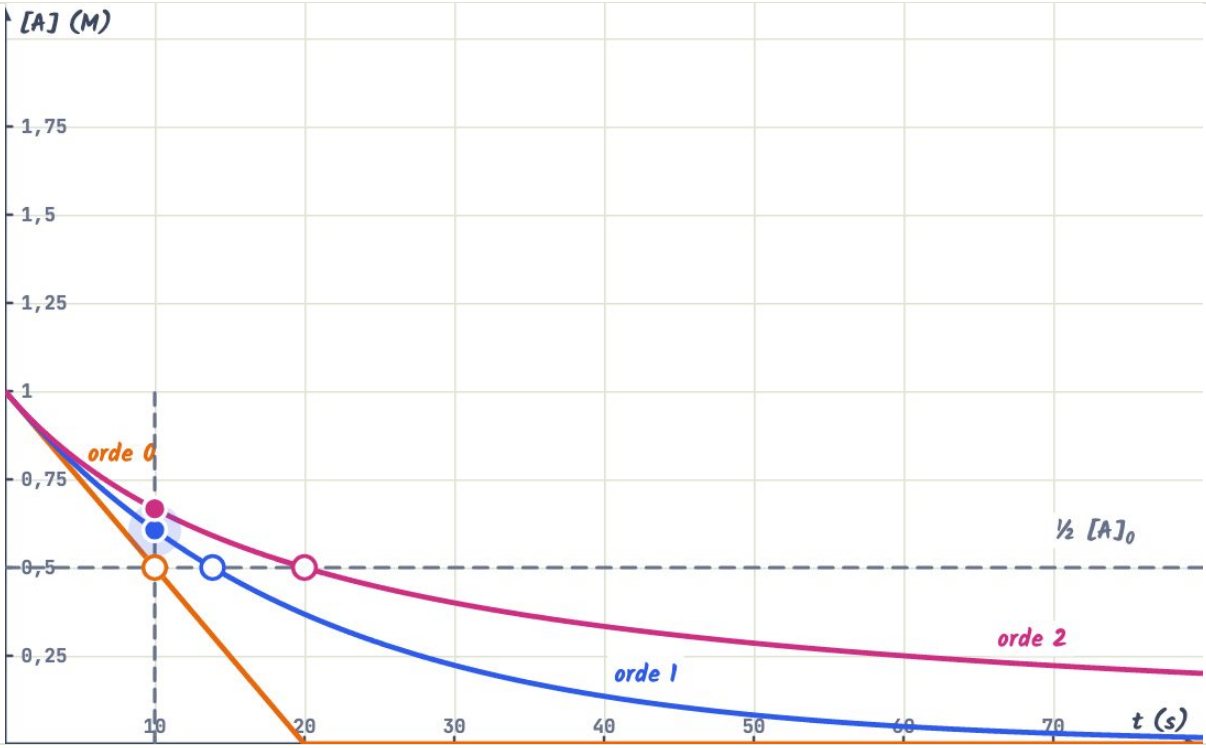
GRAFIK HIDUP

[A] terhadap waktu: orde 0, 1, dan 2

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21

$$\text{orde 0: } [\mathrm{A}] = [\mathrm{A}]_0 - kt \qquad \text{orde 1: } [\mathrm{A}] = [\mathrm{A}]_0 e^{-kt} \qquad \text{orde 2}$$

$$t_{1/2}: \quad \text{orde 0} = 10\ \text{s}, \quad \text{orde 1} = 13{,}86\ \text{s}, \quad \text{orde 2} = 20\ \text{s}$$



[A] orde 0	[A] orde 1	[A] orde 2	t½ orde 0 = $[A]_0/2k$	t½ orde 1 = ln 2/k
0,5 M	0,607 M	0,667 M	10 s	13,9 s

t½ orde 2 = $1/(k[A]_0)$: **20 s**

Lingkaran berongga menandai waktu paruh tiap orde (saat kurva memotong garis ½ $[A]_0$). Geser $[A]_0$ naik-turun: lingkaran oranye bergeser ke kanan, magenta ke kiri, tetapi lingkaran biru (orde 1) diam di tempat! Angka k dibuat sama, tetapi satuannya berbeda: M/s untuk orde 0, s^{-1} untuk orde 1, $M^{-1}\ s^{-1}$ untuk orde 2.

RUMUS HIDUP

Sisa obat dalam darah

$$C = C_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Setiap lewat satu waktu paruh, kadar obat tinggal separuhnya.

- C_0 Kadar awal mg/L
- $t_{1/2}$ Waktu paruh obat jam
- t Waktu sejak diminum jam
- C Kadar tersisa mg/L

KADAR TERSISA

2

mg/L

Setelah **6** jam (**3** kali waktu paruh), kadar obat tinggal **2** mg/L, yaitu **12,5**% dari kadar awal.

Cek satuan: jam ÷ jam = tanpa satuan (pangkatnya), jadi C bersatuan seperti C_0 ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAJU-SISA-OBAT

COBA SENDIRI

Obat yang terus berkurang

Suatu obat dibuang tubuh menurut kinetika orde satu dengan waktu paruh 4 jam. Kadar awal dalam darah 20 mg/L. (a) Berapa kadarnya setelah 12 jam? (b) Berapa tetapan laju k? (c) Kapan kadarnya turun menjadi 10% dari kadar awal?

1. (a) 12 jam = 3 kali waktu paruh: $20 \rightarrow 10 \rightarrow 5 \rightarrow 2{,}5$ mg/L.
2. (b) $k = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} = \dfrac{0{,}693}{4\ \text{jam}} = 0{,}173\ \text{jam}^{-1}$.
3. (c) $\ln \dfrac{[\text{A}]_0}{[\text{A}]_t} = kt \rightarrow \ln 10 = 0{,}173\,t \rightarrow t = \dfrac{2{,}303}{0{,}173} = 13{,}3$ jam.

(a) 2,5 mg/L; (b) $k = 0{,}173$ jam⁻¹; (c) sekitar 13,3 jam (±3,3 kali waktu paruh). Inilah dasar dokter dan apoteker menentukan selang minum obat. Selalu ikuti aturan pakai dari mereka, jangan menghitung dosis sendiri.

ADU CEPAT

Waktu paruh orde satu

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Hitung dulu berapa kali waktu paruh: t ÷ t½. Sisa = 100% ÷ 2 pangkat banyaknya waktu paruh.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM LAJU TERINTEGRASI DAN GRAFIK GARIS LURUS

Persamaan laju $-\frac{d[\mathrm{A}]}{dt} = k[\mathrm{A}]^n$ dapat diintegralkan. Untuk orde satu: $\int \frac{d[\mathrm{A}]}{[\mathrm{A}]} = -k\int dt$ memberi $\ln[\mathrm{A}]_t - \ln[\mathrm{A}]_0 = -kt$. Pada $t = t_{1/2}$, $[\mathrm{A}]_t = \frac{1}{2}[\mathrm{A}]_0$, sehingga $\ln\frac{1}{2} = -kt_{1/2}$ dan $t_{1/2} = \ln 2/k$.

Orde	Bentuk terintegrasi	Grafik yang lurus	Kemiringan	$t_{1/2}$
0	$[\mathrm{A}] = [\mathrm{A}]_0 - kt$	$[\mathrm{A}]$ vs t	$-k$	$[\mathrm{A}]_0/2k$
1	$\ln[\mathrm{A}] = \ln[\mathrm{A}]_0 - kt$	$\ln[\mathrm{A}]$ vs t	$-k$	$\ln 2/k$
2	$\frac{1}{[\mathrm{A}]} = \frac{1}{[\mathrm{A}]_0} + kt$	$1/[\mathrm{A}]$ vs t	$+k$	$1/(k[\mathrm{A}]_0)$

Trik penentuan orde dari data konsentrasi–waktu: buat ketiga grafik itu. Grafik yang membentuk garis lurus menunjukkan ordenya, dan kemiringannya memberi k. Cara lain: lihat waktu paruh berturut-turut. Tetap → orde 1; memendek → orde 0; memanjang → orde 2. Peluruhan radioaktif (Bab 6 dan Bab 37) selalu orde satu, itulah sebabnya ia menjadi "jam" yang andal untuk menanggali fosil.

21.6 Lanjut: Arrhenius, mekanisme reaksi, dan enzim

Persamaan Arrhenius

Tetapan laju k berubah dengan suhu. Hubungannya dirumuskan oleh Svante Arrhenius:

$$k = A\,e^{-E_a/RT} \qquad \Longleftrightarrow \qquad \ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}$$

Faktor $e^{-E_a/RT}$ kira-kira menyatakan fraksi tumbukan yang energinya cukup (arsiran merah pada kurva Maxwell–Boltzmann). Faktor A (faktor frekuensi) memuat seberapa sering partikel bertumbukan dan seberapa besar peluang arahnya tepat. $R = 8{,}314$ J mol^{-1} K^{-1}, dan T wajib dalam kelvin. Dengan membandingkan dua suhu, A saling coret:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

RUMUS HIDUP **Persamaan Arrhenius (dua suhu)**

$$\frac{k_2}{k_1} = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right]$$

Makin besar energi aktivasi, makin peka laju terhadap perubahan suhu.

- E_a Energi aktivasi `kJ/mol`
- T_1 Suhu awal `K`
- T_2 Suhu baru `K`
- k_2/k_1 Perbandingan laju k_2/k_1 `kali`

PERBANDINGAN LAJU K_2/K_1

1,926

kali

inilah asal aturan 'naik 10 °C, laju dua kali'

Dari **298** K ke **308** K (selisih **10** K), laju menjadi **1,926** kali.

Cek satuan: (J/mol) ÷ (J mol^{-1} K^{-1}) × K^{-1} = tanpa satuan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAJU-ARRHENIUS

KERJAKAN BERSAMA **Mengapa susu lebih awet di kulkas?**

Susu segar basi dalam ±6 jam pada 30 °C, tetapi bertahan ±4 hari (96 jam) di kulkas bersuhu 4 °C. Anggap "waktu basi" berbanding terbalik dengan laju reaksi pembusukan. Perkirakan energi aktivasinya.

1. Perbandingan laju: $\frac{k_{30}}{k_4} = \frac{96}{6} = 16$.
2. Ubah suhu ke kelvin: $T_1 = 277{,}15$ K dan $T_2 = 303{,}15$ K.
3. $\ln 16 = \frac{E_a}{8{,}314}\left(\frac{1}{277{,}15} - \frac{1}{303{,}15}\right) \rightarrow 2{,}773 = \frac{E_a}{8{,}314} \times 3{,}095 \times 10^{-4}$.
4. $E_a = \frac{2{,}773 \times 8{,}314}{3{,}095 \times 10^{-4}} \approx 7{,}4 \times 10^4$ J/mol.

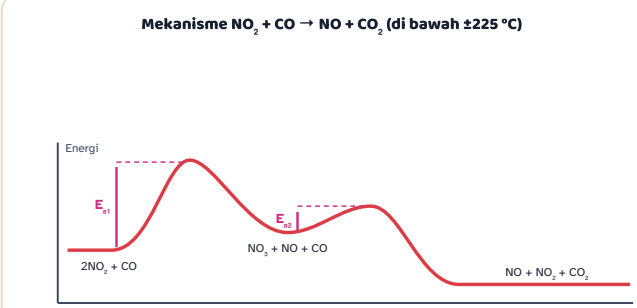
$E_a \approx$ 74 kJ/mol. Karena E_a cukup besar, penurunan suhu 26 °C saja sudah memperlambat pembusukan 16 kali. Itulah kehebatan kulkas.

TAMU DARI MASA LALU

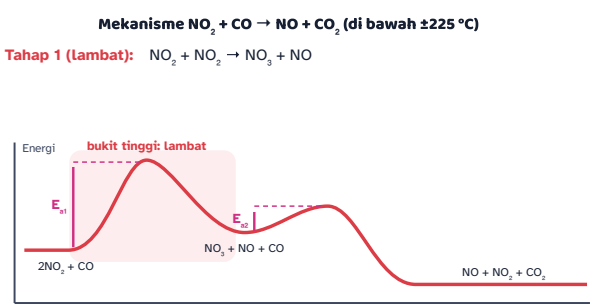
Pada 1889, kimiawan Swedia **Svante Arrhenius** mengusulkan bahwa hanya molekul "teraktivasi" yang bisa bereaksi, dan jumlahnya naik tajam dengan suhu. Ia melanjutkan gagasan Jacobus van 't Hoff. Arrhenius dikenal sebagai salah satu pendiri kimia fisika dan meraih Nobel Kimia 1903 (untuk teori ionisasi larutan). Ia juga termasuk orang pertama yang menghitung bahwa CO_2 dari pembakaran batu bara bisa menghangatkan Bumi.

Mekanisme reaksi dan tahap penentu laju

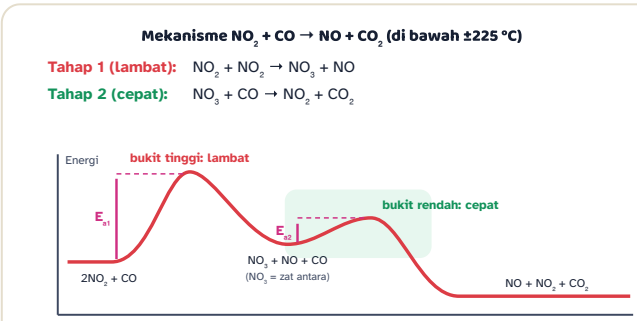
Banyak reaksi tidak terjadi dalam satu tumbukan, melainkan lewat beberapa **tahap elementer** berurutan. Rangkaian tahap itu disebut **mekanisme reaksi**. Zat yang terbentuk di satu tahap lalu habis di tahap berikutnya disebut **zat antara**. Untuk tahap elementer (dan hanya untuk tahap elementer), orde sama dengan koefisiennya. Tahap yang paling lambat menentukan laju keseluruhan: itulah **tahap penentu laju**.



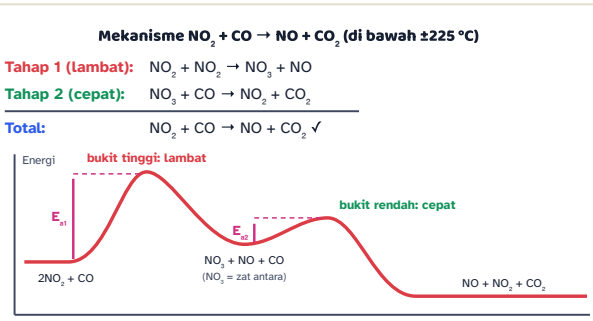
Langkah 1. Reaksi total $NO_2 + CO \quad NO + CO_2$. Di bawah ±225 °C, data laju awal memberi $v = k[NO_2]^2$. Aneh: CO sama sekali tidak muncul di hukum laju! Berarti reaksi ini tidak terjadi lewat satu tumbukan NO_2–CO.



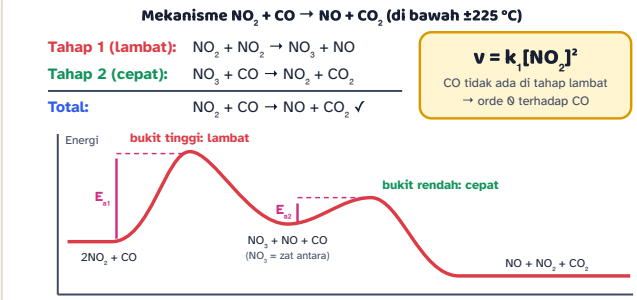
Langkah 2. Tahap 1 (lambat): dua molekul NO_2 bertumbukan dan satu atom O berpindah, $NO_2 + NO_2 \quad NO_3 + NO$. Bukitnya tinggi ($E_{a1}$ besar), jadi hanya sedikit tumbukan yang berhasil.



Langkah 3. Tahap 2 (cepat): NO_3 yang sangat reaktif langsung menyerahkan atom O kepada CO, $NO_3 + CO \quad NO_2 + CO_2$. Bukitnya rendah, jadi tahap ini kilat.



Langkah 4. Jumlahkan kedua tahap. NO_3 terbentuk lalu habis lagi: ia **zat antara**. Satu NO_2 juga muncul di kedua ruas sehingga saling coret. Hasilnya persis reaksi total.



Langkah 5. Laju keseluruhan mengikuti tahap paling lambat, yaitu **tahap penentu laju**: $v = k_1[NO_2]^2$. CO baru masuk di tahap cepat, maka ordenya nol. Mekanisme ini cocok dengan data percobaan!

TRIK KAK TIRTA

Bayangkan warung bakso dengan tiga pelayan gesit tetapi hanya satu peracik yang lambat. Secepat apa pun pelayan mengantar, mangkuk keluar sesuai kecepatan si peracik. Menambah pelayan (menaikkan [CO]) tidak menolong; yang menolong hanya mempercepat peracik. Saat memeriksa mekanisme, ingat tiga syarat: tahap-tahapnya harus **berjumlah** reaksi total, tahap lambatnya harus **memberi** hukum laju yang cocok dengan data, dan setiap tahap harus masuk akal secara kimia.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PLOT ARRHENIUS DAN TAHAP CEPAT YANG SETIMBANG

Plot Arrhenius. Karena $\ln k = \ln A - \dfrac{E_a}{R}\cdot\dfrac{1}{T}$, grafik $\ln k$ terhadap $1/T$ berupa garis lurus dengan kemiringan $-E_a/R$ dan titik potong sumbu tegak $\ln A$. Mengukur k pada lima suhu lalu menarik garis terbaik memberi E_a yang jauh lebih andal daripada dua titik saja.

Pra-kesetimbangan. Bila tahap lambat didahului tahap cepat yang setimbang, konsentrasi zat antara dinyatakan dengan tetapan kesetimbangannya. Contoh: $2\,\mathrm{NO} + \mathrm{O_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{NO_2}$ dengan mekanisme $2\,\mathrm{NO} \rightleftharpoons \mathrm{N_2O_2}$ (cepat, K) lalu $\mathrm{N_2O_2} + \mathrm{O_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{NO_2}$ (lambat, k_2). Maka $v = k_2[\mathrm{N_2O_2}][\mathrm{O_2}]$ dan $[\mathrm{N_2O_2}] = K[\mathrm{NO}]^2$, sehingga $v = k_2K[\mathrm{NO}]^2[\mathrm{O_2}]$: orde 3, tanpa perlu tumbukan tiga molekul sekaligus. Pembentukan $\mathrm{N_2O_2}$ bersifat eksoterm, sehingga K mengecil saat dipanaskan. Akibatnya laju reaksi ini justru sedikit *turun* bila suhu dinaikkan, salah satu kejutan langka dalam kinetika.

Enzim: katalis kehidupan

Sel tubuhmu menjalankan ribuan reaksi pada 37 °C tanpa api dan tanpa asam pekat. Rahasianya adalah **enzim**, protein berbentuk rumit yang punya lekukan khusus, yaitu **sisi aktif**. Molekul pereaksi (substrat) masuk ke sisi aktif seperti anak kunci masuk ke gembok, lalu diubah menjadi produk dengan E_a yang jauh lebih rendah. Enzim katalase, misalnya, mempercepat penguraian hidrogen peroksida jutaan kali lipat.



Model "kunci dan gembok". Kini diketahui sisi aktif sedikit berubah bentuk untuk "memeluk" substratnya (model kecocokan terinduksi).

Karena enzim adalah protein, ia rapuh. Di atas suhu optimumnya (sekitar 37–40 °C untuk enzim manusia), bentuk sisi aktifnya rusak (**terdenaturasi**) sehingga laju justru anjlok. Itulah sebabnya demam yang terlalu tinggi berbahaya, dan mengapa merebus nanas menghilangkan kemampuannya melunakkan daging. Enzim juga peka pH: pepsin di lambung bekerja paling baik pada pH ±2, sedangkan enzim di usus pada pH ±8.

KIMIA NUSANTARA · DAPUR PENUH ENZIM

Tempe: kapang *Rhizopus* dari ragi tempe mengeluarkan enzim protease dan lipase yang memecah protein dan lemak kedelai menjadi potongan yang lebih mudah dicerna, sambil merajut kedelai dengan benang-benang putih dalam ±36 jam pada suhu hangat. **Tapai**: ragi tapai mengubah pati singkong menjadi gula (enzim amilase), lalu sebagian gula menjadi alkohol, sehingga rasanya manis dan sedikit menyengat. **Daun pepaya**: nenek kita membungkus daging alot dengan daun pepaya karena getahnya mengandung enzim papain yang memotong protein daging. Semua resep ini diperam di tempat hangat, bukan di kulkas. Sekarang kamu tahu alasannya!

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1913, dokter dan biokimiawan Kanada **Maud Menten** bersama Leonor Michaelis di Berlin mengukur laju enzim invertase memecah sukrosa, reaksi yang sama dengan percobaan Wilhelmy di 21.1. Persamaan Michaelis–Menten mereka masih dipakai di setiap laboratorium biokimia dan farmasi untuk menggambarkan bagaimana laju enzim "jenuh" bila substratnya berlimpah.

Kimia di sekitarmu

Kulkas & freezer

Pada ±4 °C reaksi pembusukan dan kerja mikroba melambat belasan kali; di freezer (−18 °C) hampir berhenti. Makanan awet tanpa pengawet.

Memeram buah

Etilena dari buah matang yang terkurung di karung menaikkan "konsentrasi pemicu", sehingga pisang, mangga, dan alpukat matang serentak.

Ikan asin

Garam dan sinar matahari menarik air dari daging ikan. Tanpa air bebas, bakteri dan enzim pengurai bekerja sangat lambat, jadi ikan tahan berbulan-bulan.

Konverter katalitik

Lapisan platina, paladium, dan rodium di knalpot mengubah CO, NO, dan sisa bensin menjadi CO_2, N_2, dan air dalam sepersekian detik.

Panci presto

Tekanan tinggi membuat air mendidih pada ±120 °C. Reaksi pelunakan daging rendang atau iga berjalan beberapa kali lebih cepat.

Kembang api

Serbuk logam dan zat pengoksidasi digiling sangat halus dan dicampur rapat: luas permukaan raksasa membuat reaksinya selesai dalam sekejap.

Cek Cepat

Mengapa serbuk pualam bereaksi lebih cepat dengan asam klorida daripada bongkahan pualam bermassa sama?

- Serbuk lebih ringan sehingga lebih lincah bergerak.
- Luas permukaannya lebih besar sehingga tumbukan per detik lebih banyak.
- Serbuk menurunkan energi aktivasi reaksi.
- Serbuk menaikkan suhu larutan.

Suatu reaksi orde satu memiliki waktu paruh 10 menit. Berapa persen pereaksi yang tersisa setelah 30 menit?

- 50%
- 25%
- 12,5%
- 33%

Katalis mempercepat reaksi dengan cara ...

- menyediakan jalur reaksi lain dengan energi aktivasi lebih rendah
- menaikkan energi kinetik rata-rata partikel
- mengubah ΔH reaksi menjadi lebih negatif
- menambah jumlah pereaksi

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: balapan tablet effervescent

Bahan: 4 tablet vitamin C effervescent yang sama jenisnya, 4 gelas bening, air es, air keran, air hangat (±45 °C, bukan air mendidih), gelas takar, plastik klip dan sendok untuk menggerus, pisau dapur kecil, stopwatch HP, termometer dapur (bila ada).

1. Isi dua gelas dengan 150 mL air keran. Masukkan tablet utuh ke gelas pertama dan tablet yang sudah digerus halus (di dalam plastik klip, ditekan dengan sendok) ke gelas kedua. Catat waktu sampai gelembung berhenti.
2. Isi dua gelas lain dengan 150 mL air es dan 150 mL air hangat. Masukkan satu tablet utuh ke masing-masing dan catat waktunya. (Data tablet utuh di air keran dari langkah 1 menjadi pembanding suhu kamar.)
3. Jangan mengaduk. Hitung "laju relatif" $1/t$ untuk setiap gelas, lalu urutkan dari yang tercepat.

Keselamatan: minta orang dewasa menuangkan air hangat dan pastikan suhunya tidak lebih dari ±50 °C. Jangan menutup gelas atau botol saat tablet bereaksi, karena gas bisa membuat tutupnya terlontar. Jangan meminum larutan percobaan: kamu memakai beberapa tablet sekaligus sehingga dosis vitamin C dan natriumnya berlebihan. Hati-hati memakai pisau. Buang larutan ke wastafel dengan air mengalir dan lap tumpahan agar lantai tidak licin.

Pertanyaan: Gelas mana yang tercepat? Apakah gelembung total dari tablet serbuk lebih banyak daripada tablet utuh? Jelaskan hasilmu dengan teori tumbukan dan kurva Maxwell–Boltzmann.

RINGKASAN KILAT

Bab 21 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan arti **laju reaksi**, cara mengukurnya, serta membedakan laju rata-rata dan laju sesaat
- memakai **teori tumbukan**, **energi aktivasi**, dan kurva **Maxwell–Boltzmann** untuk menjelaskan pengaruh konsentrasi, luas permukaan, suhu, dan katalis
- menentukan **persamaan laju**, **orde reaksi**, dan satuan tetapan laju dari data laju awal
- menghitung **waktu paruh** reaksi orde satu, misalnya sisa obat dalam darah
- memakai **persamaan Arrhenius** dan menjelaskan **mekanisme reaksi**, tahap penentu laju, serta kerja **enzim**

Istilah kunci

Laju reaksi · laju rata-rata · laju sesaat · tumbukan efektif · Energi aktivasi · kompleks teraktivasi · distribusi Maxwell–Boltzmann · Katalis · katalis homogen · katalis heterogen · enzim · persamaan laju · tetapan laju · orde reaksi · metode laju awal · Waktu paruh

Rumus penting

$$t_2 = \frac{t_1}{n^{(T_2 - T_1)/10}}$$

Aturan kenaikan suhu (perkiraan cepat). Setiap suhu naik 10 °C, laju menjadi n kali, sehingga waktu reaksinya menjadi 1/n kali.

$$v = k\,[\mathrm{A}]^m\,[\mathrm{B}]^n$$

Persamaan laju. Laju sama dengan tetapan laju dikali konsentrasi setiap pereaksi yang dipangkatkan ordenya.

$$[\mathrm{A}]_t = [\mathrm{A}]_0\, e^{-k\,t}$$

Peluruhan orde satu. Pada reaksi orde satu, dalam selang waktu yang sama selalu hilang persentase yang sama, bukan jumlah yang sama.

$$C = C_0\left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Sisa obat dalam darah. Setiap lewat satu waktu paruh, kadar obat tinggal separuhnya.

$$\frac{k_2}{k_1} = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right]$$

Persamaan Arrhenius (dua suhu). Makin besar energi aktivasi, makin peka laju terhadap perubahan suhu.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Laju reaksi biasanya tidak tetap.
- "Suhu naik 10 °C, laju pasti tepat dua kali" itu keliru.
- "Katalis tidak ikut bereaksi sama sekali" itu keliru.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=21

🧩 Teka-teki untuk Bab 22

Di dalam botol minuman bersoda yang tertutup rapat, molekul $\mathrm{CO_2}$ terus-menerus keluar dari larutan menjadi gas dan masuk kembali dari gas ke larutan. Anehnya, tekanan di dalam botol tetap, dan jumlah gelembung tidak bertambah atau berkurang. Apakah reaksinya sudah berhenti?

▼ **Intip petunjuk**

Tidak berhenti! Laju $\mathrm{CO_2}$ keluar dari larutan sama persis dengan laju $\mathrm{CO_2}$ masuk kembali. Dua laju yang sama besar dan berlawanan arah membuat semuanya tampak diam. Keadaan "sibuk tetapi tampak tenang" ini disebut **kesetimbangan dinamis**, tema Bab 22. Kamu akan melihat bahwa katalis mempercepat kedua arah sama besar, sehingga tidak menggeser kesetimbangan.

22 Kesetimbangan Kimia: Sibuk tetapi Tampak Diam

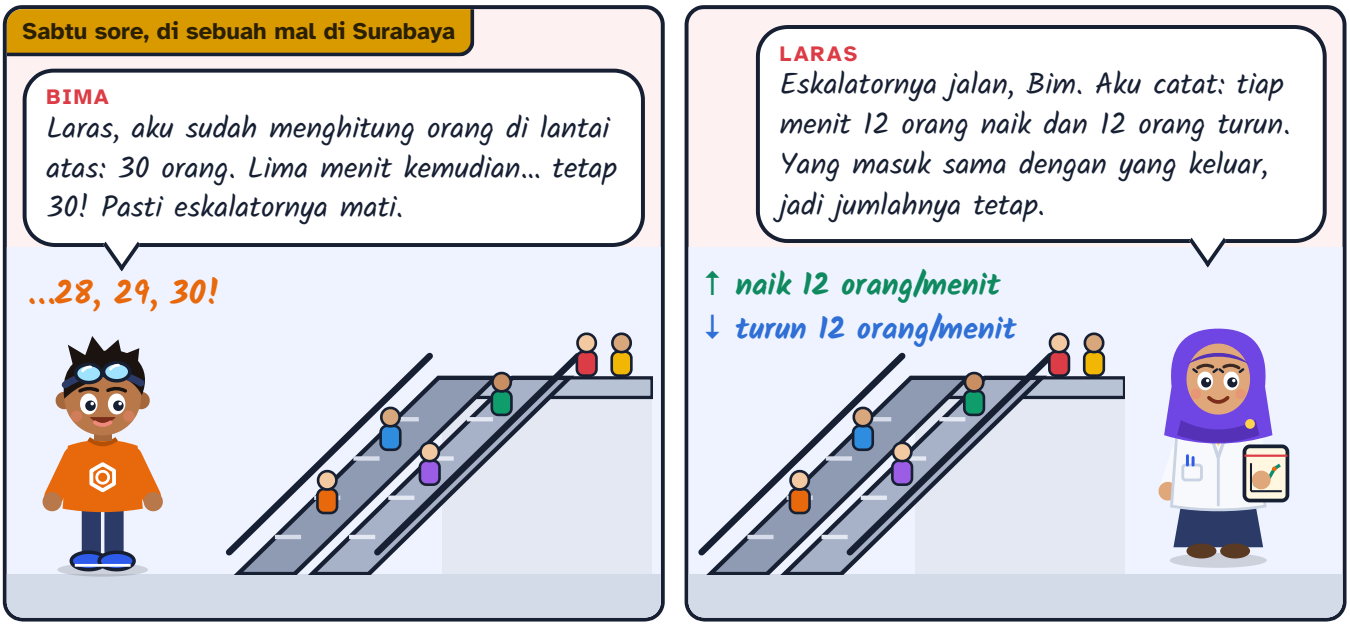
Sebotol minuman bersoda di kulkas tampak tenang. Padahal setiap detik miliaran molekul CO_2 lepas dari cairan dan larut kembali. Selamat datang di dunia reaksi yang tidak pernah benar-benar berhenti.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **reaksi reversibel** dan **kesetimbangan dinamis** pada tingkat partikel;
- menuliskan ungkapan **Kc** dan **Kp** (termasuk kesetimbangan heterogen) lalu menghitung nilainya;
- memakai **kuosien reaksi Q** untuk meramalkan arah reaksi;
- meramalkan pengaruh konsentrasi, tekanan, suhu, dan katalis dengan **asas Le Chatelier**;
- menjelaskan kondisi kompromi **proses Haber–Bosch** dan **proses kontak**, serta menghitung komposisi setimbang dengan **tabel ICE**.

MISTERI ESKALATOR

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Sebotol minuman bersoda tertutup sudah semalaman di kulkas. Tekanan gas di atas cairannya tetap. Apa yang terjadi pada molekul CO_2 di dalam botol?

- Tidak ada lagi CO_2 yang berpindah. Semuanya berhenti karena sudah setimbang.
- Semua CO_2 sudah larut, jadi ruang di atas cairan kosong.
- CO_2 terus lepas dari cairan dan terus larut kembali, dengan laju yang sama.
- CO_2 hanya terus lepas dari cairan, tetapi sangat lambat.

Jawabannya: terus berpindah ke dua arah dengan laju yang sama. Tekanan tetap bukan karena molekul berhenti, tetapi karena jumlah yang lepas setiap detik sama dengan jumlah yang larut. Inilah *kesetimbangan dinamis*, persis seperti eskalator di komik.

22.1 Reaksi bolak-balik dan kesetimbangan dinamis

Banyak reaksi yang kamu kenal hanya berjalan satu arah. Kertas yang terbakar tidak bisa kembali menjadi kertas, dan telur matang tidak bisa mentah lagi. Namun banyak reaksi lain dapat berjalan **dua arah**. Contoh klasik ada di laboratorium sekolah: kristal terusi biru berubah menjadi serbuk putih bila dipanaskan, lalu kembali biru bila ditetesi air.

$$\underset{\text{biru}}{\mathrm{CuSO_4 \cdot 5\,H_2O\,(s)}} \underset{\text{ditetesi air}}{\overset{\text{dipanaskan}}{\rightleftharpoons}} \underset{\text{putih}}{\mathrm{CuSO_4\,(s)}} + \mathrm{5\,H_2O}$$

DEFINISI · REAKSI REVERSIBEL

Reaksi reversibel (reaksi bolak-balik) adalah reaksi yang dapat berlangsung ke dua arah: dari pereaksi menjadi produk (**reaksi maju**) dan dari produk kembali menjadi pereaksi (**reaksi balik**). Persamaannya ditulis dengan panah dua arah $\rightleftharpoons$.

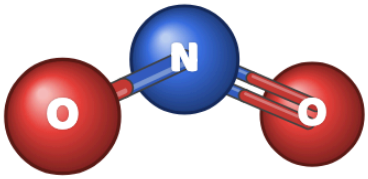
Bahasa sederhana · Bayangkan dua kelompok anak bermain lempar bola di lapangan yang dibatasi jaring. Kelompok kiri terus melempar bola ke kanan, kelompok kanan terus melempar ke kiri. Kalau kecepatan melempar keduanya sama, jumlah bola di setiap sisi tetap, padahal bola terus beterbangan. Kimiawan menyebut keadaan seperti ini **setimbang**.

Contoh yang warnanya bisa kamu lihat adalah gas nitrogen dioksida, $\mathrm{NO_2}$, yang berwarna cokelat kemerahan. Dua molekul $\mathrm{NO_2}$ dapat bergandengan menjadi dinitrogen tetroksida, $\mathrm{N_2O_4}$, yang tidak berwarna:

$$\underset{\text{cokelat}}{\mathrm{2\,NO_2\,(g)}} \rightleftharpoons \underset{\text{tak berwarna}}{\mathrm{N_2O_4\,(g)}} \qquad \Delta H = -57\ \mathrm{kJ/mol}$$

Masukkan $\mathrm{NO_2}$ murni ke dalam tabung tertutup. Mula-mula warna cokelatnya memudar karena sebagian $\mathrm{NO_2}$ berubah menjadi $\mathrm{N_2O_4}$. Beberapa saat kemudian warnanya berhenti berubah. Apakah reaksinya selesai? **Tidak!** Molekul $\mathrm{NO_2}$ masih terus bergandengan dan molekul $\mathrm{N_2O_4}$ masih terus berpisah. Keduanya hanya berlangsung *dengan laju yang sama*.

MOLEKUL 3D **Mengapa $\mathrm{NO_2}$ suka berpasangan?**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Nitrogen dioksida NO_2 Mr ≈ 46,01

Gas cokelat kemerahan. Atom N menyimpan satu elektron tak berpasangan (radikal), sehingga NO_2 mudah bergandengan dengan NO_2 lain. Kedua ikatan N–O sebenarnya setara karena resonansi (±1,20 Å); sudut O–N–O ±134°.

Bandingkan NO_2 dan N_2O_4. Ketuk kedua atom N pada N_2O_4 untuk mengukur panjang ikatan N–N, lalu bandingkan dengan ikatan N–O. Ikatan yang panjang biasanya lemah dan mudah putus. Amonia dan belerang trioksida adalah "bintang" subbab 22.5.

Mengapa laju kedua arah akhirnya sama? Pada awalnya hanya ada pereaksi, jadi reaksi maju berlangsung cepat dan reaksi balik belum terjadi. Semakin banyak produk terbentuk, pereaksi berkurang sehingga reaksi maju melambat, sedangkan produk bertambah sehingga reaksi balik makin cepat. Suatu saat keduanya bertemu di tengah: **laju maju = laju balik**.

DEFINISI · KESETIMBANGAN DINAMIS

Kesetimbangan dinamis adalah keadaan sistem tertutup ketika **laju reaksi maju sama dengan laju reaksi balik**. Konsentrasi setiap zat tidak berubah lagi (tetapi tidak harus sama), dan sifat yang teramati seperti warna, tekanan, dan massa jenis juga tetap, padahal kedua reaksi terus berlangsung di tingkat partikel.

- **Sistem tertutup**: tidak ada zat yang keluar atau masuk. Botol soda yang dibuka bukan sistem tertutup.
- **Dinamis**: reaksi tidak berhenti; partikel terus berubah ke dua arah.
- **Dapat dicapai dari dua arah**: mulai dari pereaksi saja atau dari produk saja, sistem tetap menuju keadaan setimbang yang sama (pada suhu yang sama).

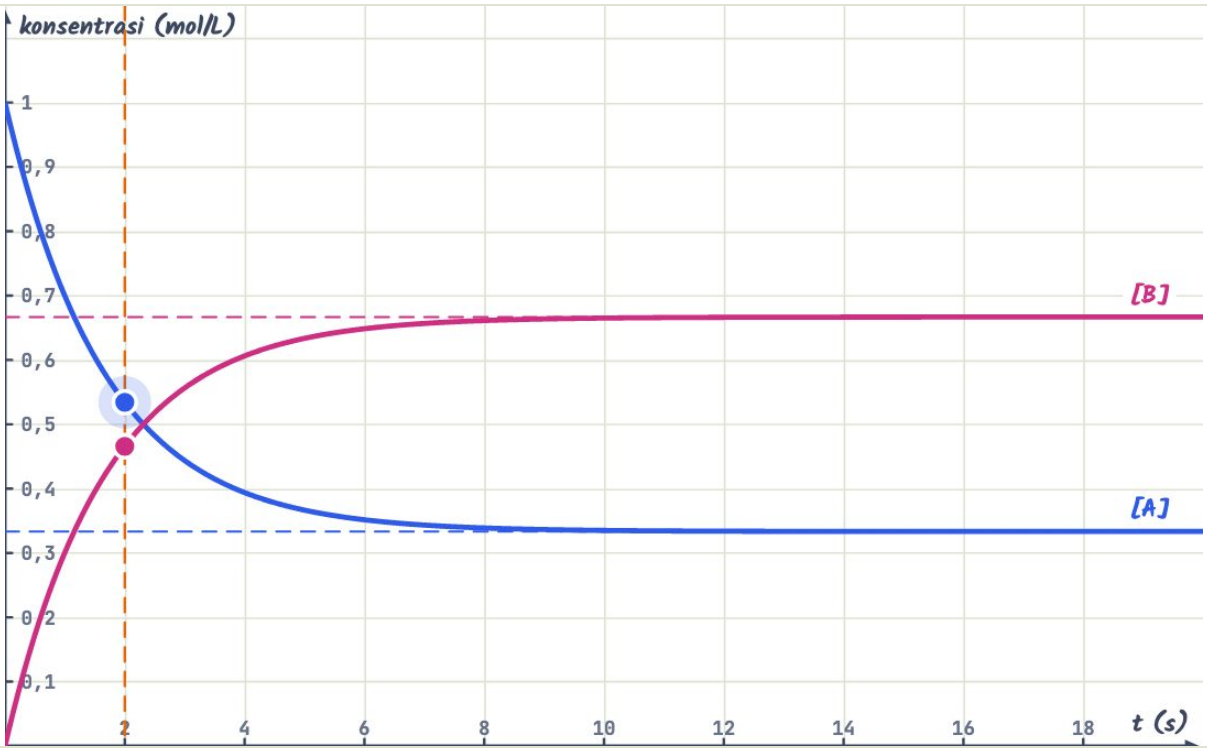
GRAFIK HIDUP

Menuju setimbang: atur laju maju dan laju balik

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22

$$\mathrm{A} \rightleftharpoons \mathrm{B} \qquad v_{\text{maju}} = k_f[\mathrm{A}], \quad v_{\text{balik}} = k_b[\mathrm{B}]$$

$$t = 2\ \text{s}: \quad [\mathrm{A}] = 0{,}53, \quad [\mathrm{B}] = 0{,}47\ \text{mol/L}$$



➡️ **v maju > v balik: B masih bertambah**

v maju	v balik	K = kf/kb	[B]/[A] setimbang
0,214 mol/(L·s)	0,093 mol/(L·s)	2	2

Seret titik biru sepanjang waktu. Garis putus-putus menunjukkan konsentrasi setimbang. Perhatikan: [A] dan [B] berhenti berubah, tetapi **v maju** dan **v balik** tidak nol, melainkan sama besar. Coba buat [A] awal = 0 dan [B] awal = 1: apakah garis putus-putusnya sama? Bila k maju dua kali k balik, [B] setimbang selalu dua kali [A]. Rasio itulah tetapan kesetimbangan.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

"Setimbang" **tidak** berarti "sama banyak" dan **tidak** berarti "berhenti". Yang sama adalah **laju** reaksi maju dan balik. Konsentrasi pereaksi dan produk hanya *tetap*; nilainya bisa sangat berbeda, misalnya 1 : 2 seperti di grafik atau bahkan 1 : 1.000.000.

TAMU DARI MASA LALU

Kimiawan Prancis **Claude Louis Berthollet** ikut ekspedisi Napoleon ke Mesir (1798–1801). Di tepi danau-danau garam ia melihat endapan natrium karbonat. Ini aneh, sebab di laboratorium reaksinya justru berjalan sebaliknya:

$$\mathrm{Na_2CO_3 + CaCl_2 \longrightarrow CaCO_3\downarrow + 2\,NaCl}$$

Berthollet menyadari bahwa di danau itu garam dapur sangat berlimpah dan airnya terus menguap, sehingga reaksi "dipaksa" berjalan mundur. Kesimpulannya revolusioner: **arah reaksi bergantung pada jumlah zat**, dan reaksi bisa bolak-balik.

22.2 Tetapan kesetimbangan: Kc dan Kp

Tebak Dulu!

Hidrogen dan uap iodin bereaksi pada 430 °C: $\mathrm{H_2\,(g) + I_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,HI\,(g)}$. Laras mencoba empat campuran awal yang berbeda. Apa yang sama pada keempat campuran setelah setimbang?

- Konsentrasi HI-nya selalu sama.
- Konsentrasi $\mathrm{H_2}$, $\mathrm{I_2}$, dan HI menjadi sama besar.
- Tidak ada yang sama karena campuran awalnya berbeda.
- Nilai $[\mathrm{HI}]^2/([\mathrm{H_2}][\mathrm{I_2}])$ selalu sekitar 54.

Jawabannya: hasil bagi konsentrasinya. Lihat tabel di bawah. Konsentrasi setimbang setiap percobaan berbeda-beda, tetapi satu kombinasi khusus selalu menghasilkan angka yang hampir sama. Angka ajaib itu disebut *tetapan kesetimbangan*.

Percobaan	$[H_2]$ awal	$[I_2]$ awal	[HI] awal	$[H_2]$ setimbang	$[I_2]$ setimbang	[HI] setimbang	$\frac{[HI]^2}{[H_2][I_2]}$
1	1,00	1,00	0	0,213	0,213	1,57	**54,3**
2	2,00	1,00	0	1,06	0,0612	1,88	**54,5**
3	0	0	1,00	0,107	0,107	0,787	**54,1**
4	0,500	0,500	0,500	0,160	0,160	1,18	**54,4**

Semua konsentrasi dalam mol/L, pada 430 °C. Percobaan 3 bahkan dimulai dari HI saja (dari arah balik), tetapi hasil baginya tetap ±54. Pola ini ditemukan pada 1864 oleh dua ilmuwan Norwegia, **Cato Guldberg** dan **Peter Waage**, dan disebut **hukum aksi massa**.

HUKUM AKSI MASSA

Untuk reaksi setara $a\,\mathrm{A} + b\,\mathrm{B} \rightleftharpoons c\,\mathrm{C} + d\,\mathrm{D}$ pada suhu tertentu:

$$K_c = \frac{[\mathrm{C}]^c\,[\mathrm{D}]^d}{[\mathrm{A}]^a\,[\mathrm{B}]^b}$$

dengan $[\,]$ = konsentrasi molar saat setimbang (mol/L). **Tetapan kesetimbangan** K_c hanya bergantung pada **suhu**, tidak bergantung pada jumlah zat awal.

Aturan menulis ungkapan K:

1. **Produk di atas** (pembilang), **pereaksi di bawah** (penyebut).
2. Setiap konsentrasi dipangkatkan dengan **koefisien** pada persamaan yang sudah setara.
3. Hanya zat berwujud **gas (g)** dan **larutan (aq)** yang ditulis. **Padatan (s)** dan **cairan murni (l)** tidak ditulis, karena "konsentrasinya" tetap berapa pun jumlahnya. Kesetimbangan yang melibatkan lebih dari satu wujud disebut **kesetimbangan heterogen**.

TRIK KAK TIRTA

"Padatan dan cairan murni tidak diundang ke pesta K." Sepotong kapur sebesar kelereng dan sebesar batu bata sama-sama padatan murni: kerapatan partikelnya sama, jadi tidak mengubah apa pun. Dan ingat bentuk piala juara: **pemenangnya (produk) diangkat ke atas**.

CONTOH — Menulis ungkapan Kc

Tuliskan ungkapan K_c untuk (a) $\mathrm{N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,NH_3\,(g)}$; (b) $\mathrm{CaCO_3\,(s) \rightleftharpoons CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$; (c) $\mathrm{2\,SO_2\,(g) + O_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,SO_3\,(g)}$.

1. (a) Produk $\mathrm{NH_3}$ koefisien 2; pereaksi $\mathrm{N_2}$ koefisien 1 dan $\mathrm{H_2}$ koefisien 3: $K_c = \dfrac{[\mathrm{NH_3}]^2}{[\mathrm{N_2}][\mathrm{H_2}]^3}$.
2. (b) $\mathrm{CaCO_3}$ dan CaO padatan, jadi tidak ditulis: $K_c = [\mathrm{CO_2}]$. Di tanur kapur, tekanan $\mathrm{CO_2}$ inilah yang menentukan apakah kapur terurai.
3. (c) $K_c = \dfrac{[\mathrm{SO_3}]^2}{[\mathrm{SO_2}]^2[\mathrm{O_2}]}$.

(a) $\dfrac{[\mathrm{NH_3}]^2}{[\mathrm{N_2}][\mathrm{H_2}]^3}$ · (b) $[\mathrm{CO_2}]$ · (c) $\dfrac{[\mathrm{SO_3}]^2}{[\mathrm{SO_2}]^2[\mathrm{O_2}]}$. Koefisien menjadi pangkat, padatan menghilang.

RUMUS HIDUP

Hukum aksi massa: Kc (atau Q) pabrik amonia

$$K_c = \frac{[NH_3]^2}{[N_2]\,[H_2]^3}$$

Konsentrasi produk dipangkatkan koefisiennya di atas, konsentrasi pereaksi dipangkatkan koefisiennya di bawah. Dengan konsentrasi setimbang hasilnya Kc; dengan konsentrasi sembarang hasilnya Q.

$[N_2]$ Konsentrasi N_2 mol/L

$[H_2]$ Konsentrasi H_2 mol/L

$[NH_3]$ Konsentrasi NH_3 mol/L

K_c atau Q Hasil bagi $(mol/L)^{-2}$

HASIL BAGI

0,0607

$(mol/L)^{-2}$

⚖ **Q ≈ K: campuran ini setimbang pada 500 °C**

Hasil bagi = **0,0607**. Pada 500 °C, Kc reaksi ini ±0,060, jadi Q ÷ K = **1,011**.

Cek satuan: $(mol/L)^2 \div [(mol/L)\cdot(mol/L)^3] = (mol/L)^{-2}$ ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KST-AKSI-MASSA

Besar kecilnya K memberi tahu kita seberapa jauh reaksi berjalan sebelum "puas":

Nilai K	Artinya	Contoh (25 °C)
sangat besar ($> 10^3$)	hampir tuntas, campuran setimbang kaya produk	$H_2 + Cl_2 \rightleftharpoons 2\,HCl$, K ≈ 10^{33}
sekitar 1	pereaksi dan produk sama-sama berarti jumlahnya	$N_2O_4 \rightleftharpoons 2\,NO_2$, $K_c \approx 4{,}6 \times 10^{-3}$ (mendekati 1 bila dipanaskan)
sangat kecil ($< 10^{-3}$)	hampir tidak bereaksi, campuran kaya pereaksi	$N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2\,NO$, K ≈ 10^{-30} (untung, udara tidak berubah menjadi gas beracun!)

Untuk gas, kimiawan sering lebih mudah mengukur **tekanan** daripada konsentrasi. Tetapan yang memakai tekanan parsial disebut K_p. Contoh: $K_p = \dfrac{p_{\mathrm{NH_3}}^2}{p_{\mathrm{N_2}}\, p_{\mathrm{H_2}}^3}$. Karena $p = \frac{n}{V}RT = [\,]\,RT$, kedua tetapan dihubungkan oleh:

$$K_p = K_c\,(RT)^{\Delta n} \qquad \Delta n = (\text{mol gas produk}) - (\text{mol}$$

RUMUS HIDUP **Kp dari Kc**

$$K_p = K_c\,(RT)^{\Delta n}$$

Ubah 'bahasa konsentrasi' menjadi 'bahasa tekanan' dengan faktor RT yang dipangkatkan selisih mol gas.

K_c Tetapan Kc

T Suhu mutlak K

Δn Selisih mol gas mol

K_p Tetapan Kp atm pangkat Δn

TETAPAN KP

1,4897 × 10⁻⁵

atm pangkat Δn

Δn < 0: Kp lebih kecil daripada Kc (RT > 1)

RT = **63,463**, sehingga Kp = **1,4897 × 10⁻⁵**. Perbandingan Kp ÷ Kc = **2,483 × 10⁻⁴**.

Cek satuan: R = 0,0821 L·atm/(mol·K): tekanan dalam atm, konsentrasi dalam mol/L

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KST-KP-KC

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Δn hanya menghitung mol **gas**. Untuk $\mathrm{CaCO_3\,(s) \rightleftharpoons CaO\,(s) + CO_2\,(g)}$, $\Delta n = 1 - 0 = +1$, bukan $2 - 1$. Pakai juga $R = 0{,}0821$ L·atm/(mol·K) dan suhu dalam kelvin, bukan $R = 8{,}314$.

KERJAKAN BERSAMA

Kp di reaktor amonia

Pada 500 °C, $K_c = 6{,}0 \times 10^{-2}$ untuk $\mathrm{N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,NH_3\,(g)}$. Hitung K_p (tekanan dalam atm).

1. Suhu mutlak: $T = 500 + 273 = 773$ K.
2. $\Delta n = 2 - (1 + 3) = -2$.
3. $RT = 0{,}0821 \times 773 = 63{,}5$.
4. $K_p = 6{,}0 \times 10^{-2} \times (63{,}5)^{-2} = \dfrac{0{,}060}{4{,}03 \times 10^{3}} = 1{,}5 \times 10^{-5}$.

$K_p \approx 1{,}5 \times 10^{-5}\ \mathrm{atm^{-2}}$. Nilainya kecil sekali: pada 500 °C dan tekanan rendah, campuran setimbang hanya berisi sedikit amonia. Itulah tantangan pabrik pupuk di subbab 22.5.

ADU CEPAT

Hitung Kc secepat kilat

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Kc = $[HI]^2 \div ([H_2] \times [I_2])$. Jangan lupa: [HI] dikuadratkan karena koefisiennya 2.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA PADATAN "BERNILAI 1"? AKTIVITAS DAN K TANPA SATUAN

Dalam termodinamika, yang masuk ke K sebenarnya adalah **aktivitas** a, yaitu "konsentrasi efektif" dibagi keadaan standarnya: $a = [\,]/(1\ \mathrm{mol/L})$ untuk larutan dan $a = p/(1\ \mathrm{bar})$ untuk gas. Padatan murni dan cairan murni berada *tepat* pada keadaan standarnya, sehingga $a = 1$ dan "menghilang" dari ungkapan K.

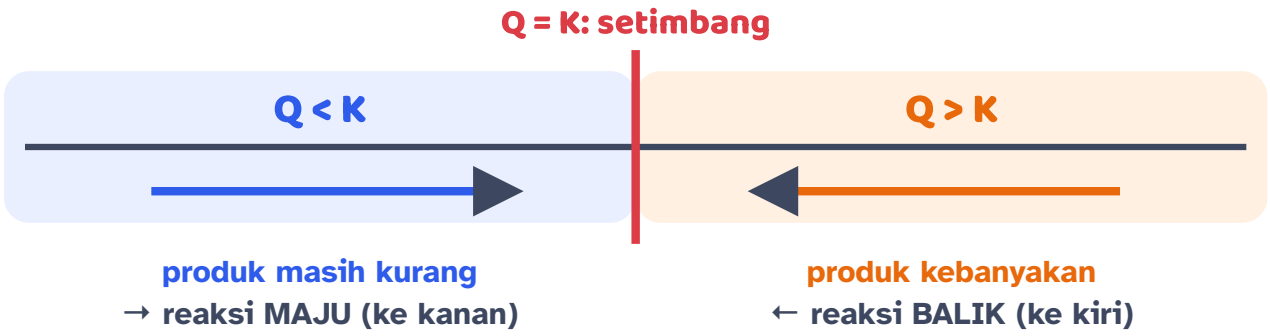
Karena aktivitas tidak bersatuan, K termodinamika juga **tanpa satuan**. Buku sekolah sering menuliskan satuan K_c seperti $(\mathrm{mol/L})^{\Delta n}$ agar perhitungan terasa konsisten. Keduanya boleh, asalkan kamu tahu yang mana yang dipakai, terutama saat memasukkan K ke $\Delta G^\circ = -RT \ln K$ (subbab 22.6).

22.3 Kuosien reaksi Q: ke mana reaksi bergerak?

K hanya berlaku untuk keadaan setimbang. Bagaimana dengan campuran yang *belum* setimbang, misalnya sesaat setelah gas dimasukkan ke reaktor? Kita hitung angka yang bentuknya persis sama, tetapi memakai konsentrasi **saat itu**.

DEFINISI · KUOSIEN REAKSI

Kuosien reaksi Q adalah hasil bagi konsentrasi (atau tekanan parsial) dengan bentuk yang sama seperti ungkapan K, tetapi memakai nilai pada **sembarang saat**. Saat setimbang, $Q = K$.



Q selalu "berjalan" menuju K. Bila Q lebih kecil, reaksi maju menambah produk sampai Q naik menjadi K. Bila Q lebih besar, reaksi balik bekerja sampai Q turun menjadi K.

ATURAN · MEMBANDINGKAN Q DAN K

$Q < K$: reaksi bergeser ke **kanan** (membentuk produk).
$Q = K$: sistem **setimbang**, tidak ada perubahan bersih.
$Q > K$: reaksi bergeser ke **kiri** (membentuk pereaksi).

KERJAKAN BERSAMA **Ke mana campuran ini bergerak?**

Pada 430 °C, $K_c = 54{,}3$ untuk $\mathrm{H_2\,(g) + I_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,HI\,(g)}$. Laras mencampur gas sehingga $[\mathrm{H_2}] = 0{,}10$, $[\mathrm{I_2}] = 0{,}20$, dan $[\mathrm{HI}] = 1{,}50$ mol/L. Apakah campuran ini setimbang? Jika tidak, ke mana reaksi bergeser?

1. Hitung Q dengan bentuk yang sama seperti K: $Q = \dfrac{(1{,}50)^2}{(0{,}10)(0{,}20)} = \dfrac{2{,}25}{0{,}020} = 112{,}5.$
2. Bandingkan: $Q = 112{,}5 > K = 54{,}3.$
3. Q terlalu besar, artinya produk (HI) kebanyakan. Sebagian HI harus terurai.

Belum setimbang. Reaksi bergeser ke kiri: HI terurai menjadi $\mathrm{H_2}$ dan $\mathrm{I_2}$ sampai Q turun menjadi 54,3.

JEMBATAN KELEDAI KIMO

"**Q kecil, ke Kanan; Q besar, ke Kiri**." Bayangkan Q sebagai anak yang ingin mencapai K di garis bilangan: ia selalu berjalan menuju K, tidak pernah menjauh.

22.4 Asas Le Chatelier: sistem yang suka melawan

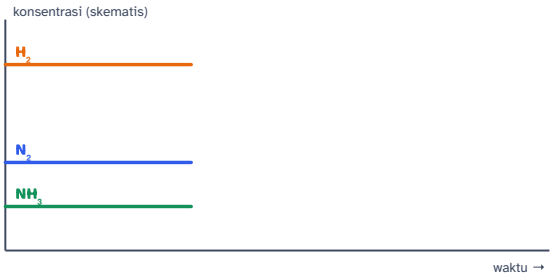
Apa yang terjadi bila kesetimbangan "diganggu", misalnya dengan menambah zat, memampatkan gas, atau memanaskan? Pada 1884 kimiawan Prancis **Henry Le Chatelier** merangkum jawabannya dalam satu kalimat yang sangat berguna.

> ☆ **ASAS LE CHATELIER**
>
> Jika sistem yang setimbang diberi gangguan (perubahan konsentrasi, tekanan atau volume, atau suhu), sistem akan **bergeser untuk mengurangi pengaruh gangguan itu** sampai tercapai kesetimbangan baru.

Bahasa sederhana · Kesetimbangan itu seperti jungkat-jungkit yang selalu ingin datar. Kalau ada anak yang naik di satu sisi, teman-teman di atas papan bergeser ke sisi lain supaya papan kembali datar. Sistem kimia juga "bergeser" melawan setiap gangguan.

Mengubah konsentrasi

Menambah pereaksi membuat $Q < K$, jadi reaksi bergeser ke kanan dan memakai sebagian tambahan itu. Mengambil produk juga membuat $Q < K$, sehingga produk dibentuk lagi. Inilah trik pabrik amonia: amonia terus dicairkan dan dikeluarkan supaya reaksi terus berjalan ke kanan.



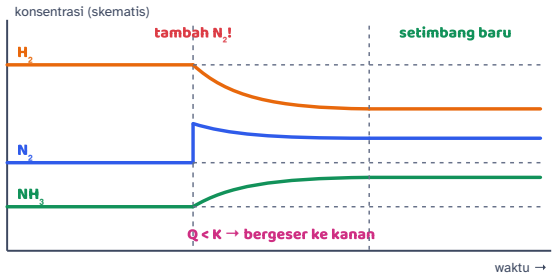
Langkah 1. Sistem $\mathrm{N_2} + 3\,\mathrm{H_2} \rightleftharpoons 2\,\mathrm{NH_3}$ sudah setimbang: ketiga garis datar.



Langkah 2. Gangguan! $\mathrm{N_2}$ ditambahkan tiba-tiba, jadi $[\mathrm{N_2}]$ melonjak. Penyebut ungkapan Q membesar, sehingga $Q < K$.



Langkah 3. Sistem melawan: $\mathrm{N_2}$ dan $\mathrm{H_2}$ bereaksi, $\mathrm{NH_3}$ bertambah. Perhatikan perbandingan perubahannya 1 : 3 : 2, sesuai koefisien.



Langkah 4. Setimbang baru (Q = K lagi, nilai K tidak berubah). Garis putus-putus = tingkat semula: $\mathrm{NH_3}$ lebih banyak, $\mathrm{H_2}$ lebih sedikit, dan $\mathrm{N_2}$ tetap lebih tinggi daripada semula karena gangguan hanya dikurangi, tidak dihapus.

Mengubah tekanan (volume)

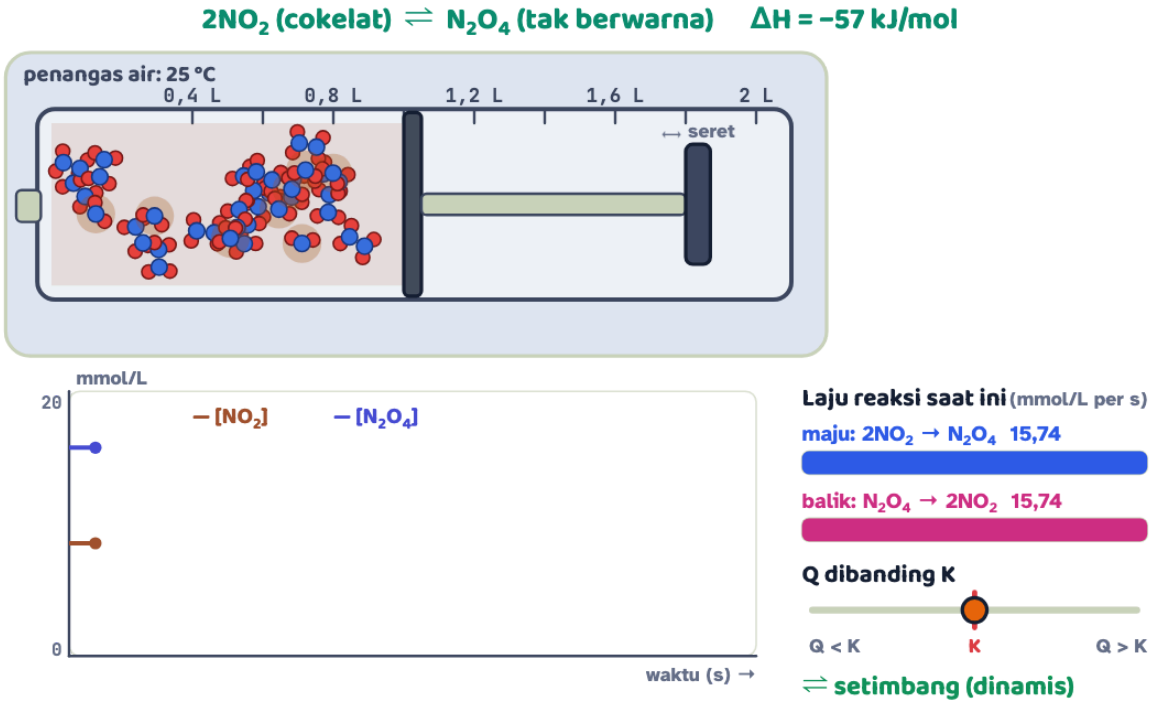
Memampatkan campuran gas (volume diperkecil) menaikkan tekanan. Sistem melawan dengan bergeser ke sisi yang **jumlah mol gasnya lebih sedikit**, karena lebih sedikit partikel berarti tekanan lebih kecil. Pada $2\,NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4$, 2 mol gas menjadi 1 mol, jadi pemampatan menggeser ke kanan. Bila jumlah mol gas di kedua sisi sama, seperti $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2\,HI$, tekanan tidak menggeser kesetimbangan.

Mengubah suhu

Suhu adalah satu-satunya gangguan yang **mengubah nilai K**. Anggap kalor sebagai "zat" dalam persamaan. Untuk reaksi eksoterm, kalor adalah produk: $2\,NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4 + \text{kalor}$. Memanaskan berarti "menambah produk", jadi sistem bergeser ke kiri (ke arah endoterm) dan K mengecil. Mendinginkan menggeser ke kanan dan K membesar.

LAB MINI **Suntikan NO_2: tekan, panaskan, dinginkan!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22



[NO_2]	[N_2O_4]	Q	Kc	Arah
0,0085 mol/L	0,0157 mol/L	217	217	setimbang ⇌

Warna gas
cokelat muda

Coba: (1) tekan ❄ **Rendam es**, lalu ♨ **Air mendidih**. Warna gas berubah ke mana, dan bagaimana dengan nilai K? (2) Seret pegangan suntikan ke kiri atau geser slider volume: warna langsung lebih gelap, lalu sedikit memudar. Mengapa ada dua tahap? (3) Tambah NO_2 atau N_2O_4, lalu perhatikan Q dibanding K dan batang laju maju/balik.

Gangguan	Sistem bergeser ke…	Nilai K
Menambah pereaksi / mengambil produk	kanan (produk)	tetap
Menambah produk / mengambil pereaksi	kiri (pereaksi)	tetap
Tekanan dinaikkan (volume diperkecil)	sisi dengan mol gas lebih sedikit	tetap
Tekanan diturunkan (volume diperbesar)	sisi dengan mol gas lebih banyak	tetap
Suhu dinaikkan	arah endoterm	**berubah** (turun untuk reaksi eksoterm)
Suhu diturunkan	arah eksoterm	**berubah** (naik untuk reaksi eksoterm)
Menambah katalis	tidak bergeser (setimbang lebih cepat tercapai)	tetap
Menambah gas mulia pada volume tetap	tidak bergeser (tekanan parsial tidak berubah)	tetap

Tebak Dulu!

Serbuk besi (katalis) ditambahkan ke campuran N_2, H_2, dan NH_3 yang sudah setimbang. Apa yang terjadi pada jumlah NH_3?

Bertambah, karena katalis mempercepat pembentukan NH_3.

Tetap, karena katalis mempercepat reaksi maju dan reaksi balik sama kuatnya.

Berkurang, karena katalis ikut bereaksi dengan NH_3.

Bertambah sedikit, lalu berkurang lagi.

Jawabannya: tetap. Katalis menurunkan energi aktivasi reaksi maju *dan* reaksi balik dengan besar yang sama. Keduanya dipercepat setara, jadi posisi kesetimbangan tidak bergeser. Gunanya katalis: kesetimbangan **lebih cepat tercapai**, dan di pabrik waktu adalah uang.

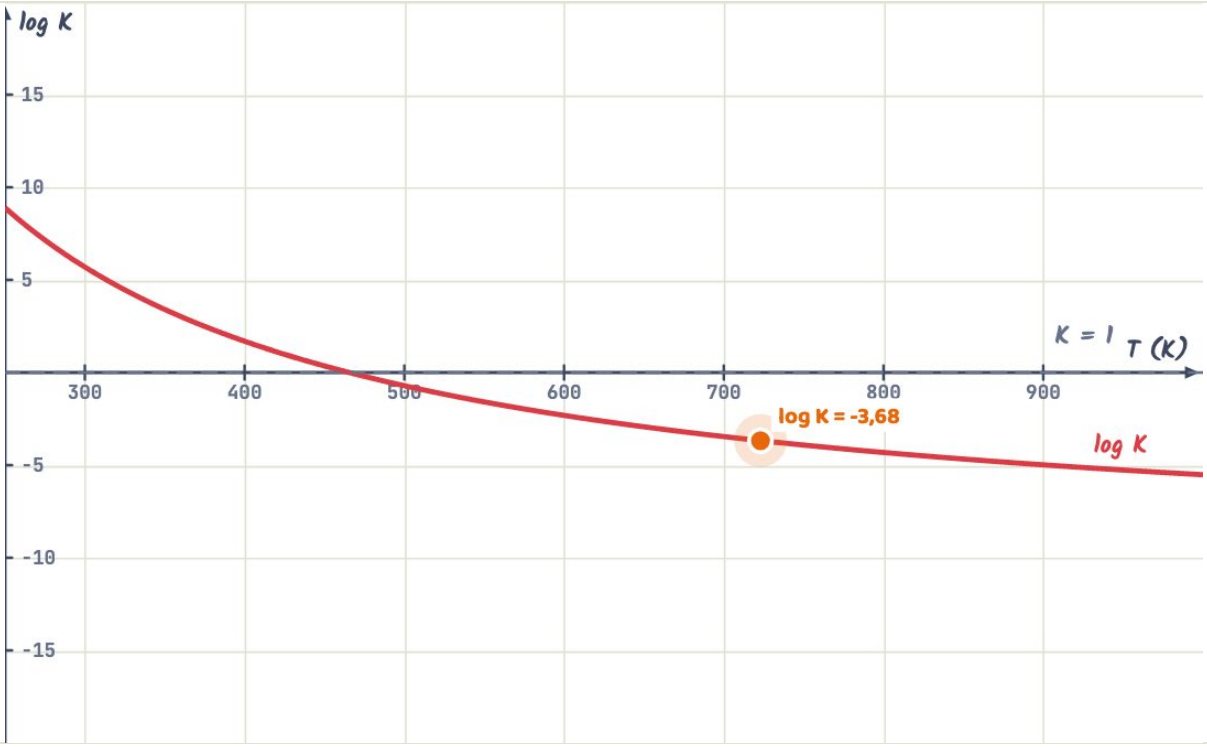
GRAFIK HIDUP

Suhu mengubah K: eksoterm vs endoterm

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22

$$\log K_T = \log K_{298} - \frac{\Delta H^\circ}{2{,}303\,R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)$$

$$\Delta H^\circ = -92\ \text{kJ/mol},\ T = 723\ \text{K}: \quad K \approx 10^{-3{,}68}$$



eksoterm: K turun bila suhu dinaikkan

log K	K
-3,68	2,099 × 10⁻⁴

Nilai awal mewakili sintesis amonia (ΔH° = −92 kJ/mol, K ≈ 6 × 10⁵ pada 25 °C). Seret titik oranye ke suhu reaktor (±723 K): K anjlok jutaan kali! Lalu ubah ΔH° menjadi positif (misalnya +181 kJ/mol untuk $N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2\,NO$ dengan log K ≈ −30): K naik pesat di suhu tinggi. Itulah sebabnya NO terbentuk di mesin kendaraan dan petir. (Perkiraan: ΔH° dianggap tetap.)

TRIK KAK TIRTA

Pikirkan sistem setimbang sebagai anak yang **selalu membantah**. Ditambah zat? Ia memakainya. Diambil zatnya? Ia membuatnya lagi. Ditekan? Ia mengecilkan jumlah mol gas. Dipanaskan? Ia "menyerap" kalor dengan bergeser ke arah endoterm. Diberi katalis? Ia hanya bekerja lebih cepat, tanpa berubah pendapat.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Hanya **suhu** yang mengubah nilai K. Menambah zat atau mengubah tekanan menggeser *posisi* kesetimbangan (perbandingan jumlah zat), tetapi K tetap. Katalis tidak menggeser apa pun dan tidak mengubah K. Gas mulia yang ditambahkan pada volume tetap juga tidak menggeser, karena tekanan parsial zat-zat yang bereaksi tidak berubah.

MITOS

"Saat setimbang, reaksi sudah berhenti."

FAKTA

Reaksi maju dan balik terus berlangsung dengan laju yang sama. Percobaan dengan isotop berat (misalnya deuterium) membuktikan atom terus berpindah dari pereaksi ke produk dan sebaliknya.

MITOS

"Saat setimbang, jumlah pereaksi sama dengan jumlah produk."

FAKTA

Yang sama adalah **lajunya**. Perbandingan konsentrasi ditentukan oleh K, yang bisa 10^{33} atau 10^{-30}.

MITOS

"Katalis menambah jumlah produk."

FAKTA

Katalis hanya mempercepat tercapainya kesetimbangan. Jumlah produk saat setimbang tetap sama, dengan atau tanpa katalis.

MITOS

"Memanaskan selalu menambah produk."

FAKTA

Bergantung pada ΔH. Untuk reaksi eksoterm seperti sintesis amonia, pemanasan justru **mengurangi** produk saat setimbang, walaupun reaksinya menjadi lebih cepat.

22.5 Kesetimbangan di pabrik: Haber–Bosch dan proses kontak

Udara mengandung 78% nitrogen, tetapi tanaman tidak bisa memakai gas $\mathrm{N_2}$ secara langsung karena ikatan rangkap tiganya sangat kuat. Tanaman butuh nitrogen dalam bentuk "terikat", misalnya amonia atau urea. Mengubah nitrogen udara menjadi amonia adalah salah satu reaksi terpenting dalam sejarah manusia:

$$\mathrm{N_2\,(g) + 3\,H_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,NH_3\,(g)} \qquad \Delta H = -92\ \mathrm{kJ/m}$$

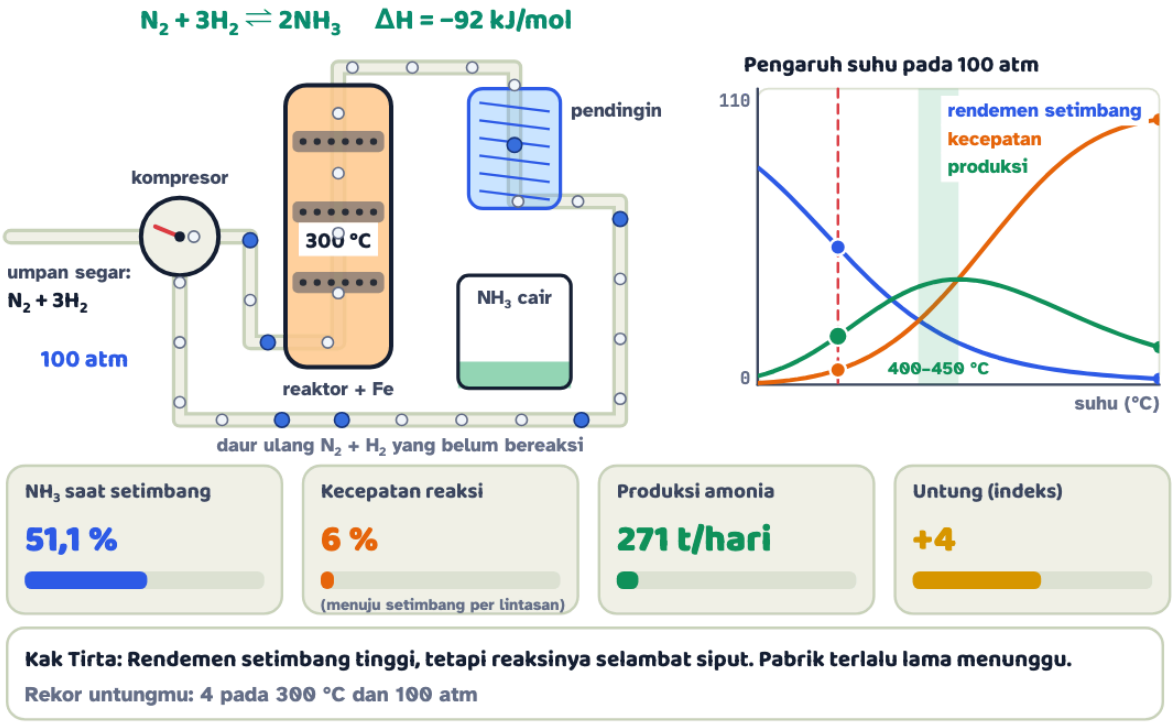
Bahan bakunya: N dari udara (udara dicairkan lalu didistilasi bertingkat, atau oksigennya dibakar habis) dan H dari gas alam yang direaksikan dengan uap air. Masalahnya, kesetimbangan ini "rewel". Mari kita baca dengan

asas Le Chatelier:

- **Suhu.** Reaksi maju eksoterm, jadi suhu *rendah* memberi rendemen amonia tinggi. Namun pada suhu rendah reaksinya sangat lambat. Kompromi: **±400–450 °C**.
- **Tekanan.** 4 mol gas menjadi 2 mol gas, jadi tekanan *tinggi* menggeser ke kanan dan juga mempercepat reaksi. Namun pipa dan kompresor bertekanan tinggi sangat mahal dan berisiko. Kompromi: **±150–250 atm**.
- **Katalis.** Besi (dengan sedikit kalium oksida dan aluminium oksida sebagai promotor) mempercepat tercapainya kesetimbangan tanpa menggesernya.
- **Mengambil produk.** Gas keluaran reaktor didinginkan sehingga amonia mencair dan terpisah. Gas N_2 dan H_2 yang belum bereaksi didaur ulang ke reaktor. Sekali lewat hanya ±15% yang bereaksi, tetapi dengan daur ulang hampir semuanya akhirnya menjadi amonia.

LAB MINI Pabrik Haber: temukan kompromi industri

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22



NH_3 saat setimbang	Hasil per lintasan	Produksi	Untung (indeks)
51,1 %	2,8 %	271 ton/hari	4

Status: terlalu lambat

Misi: jadilah manajer pabrik pupuk! Atur suhu, tekanan, dan katalis untuk mendapat **untung terbesar**. Suhu rendah memberi rendemen tinggi tetapi lambat; tekanan tinggi menambah rendemen tetapi mahal. Matikan katalis besi: apa yang terjadi pada produksi? Bandingkan temuanmu dengan kondisi pabrik sungguhan (±450 °C, ±200 atm). Grafik di kanan menunjukkan rendemen setimbang (biru), kecepatan mencapai setimbang (oranye), dan produksi amonia (hijau) terhadap suhu pada tekanan yang kamu pilih.

KIMIA NUSANTARA · PUPUK DARI UDARA DAN GAS ALAM

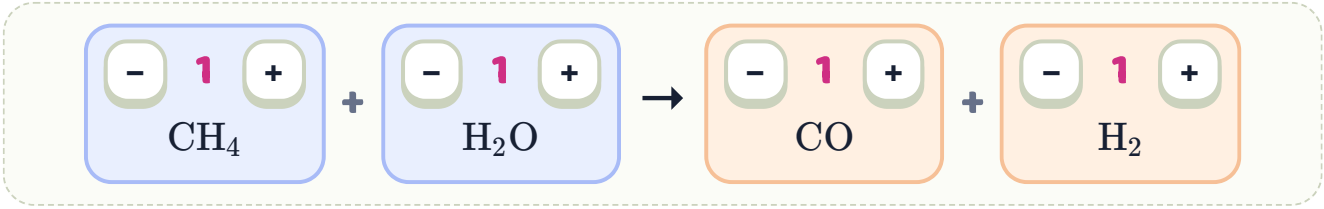
Pabrik pupuk di **Bontang** (Kalimantan Timur), **Gresik** (Jawa Timur), dan **Palembang** (Sumatra Selatan) menjalankan proses Haber–Bosch siang dan malam. Pabrik urea pertama di Indonesia mulai berproduksi di Palembang pada awal 1960-an, dekat sumber gas alam. Gas alam (metana) diubah menjadi hidrogen: $\mathrm{CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3\,H_2}$, lalu $\mathrm{CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2}$. Hebatnya, $\mathrm{CO_2}$ "sisa" ini tidak dibuang, melainkan direaksikan dengan amonia menjadi urea: $\mathrm{2\,NH_3 + CO_2 \longrightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O}$. Karung pupuk di sawah dekat rumahmu kemungkinan berisi nitrogen yang beberapa minggu sebelumnya masih melayang di udara!

TAMU DARI MASA LALU

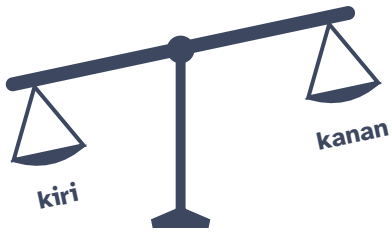
Pada 1909, **Fritz Haber** berhasil membuat amonia dari udara di laboratorium, tetes demi tetes. **Carl Bosch** kemudian memecahkan masalah raksasa untuk membesarkannya: baja yang tahan hidrogen bertekanan tinggi dan katalis besi yang murah. Pabrik pertamanya beroperasi pada 1913. Haber menerima Nobel Kimia 1918, Bosch pada 1931. Proses ini dijuluki "roti dari udara": diperkirakan sekitar separuh atom nitrogen di tubuh manusia hari ini pernah melewati pabrik Haber–Bosch. Namun Haber juga memimpin program senjata gas klorin pada Perang Dunia I, sisi kelam yang mengingatkan bahwa ilmu pengetahuan membutuhkan hati nurani.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi pabrik pupuk dan asam sulfat



Unsur	Kiri	Kanan	
C	1 ●	1 ●	✓
H	6 ○○○○○○	2 ○○	✗
O	1 ●	1 ●	✓



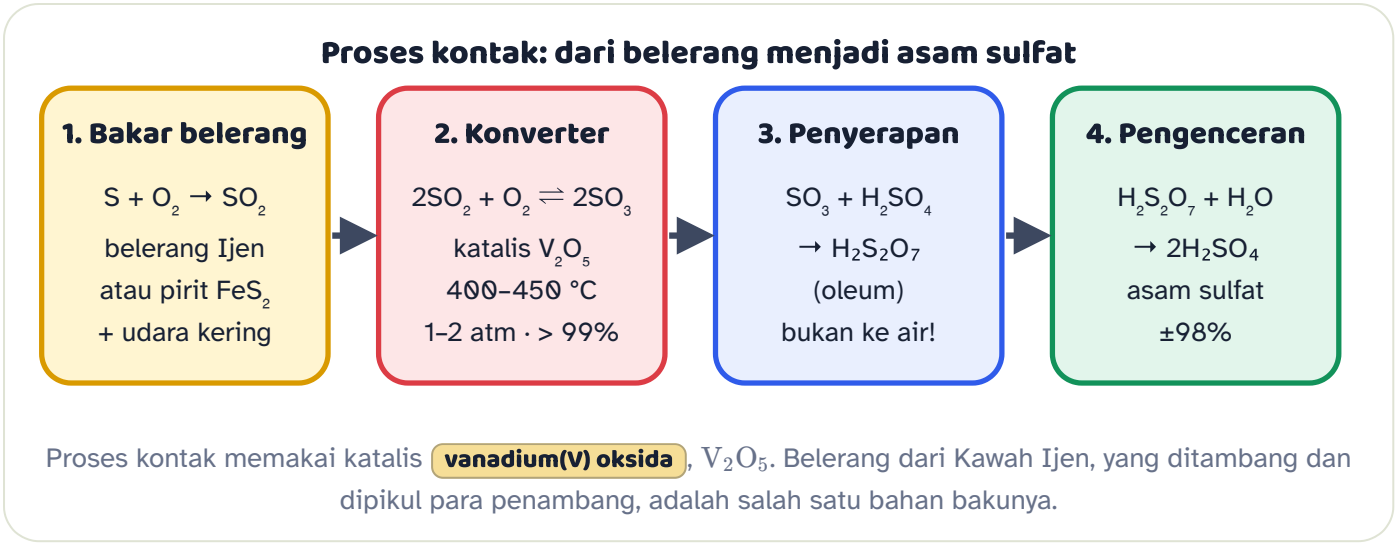
Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Mulai dari pabrik pupuk (gas alam → hidrogen → amonia → urea), lalu pindah ke pabrik asam sulfat. Reaksi pirit, $\mathrm{FeS_2}$, adalah tantangan bonus: bijih pirit dipanggang untuk menghasilkan $\mathrm{SO_2}$ bila belerang murni sulit didapat.

Asam sulfat adalah bahan kimia industri yang paling banyak dibuat di dunia: untuk pupuk fosfat dan amonium sulfat (ZA), aki kendaraan, deterjen, hingga pengolahan bijih nikel laterit di beberapa smelter di Sulawesi dan Maluku Utara. Pembuatannya disebut **proses kontak**, dan jantungnya juga sebuah kesetimbangan:

$$2\,\mathrm{SO_2\,(g)} + \mathrm{O_2\,(g)} \rightleftharpoons 2\,\mathrm{SO_3\,(g)} \qquad \Delta H = -197\ \mathrm{kJ/}$$



Proses kontak memakai katalis **vanadium(V) oksida**, V_2O_5. Belerang dari Kawah Ijen, yang ditambang dan dipikul para penambang, adalah salah satu bahan bakunya.

Mengapa proses kontak cukup memakai tekanan **1–2 atm**, padahal 3 mol gas menjadi 2 mol gas? Karena pada 400–450 °C dengan katalis, konversinya sudah sangat tinggi; dengan beberapa lapis katalis dan penyerapan SO_3 di antaranya, konversi melebihi 99%. Tekanan tinggi tidak sebanding dengan biayanya. Lalu, mengapa SO_3 tidak langsung dilarutkan ke air? Reaksinya sangat eksoterm sehingga terbentuk kabut tetesan asam yang sulit ditangkap. Karena itu SO_3 diserap oleh asam sulfat pekat menjadi oleum, baru kemudian diencerkan.

⚠ **KESELAMATAN**

Amonia dan asam sulfat pekat adalah bahan industri yang wajib dihormati. Amonia disimpan sebagai gas cair bertekanan, berbau sangat menyengat, korosif, dan beracun bagi ikan. Asam sulfat pekat merusak kulit dan mata serta melepaskan banyak kalor bila bercampur air. Di laboratorium sekolah, keduanya hanya ditangani guru dengan kacamata pelindung, sarung tangan, dan lemari asam.



22.6 Tabel ICE dan alat tempur lanjutan

Bagaimana menghitung konsentrasi setimbang bila yang diketahui hanya jumlah awal dan K? Kimiawan memakai tabel tiga baris yang disebut **tabel ICE**: **I**nitial (awal), **C**hange (perubahan), **E**quilibrium (setimbang). Perubahan selalu mengikuti perbandingan koefisien.

$H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ · Kc = 54,3 (430 °C)

Baris	$[H_2]$	$[I_2]$	[HI]
I · awal			
C · berubah			
E · setimbang			

Langkah 1. Tulis persamaan yang sudah setara, nilai K, dan siapkan tabel dengan satu kolom untuk setiap zat yang masuk ke ungkapan K.

$H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ · Kc = 54,3 (430 °C)

Baris	$[H_2]$	$[I_2]$	[HI]
I · awal	1,00	1,00	0
C · berubah			
E · setimbang			

Langkah 2. I (awal): 1,00 mol H_2 dan 1,00 mol I_2 dimasukkan ke wadah 1,00 L, jadi konsentrasi awalnya 1,00 mol/L. HI belum ada.

$H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ · Kc = 54,3 (430 °C)

Baris	$[H_2]$	$[I_2]$	[HI]
I · awal	1,00	1,00	0
C · berubah	− x	− x	+ 2x
E · setimbang			

Langkah 3. C (perubahan): bila x mol/L H_2 bereaksi, I_2 juga berkurang x, dan HI bertambah $2x$ (perbandingan koefisien 1 : 1 : 2). Q = 0 < K, jadi reaksi berjalan ke kanan.

$H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ · Kc = 54,3 (430 °C)

Baris	$[H_2]$	$[I_2]$	[HI]
I · awal	1,00	1,00	0
C · berubah	− x	− x	+ 2x
E · setimbang	1,00 − x	1,00 − x	2x

Langkah 4. E (setimbang) = I + C. Sekarang semua konsentrasi dinyatakan dengan satu huruf x.

$H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ · Kc = 54,3 (430 °C)

Baris	$[H_2]$	$[I_2]$	[HI]
I · awal	1,00	1,00	0
C · berubah	− x	− x	+ 2x
E · setimbang	1,00 − x	1,00 − x	2x

Kc = $(2x)^2 \div (1{,}00 - x)^2$ = 54,3
akar kedua ruas: $2x \div (1{,}00 - x)$ = 7,37 → x = 0,787

Langkah 5. Masukkan baris E ke ungkapan K_c. Kebetulan kedua ruas kuadrat sempurna, jadi cukup diakarkan: $\frac{2x}{1{,}00-x} = 7{,}37$, sehingga $x = 0{,}787$.

$H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ · Kc = 54,3 (430 °C)

Baris	$[H_2]$	$[I_2]$	[HI]
I · awal	1,00	1,00	0
C · berubah	− x	− x	+ 2x
E · setimbang	**0,213**	**0,213**	**1,57**

Kc = $(2x)^2 \div (1{,}00 - x)^2$ = 54,3
akar kedua ruas: $2x \div (1{,}00 - x)$ = 7,37 → x = 0,787

$[H_2]$ = $[I_2]$ = 0,213 M · [HI] = 1,57 M

Langkah 6. Hitung semua konsentrasi setimbang. Cek: $1{,}57^2 \div 0{,}213^2 \approx 54$ ✔. Hasil ini sama dengan percobaan 1 di tabel subbab 22.2.

RUMUS HIDUP

Hasil ICE: berapa HI yang terbentuk?

$$K_c = \frac{(2x)^2}{(a-x)(b-x)} \Rightarrow [\mathrm{HI}] = 2x$$

Masukkan konsentrasi awal H_2 dan I_2 serta Kc. Mesin menyelesaikan persamaan kuadrat dalam x (H_2 yang bereaksi) sehingga hasil baginya tepat sama dengan Kc.

a [H_2] awal mol/L | b [I_2] awal mol/L | K_c Tetapan Kc | [HI] [HI] setimbang mol/L

[HI] SETIMBANG

1,573

mol/L

x = **0,787** mol/L. Saat setimbang: [H_2] = **0,213**, [I_2] = **0,213**, [HI] = **1,573** mol/L. Persentase H_2 yang bereaksi: **78,653**%.

Cek satuan: Δn = 0, jadi Kc tidak bersatuan dan volume wadah tidak memengaruhi hasil ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KST-ICE-HI

COBA SENDIRI

Seberapa banyak N_2O_4 terurai?

Sebanyak 0,100 mol N_2O_4 dimasukkan ke labu 1,00 L pada 25 °C. Untuk $N_2O_4\,(g) \rightleftharpoons 2\,NO_2\,(g)$, $K_c = 4{,}6 \times 10^{-3}$. Hitung konsentrasi setimbang kedua gas dan persentase N_2O_4 yang terurai.

1. ICE: I: N_2O_4 0,100; NO_2 0. C: $-x$; $+2x$. E: $0{,}100 - x$; $2x$.
2. $K_c = \dfrac{(2x)^2}{0{,}100 - x} = 4{,}6 \times 10^{-3}$, sehingga $4x^2 + 0{,}0046x - 0{,}00046 = 0$.
3. Rumus abc (ambil akar positif): $x = \dfrac{-0{,}0046 + \sqrt{0{,}0046^2 + 16(0{,}00046)}}{8} = \dfrac{-0{,}0046 + 0{,}0859}{8} = 0{,}0102$.
4. $[NO_2] = 2x = 0{,}0203$ mol/L; $[N_2O_4] = 0{,}100 - 0{,}0102 = 0{,}0898$ mol/L.
5. Cek: $0{,}0203^2/0{,}0898 = 4{,}6 \times 10^{-3}$ ✔. Persen terurai $= 0{,}0102/0{,}100 \times 100\% \approx 10\%$.

$[NO_2] \approx 0{,}020$ mol/L dan $[N_2O_4] \approx 0{,}090$ mol/L: hanya ±10% yang terurai pada 25 °C, sehingga gasnya cokelat pucat. Dipanaskan, persentase ini naik tajam dan warnanya menjadi cokelat tua.

PENDEKATAN "X KECIL"

Bila K sangat kecil dibanding konsentrasi awal (misalnya $K/[\,]_0 < 10^{-3}$), x jauh lebih kecil daripada konsentrasi awal sehingga $0{,}100 - x \approx 0{,}100$. Persamaan kuadrat menjadi sederhana. Selalu cek: bila x lebih dari 5% konsentrasi awal, pendekatan itu tidak boleh dipakai. Pada contoh di atas x = 10%, jadi rumus abc wajib.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MEMANIPULASI K SEPERTI BERMAIN LEGO

- Persamaan dibalik: $K_{\text{baru}} = 1/K$. Jika $N_2O_4 \rightleftharpoons 2\,NO_2$ punya $K_c = 4{,}6 \times 10^{-3}$, maka $2\,NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4$ punya $K_c \approx 217$.
- Koefisien dikali n: $K_{\text{baru}} = K^n$. Untuk $NO_2 \rightleftharpoons \frac{1}{2}\,N_2O_4$, $K_c = \sqrt{217} \approx 14{,}7$.
- Dua persamaan dijumlahkan: $K_{\text{total}} = K_1 \times K_2$. Contoh: $N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2\,NO$ (K_1) ditambah $2\,NO + O_2 \rightleftharpoons 2\,NO_2$ (K_2) menghasilkan $N_2 + 2\,O_2 \rightleftharpoons 2\,NO_2$ dengan $K = K_1K_2$.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ΔG° DAN K: JEMBATAN TERMODINAMIKA

Di Bab 20 kamu bertemu energi bebas Gibbs. Kesetimbangan adalah keadaan ketika $\Delta G = 0$, dan nilai K terhubung langsung dengan ΔG°:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \qquad \Longleftrightarrow \qquad K = e^{-\Delta G^\circ / RT}$$

Untuk sembarang campuran, $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q = RT \ln(Q/K)$. Jadi $Q < K$ memberi $\Delta G < 0$ (reaksi maju spontan), persis seperti aturan di subbab 22.3. Bila ΔH° dianggap tetap, pengaruh suhu terhadap K mengikuti **persamaan van 't Hoff**:

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = -\frac{\Delta H^\circ}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Untuk reaksi eksoterm ($\Delta H^\circ < 0$), menaikkan T membuat $K_2 < K_1$: inilah bukti matematis asas Le Chatelier untuk suhu.

RUMUS HIDUP

K dari ΔG°

$$K = e^{-\Delta G^\circ / RT}$$

Semakin negatif ΔG°, semakin besar K: reaksi sangat 'ingin' menuju produk.

- ΔG° Energi bebas standar `kJ/mol`
- T Suhu `K`
- K Tetapan kesetimbangan

TETAPAN KESETIMBANGAN

687.335,711

ΔG° < 0 → K > 1: produk lebih disukai

ΔG° = **-33,3** kJ/mol pada **298** K memberi K = **687.335,711**.

Cek satuan: kJ diubah ke J (× 1000) karena R = 8,314 J/(mol·K); pangkat e tidak bersatuan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KST-K-DARI-DG

LANJUT · OLIMPIADE

DERAJAT DISOSIASI DARI MASSA MOLAR RATA-RATA

Bila 1 mol $\mathrm{N_2O_4}$ terurai dengan derajat disosiasi α, terdapat $1-\alpha$ mol $\mathrm{N_2O_4}$ dan 2α mol $\mathrm{NO_2}$: total $1+\alpha$ mol, tetapi massanya tetap 92 g. Jadi massa molar rata-rata campuran $\bar{M} = 92/(1+\alpha)$, yang bisa diukur dari massa jenis gas. Dengan fraksi mol, $K_p = \dfrac{4\alpha^2}{1-\alpha^2}P$. Inilah cara klasik mengukur K tanpa memisahkan zat-zat dalam campuran.

Kimia di sekitarmu

Minuman bersoda

$\mathrm{CO_2\,(g)}$ $\mathrm{CO_2\,(aq)}$. Saat tutup dibuka, tekanan $\mathrm{CO_2}$ di atas cairan turun, kesetimbangan bergeser ke kiri, dan gelembung pun menyembur. Soda dingin lebih lama bersoda karena gas lebih mudah larut pada suhu rendah.

Pendaki Jayawijaya

$\mathrm{Hb + 4\,O_2}$ $\mathrm{Hb(O_2)_4}$. Di ketinggian lebih dari 4.000 m, tekanan oksigen tinggal ±60%, jadi kesetimbangan bergeser ke kiri: pusing dan sesak napas. Setelah beberapa minggu, tubuh membuat lebih banyak hemoglobin dan menggeser kesetimbangan kembali ke kanan.

Karung urea di sawah

Pabrik pupuk di Bontang, Gresik, dan Palembang mengatur suhu, tekanan, dan katalis agar kesetimbangan amonia menguntungkan, lalu mengubah amonia menjadi urea.

Gua kapur Gunung Sewu

$\mathrm{CaCO_3\,(s) + CO_2\,(aq) + H_2O\,(}$. Air hujan ber-$\mathrm{CO_2}$ melarutkan batu kapur. Di langit-langit gua $\mathrm{CO_2}$ lepas ke udara, kesetimbangan bergeser ke kiri, dan stalaktit tumbuh beberapa milimeter per abad.

Terumbu karang

Laut menyerap $\mathrm{CO_2}$ yang makin banyak di udara. Rangkaian kesetimbangan karbonat bergeser sehingga ion karbonat berkurang, dan karang serta kerang lebih sulit membangun rangka kapurnya.

Silika gel berindikator

Butiran silika gel di kotak sepatu atau kamera ada yang berubah warna saat menyerap uap air. Pengikatan air ini reversibel: butiran yang dipanaskan kering kembali dan warnanya pulih.

Cek Cepat

Pada kesetimbangan dinamis, pernyataan yang benar adalah ...

- konsentrasi pereaksi sama dengan konsentrasi produk
- reaksi maju dan reaksi balik berhenti
- laju reaksi maju sama dengan laju reaksi balik
- hanya reaksi maju yang masih berlangsung

Untuk $2\,\mathrm{SO_2\,(g)} + \mathrm{O_2\,(g)} \rightleftharpoons 2\,\mathrm{SO_3\,(g)}$ **(**ΔH **negatif), cara menambah** $\mathrm{SO_3}$ **saat setimbang adalah ...**

- memperbesar tekanan
- menaikkan suhu
- menambah katalis
- memperbesar volume wadah

Ungkapan K_c **untuk** $\mathrm{C\,(s)} + \mathrm{H_2O\,(g)} \rightleftharpoons \mathrm{CO\,(g)} + \mathrm{H_2\,(g)}$ **adalah ...**

- $\dfrac{[\mathrm{CO}][\mathrm{H_2}]}{[\mathrm{C}][\mathrm{H_2O}]}$
- $\dfrac{[\mathrm{CO}][\mathrm{H_2}]}{[\mathrm{H_2O}]}$
- $[\mathrm{CO}][\mathrm{H_2}]$
- $\dfrac{[\mathrm{H_2O}]}{[\mathrm{CO}][\mathrm{H_2}]}$

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. B

Tantangan Rumah: dua gelas, dua sedotan

Bahan: 2 gelas bening tinggi yang sama (atau 2 botol air mineral 600 mL yang dipotong bagian atasnya oleh orang dewasa), 1 sedotan besar (sedotan boba) dan 1 sedotan biasa, air keran + 2 tetes pewarna makanan, penggaris, spidol, nampan, lap.

1. Isi gelas A dengan air berwarna setinggi ±10 cm. Gelas B kosong. Letakkan keduanya di atas nampan.
2. Kamu memegang sedotan besar (A → B), anggota keluargamu memegang sedotan kecil (B → A). Celupkan sedotan tegak sampai dasar, tutup ujung atasnya dengan jari, angkat, lalu lepaskan di atas gelas tujuan. Lakukan bersamaan.
3. Ukur tinggi air kedua gelas dengan penggaris setiap 5 kali pemindahan, sampai tidak berubah lagi (±30 kali).
4. Tuang sedikit air lagi ke gelas A (gangguan!) dan lanjutkan 15 kali pemindahan.

Keselamatan: jangan menyedot dengan mulut, tutup sedotan dengan jari saja. Jangan meminum air percobaan. Bila memakai botol bekas, mintalah orang dewasa memotongnya dan lapisi tepi potongan dengan selotip agar tidak melukai tangan. Lap tumpahan segera agar lantai tidak licin; pewarna dapat menodai pakaian.

Pertanyaan: Apakah tinggi air kedua gelas akhirnya sama? Apa yang sebenarnya sama? Setelah gangguan, apakah perbandingan tinggi airnya kembali seperti semula?

RINGKASAN KILAT

Bab 22 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **reaksi reversibel** dan **kesetimbangan dinamis** pada tingkat partikel
- menuliskan ungkapan **Kc** dan **Kp** (termasuk kesetimbangan heterogen) lalu menghitung nilainya
- memakai **kuosien reaksi Q** untuk meramalkan arah reaksi
- meramalkan pengaruh konsentrasi, tekanan, suhu, dan katalis dengan **asas Le Chatelier**
- menjelaskan kondisi kompromi **proses Haber–Bosch** dan **proses kontak**, serta menghitung komposisi setimbang dengan **tabel ICE**

Istilah kunci

Reaksi reversibel · Kesetimbangan dinamis · hukum aksi massa · Tetapan kesetimbangan · kesetimbangan heterogen · Kuosien reaksi · proses kontak · tabel ICE

Rumus penting

$$K_c = \frac{[\mathrm{NH_3}]^2}{[\mathrm{N_2}]\,[\mathrm{H_2}]^3}$$

Hukum aksi massa: Kc (atau Q) pabrik amonia. Konsentrasi produk dipangkatkan koefisiennya di atas, konsentrasi pereaksi dipangkatkan koefisiennya di bawah. Dengan konsentrasi setimbang hasilnya Kc; dengan konsentrasi sembarang hasilnya Q.

$$K_p = K_c\,(RT)^{\Delta n}$$

Kp dari Kc. Ubah 'bahasa konsentrasi' menjadi 'bahasa tekanan' dengan faktor RT yang dipangkatkan selisih mol gas.

$$K_c = \frac{(2x)^2}{(a-x)(b-x)} \;\Rightarrow\; [\mathrm{HI}] = 2x$$

Hasil ICE: berapa HI yang terbentuk?. Masukkan konsentrasi awal H_2 dan I_2 serta Kc. Mesin menyelesaikan persamaan kuadrat dalam x (H_2 yang bereaksi) sehingga hasil baginya tepat sama dengan Kc.

$$K = e^{-\Delta G^\circ / RT}$$

K dari ΔG°. Semakin negatif ΔG°, semakin besar K: reaksi sangat 'ingin' menuju produk.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- "Setimbang" tidak berarti "sama banyak" dan tidak berarti "berhenti".
- Δn hanya menghitung mol gas.
- Hanya suhu yang mengubah nilai K.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=22

🧩 Teka-teki untuk Bab 23

Di bab ini kamu terus menulis kurung siku, $[\mathrm{NH_3}]$, $[\mathrm{H_2}]$, yang artinya "konsentrasi dalam mol per liter". Sekarang bayangkan dua gelas es teh: teh di gelas A terasa lebih manis daripada teh di gelas B. Bagaimana menyatakan "kemanisan" itu dengan angka, supaya penjual es teh bisa membuat setiap gelas sama manisnya?

▼ **Intip petunjuk**

Kemanisan bergantung pada berapa banyak gula yang larut dalam sejumlah air, bukan hanya berapa sendok gula yang dipakai. Itulah **konsentrasi**. Bab 23 membahas berbagai cara menyatakannya: molaritas (mol/L), persen massa, ppm, molalitas, dan cara mengencerkan larutan dengan rumus $M_1V_1 = M_2V_2$.

23 Larutan & Konsentrasi: Seberapa Manis Es Tehmu?



Gula yang diaduk ke dalam teh tidak lenyap. Ia bersembunyi di antara molekul air. Bab ini mengajarimu menghitung berapa banyak yang bersembunyi, dari segelas es teh sampai sekantong cairan infus di rumah sakit.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **pelarut**, **zat terlarut**, dan **larutan**, serta mengelompokkan **elektrolit kuat, elektrolit lemah, dan nonelektrolit** dari partikel penyusunnya;
- menjelaskan proses melarut pada tingkat partikel dan membaca **kurva kelarutan** (pengaruh suhu dan tekanan, hukum Henry);
- menyatakan kadar larutan dalam **persen massa, persen volume, persen b/v, ppm, dan ppb**;
- menghitung **molaritas**, **pengenceran** $M_1V_1 = M_2V_2$, **molalitas**, dan **fraksi mol**, serta mengonversi antarsatuan dengan massa jenis;
- membuat **larutan baku** dengan labu ukur secara tepat dan aman.

MISTERI ES TEH KANTIN

KOMIK · 4 PANEL



KAK TIRTA
*Rasa manis bisa diberi angka! Namanya **konsentrasi**: seberapa banyak zat terlarut ada di dalam sejumlah larutan. Es teh 8% berarti 8 g gula di setiap 100 g es teh.*



Kimo ikut nimbrung...

KIMO
*Rahasia penjual laris: satu takar gula cair, lalu tambah air **sampai** garis yang sama. Kimiawan menyebutnya **pengenceran**!*

BIMA
Jadi es teh yang selalu pas itu... soal hitungan?



Tebak Dulu!

Sesendok gula diaduk dalam segelas air sampai tidak terlihat lagi, lalu gelas itu ditimbang. Apa yang terjadi pada gula dan massa gelas?

- Gula lenyap, jadi massanya sama dengan segelas air saja.
- Gula bereaksi dengan air menjadi zat baru yang lebih ringan.
- Molekul gula masih ada, tersebar di antara molekul air; massanya = massa air + massa gula.
- Gula berubah menjadi air karena sama-sama bening.

Jawabannya: gula masih ada. Molekul gula hanya terpisah satu per satu dan menyelinap di antara molekul air, terlalu kecil untuk dilihat. Tidak ada zat baru: biarkan airnya menguap, dan gula kembali. Timbangan pun membuktikannya: massa larutan = massa air + massa gula. Melarut bukan bereaksi!

23.1 Larutan: pelarut, zat terlarut, dan siapa yang menghantar listrik

Es teh manis, air laut, cuka dapur, cairan antiseptik, bahkan udara yang kamu hirup: semuanya larutan. Larutan ada di mana-mana karena hampir semua zat mau berbaur dengan zat lain sampai merata.

Bahasa sederhana · Larutkan sesendok gula dalam segelas air. Gulanya tidak tampak lagi, tetapi airnya terasa manis di setiap tegukan, dari atas sampai dasar gelas. Itulah larutan: campuran yang sama rata di mana-mana. Air disebut **pelarut**, gula disebut **zat terlarut**.

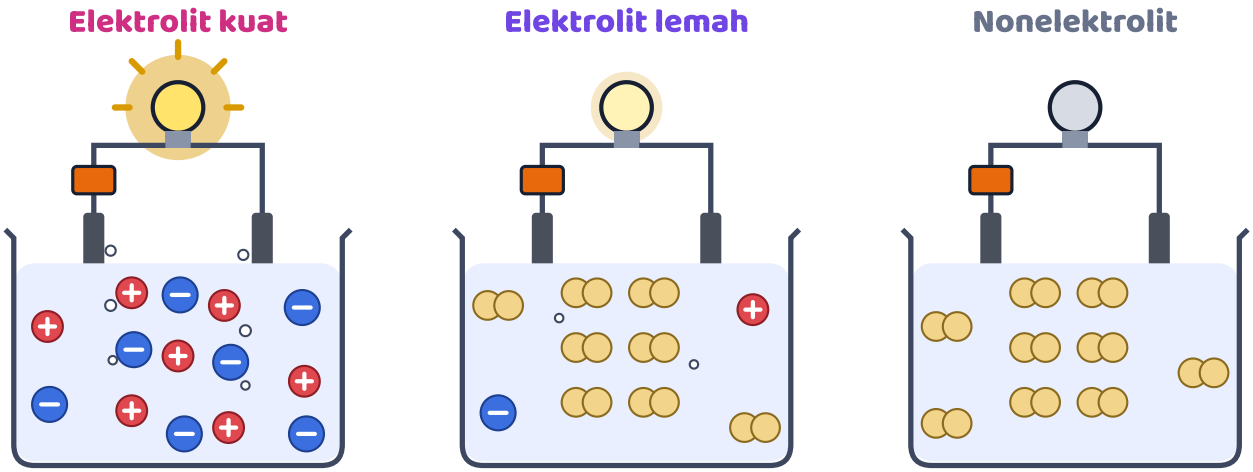
DEFINISI · LARUTAN

Larutan adalah campuran homogen dua zat atau lebih. Komposisinya sama di setiap bagian, partikelnya seukuran molekul atau ion (lebih kecil dari ±1 nm), tidak mengendap, tidak dapat disaring, dan tembus cahaya (jernih, walaupun boleh berwarna). Komponen yang jumlahnya paling banyak, atau yang wujudnya sama dengan wujud larutan, disebut **pelarut**; komponen lainnya disebut **zat terlarut**. Larutan dengan pelarut air ditandai (aq), dari kata *aqueous*.

Zat terlarut	Pelarut	Contoh di sekitarmu
gas	gas	udara: oksigen, argon, dan CO_2 dalam nitrogen
gas	cair	minuman bersoda (CO_2 dalam air), oksigen terlarut di sungai untuk ikan
cair	cair	cairan antiseptik alkohol 70%, cuka dapur (asam asetat dalam air)
padat	cair	es teh manis, air laut, oralit, cairan infus
padat	padat	kuningan (seng dalam tembaga), emas perhiasan 18 karat
gas	padat	gas hidrogen yang terserap di dalam logam paladium

Siapa yang menghantar listrik?

Kak Tirta punya alat uji sederhana: dua batang elektrode, baterai, dan bola lampu kecil. Elektrode dicelupkan ke larutan. Bila lampu menyala, berarti ada **partikel bermuatan yang bergerak bebas** di dalam larutan, yaitu **ion**. Larutan yang menghantar listrik disebut **larutan elektrolit**.



lampu terang
banyak gelembung gas
NaCl, HCl, NaOH

lampu redup / mati
sedikit gelembung
cuka, amonia, HF

lampu mati
tanpa gelembung
gula, urea, alkohol

Uji daya hantar listrik. Bulatan merah (+) dan biru (–) adalah ion yang bebas bergerak; bulatan kuning berpasangan adalah molekul utuh. Makin banyak ion, makin terang lampu dan makin banyak gelembung gas di elektrode.

Mengapa ada larutan yang menghasilkan banyak ion? Lihat persamaannya:

- Senyawa ion melepas ion yang sudah ada di kisinya (**disosiasi**):

$$\mathrm{NaCl\,(s) \longrightarrow Na^{+}\,(aq) + Cl^{-}\,(aq)}$$

- Senyawa kovalen polar tertentu membentuk ion baru saat bereaksi dengan air (**ionisasi**):

$$\mathrm{HCl\,(g) + H_2O\,(l) \longrightarrow H_3O^{+}\,(aq) + Cl^{-}\,(aq)}$$

- Asam asetat dalam cuka hanya terionisasi sebagian kecil, dan reaksinya bolak-balik:

$$\mathrm{CH_3COOH\,(aq) \rightleftharpoons CH_3COO^{-}\,(aq) + H^{+}\,(aq)}$$

- Gula larut sebagai molekul utuh, tanpa ion:

$$\mathrm{C_{12}H_{22}O_{11}\,(s) \longrightarrow C_{12}H_{22}O_{11}\,(aq)}$$

ATURAN · DERAJAT IONISASI

Kekuatan elektrolit diukur dengan **derajat ionisasi** α:

$$\alpha = \frac{\text{mol zat yang terionisasi}}{\text{mol zat mula-mula}}$$

Elektrolit kuat $\alpha \approx 1$ (senyawa ion yang larut, asam kuat seperti HCl, $\mathrm{HNO_3}$, $\mathrm{H_2SO_4}$, dan basa kuat seperti NaOH, KOH). Elektrolit lemah $0 < \alpha < 1$ (asam dan basa lemah seperti $\mathrm{CH_3COOH}$, $\mathrm{NH_3}$, HF). Nonelektrolit $\alpha = 0$ (gula, urea, etanol). Contoh: dalam cuka 0,1 M, hanya ±1,3% molekul asam asetat yang terionisasi ($\alpha \approx 0{,}013$).

Ketuk unsurnya untuk mengenal ion-ion yang sering muncul di bab ini: Na Cl K Ca Cu Mn.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Di dalam larutan, yang membawa arus listrik adalah **ion yang bergerak**, bukan elektron yang berenang di air. Ingat juga: kristal NaCl padat **tidak** menghantar listrik walaupun tersusun atas ion, karena ion-ionnya terkunci di kisi. Baru setelah dilelehkan atau dilarutkan, ion-ionnya bebas bergerak.

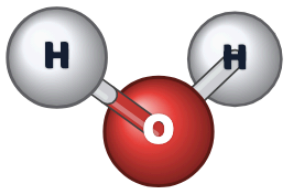
🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1884, **Svante Arrhenius**, mahasiswa doktoral di Uppsala, Swedia, mengajukan gagasan berani: garam yang larut di air terurai menjadi partikel bermuatan (ion), bahkan tanpa dialiri listrik. Para pengujinya ragu dan memberinya nilai pas-pasan. Sembilan belas tahun kemudian, gagasan yang sama mengantarnya meraih Hadiah Nobel Kimia 1903. Ide yang aneh hari ini bisa menjadi ilmu besar esok hari!

23.2 Proses melarut dan kelarutan

Mengapa garam dan gula mudah larut di air, tetapi minyak goreng tidak? Kimiawan punya semboyan pendek: **sejenis melarutkan sejenis** (*like dissolves like*). Zat polar dan senyawa ion larut dalam pelarut polar seperti air. Zat nonpolar, seperti minyak dan lilin, larut dalam pelarut nonpolar seperti bensin atau heksana.

MOLEKUL 3D **Siapa yang akrab dengan air?**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

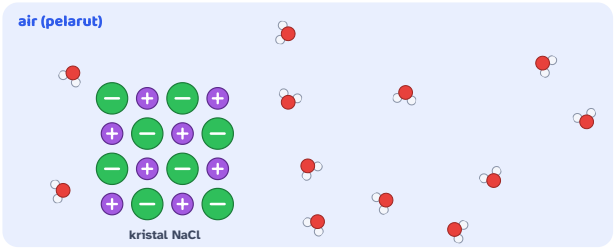
Air H_2O Mr ≈ 18,02 PubChem ↗

Molekul bengkok dengan sudut ±104,5°. Dua pasang elektron bebas pada O membuatnya polar dan mampu berikatan hidrogen.

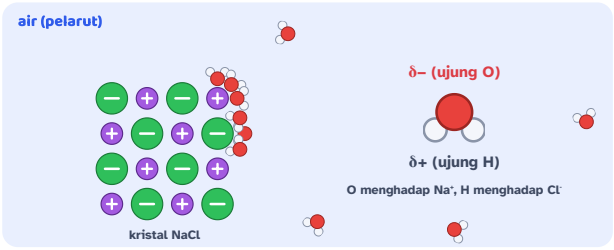
Hitung gugus –OH (atom O yang mengikat H) pada glukosa dan sukrosa. Setiap –OH dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air, sehingga gula sangat mudah larut. Bandingkan dengan heksana: tidak

ada satu pun bagian polar, jadi heksana menolak air tetapi bercampur dengan minyak.

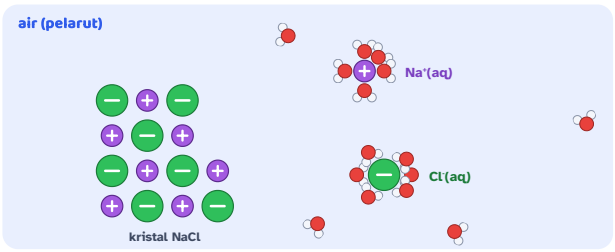
Untuk senyawa ion seperti garam dapur, molekul air yang polar bekerja seperti tim penarik tambang. Ikuti animasinya langkah demi langkah:



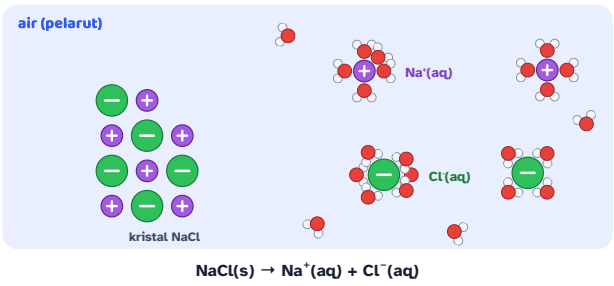
Langkah 1. Kristal garam dapur (NaCl) adalah kisi ion $\mathrm{Na^+}$ (ungu) dan $\mathrm{Cl^-}$ (hijau) yang saling tarik. Di sekitarnya, molekul air bergerak bebas ke segala arah.



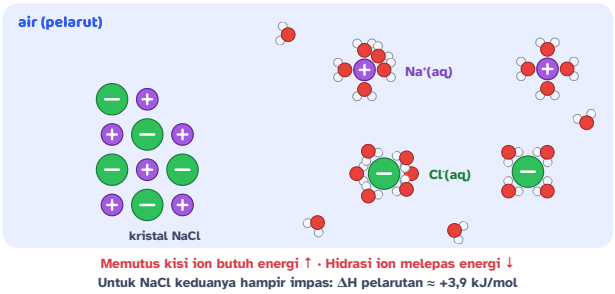
Langkah 2. Air adalah molekul polar: ujung O sedikit negatif (δ–), ujung H sedikit positif (δ+). Molekul air berbalik arah: ujung O menghadap $\mathrm{Na^+}$, ujung H menghadap $\mathrm{Cl^-}$.



Langkah 3. Tarikan banyak molekul air cukup kuat untuk mencabut ion di sudut dan tepi kristal. Ion yang lepas langsung diselimuti air. Peristiwa ini disebut **hidrasi**.



Langkah 4. Ion-ion terhidrasi menyebar merata ke seluruh air, dan kristal makin kecil lalu habis:
$\mathrm{NaCl(s)} \quad \mathrm{Na^+(aq) + Cl^-(aq)}$.



Langkah 5. Neraca energinya: memutus kisi butuh energi, hidrasi melepas energi. Bila hidrasi menang, larutan menghangat (NaOH); bila kalah, larutan mendingin (kompres dingin instan berisi amonium nitrat).

Apakah air bisa melarutkan garam tanpa batas? Tidak. Pada suhu tertentu, ada jumlah maksimum zat yang dapat larut.

DEFINISI · KELARUTAN

Kelarutan (S) adalah massa maksimum zat terlarut yang dapat larut dalam 100 g pelarut pada suhu tertentu (bisa juga dinyatakan dalam mol/L). Larutan yang sudah berisi zat terlarut sebanyak kelarutannya disebut **larutan jenuh**; yang kurang dari itu **larutan tak jenuh**. Bila berisi lebih banyak daripada kelarutannya tanpa mengendap, ia disebut **larutan lewat jenuh**, keadaan yang rapuh: sebutir kristal kecil saja dapat memicu pengkristalan besar-besaran.

Madu yang lama disimpan sering "berpasir" karena madu adalah larutan gula yang lewat jenuh. Gula batu dibuat dengan mendinginkan larutan gula panas yang sangat pekat secara perlahan, sehingga kristal tumbuh besar di sepanjang benang.

Tebak Dulu!

Gelas P berisi larutan gips (kalsium sulfat) yang sudah jenuh, dengan endapan di dasarnya. Gelas Q berisi 100 g gula dalam 100 g air yang belum jenuh. Mana yang lebih pekat?

- Gelas P, karena larutan jenuh pasti paling pekat.
- Gelas Q, jauh lebih pekat walaupun belum jenuh.
- Sama pekat, karena keduanya sama-sama larutan.
- Tidak bisa dibandingkan karena zatnya berbeda.

Jawabannya: gelas Q. Kelarutan kalsium sulfat hanya ±0,2 g per 100 g air pada suhu kamar, jadi larutan jenuhnya sangat encer. Gelas Q berisi 100 g gula per 100 g air (kelarutan gula ±200 g), belum jenuh tetapi ratusan kali lebih pekat. "Jenuh" berarti tidak bisa melarutkan lagi, bukan "pekat".

Kelarutan dipengaruhi **suhu**. Kebanyakan padatan lebih mudah larut di air panas, misalnya kalium nitrat ($\mathrm{KNO_3}$, bahan pupuk dan pengawet) yang kelarutannya naik tajam. Garam dapur hampir tidak peduli suhu. Gas justru **kurang** larut di air hangat. Jelajahi grafiknya:

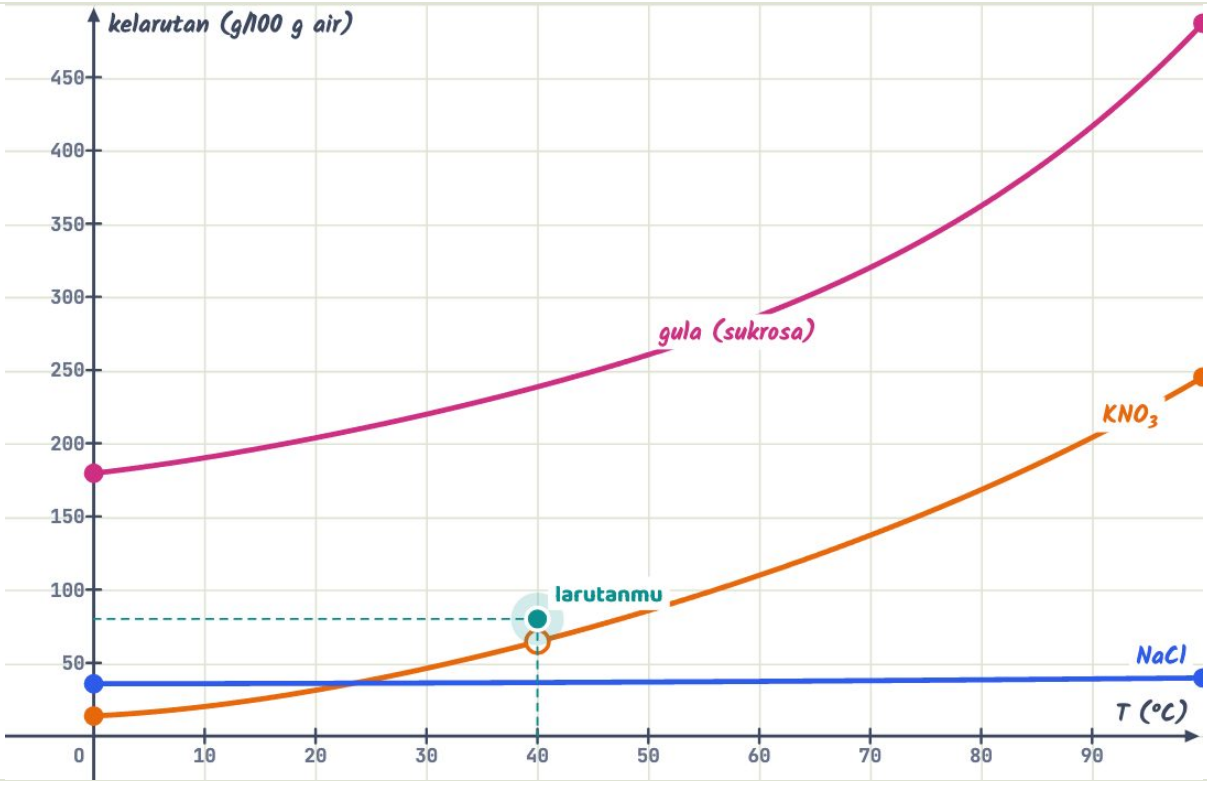
GRAFIK HIDUP

Kurva kelarutan: KNO_3, NaCl, dan gula

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-23

$$S = f(T) \quad \text{(gram zat per 100 g air)}$$

$$T = 40\,^{\circ}\text{C}: \quad S_{KNO_3} \approx 64{,}5, \quad S_{NaCl} \approx 36{,}6, \quad S_{gula} \approx 238{,}5$$



di atas kurva: kelebihan KNO_3 mengkristal (garis merah putus-putus)

S KNO_3	S NaCl	S gula	KNO_3 yang mengkristal
64,5 g	36,6 g	239 g	15,5 g

Titik hijau toska adalah "larutanmu": sejumlah KNO_3 dalam 100 g air. Mulailah dari 80 g pada 60 °C (tak jenuh), lalu seret titiknya ke kiri seolah larutan didinginkan. Pada suhu berapa kristal mulai muncul? Berapa gram yang mengkristal pada 20 °C? Perhatikan juga garis NaCl yang hampir datar.

KIMIA NUSANTARA · GARAM DARI TAMBAK

Air laut Nusantara berkadar garam ±3,5%. Di tambak garam Madura, Rembang, dan Pati, air laut dialirkan dari petak ke petak dan diuapkan oleh matahari. Ketika kadar NaCl mencapai ±26% massa, larutannya jenuh (±36 g per 100 g air) dan kristal garam mulai tumbuh di dasar petak. Karena kelarutan NaCl hampir tidak dipengaruhi suhu, petani garam mengandalkan **penguapan**, bukan pendinginan. Itulah sebabnya panen garam terbaik datang di puncak musim kemarau.

Untuk gas, ada faktor kedua yang sangat kuat: **tekanan**. Botol minuman bersoda diisi CO_2 bertekanan tinggi. Begitu tutupnya dibuka, tekanan turun dan gas yang terlarut keluar sebagai gelembung: *pssst!*

HUKUM HENRY

Pada suhu tetap, kelarutan gas dalam cairan sebanding dengan tekanan parsial gas itu di atas cairan:

$$C = k_H \times P$$

C = kelarutan gas (mol/L), P = tekanan parsial gas (atm), k_H = tetapan Henry yang khas untuk setiap gas, pelarut, dan suhu. Pada 25 °C, k_H untuk O_2 dalam air ±$1{,}3 \times 10^{-3}$ mol L^{-1} atm^{-1} dan untuk CO_2 ±0,034 mol L^{-1} atm^{-1}.

RUMUS HIDUP

Hukum Henry: gas larut sebanding tekanannya

$$C = k_H \times P$$

Makin besar tekanan gas di atas cairan, makin banyak gas yang larut, asalkan suhunya tetap.

- k_H Tetapan Henry `mol/(L·atm)`
- P Tekanan parsial gas `atm`
- C Kelarutan gas `mol/L`

KELARUTAN GAS

2,73 × 10⁻⁴

mol/L

🐟 **oksigen terlarut di air bersih ±8–9 mg/L: cukup untuk ikan**

Gas yang larut: **2,73 × 10⁻⁴** mol/L. Bila gasnya O_2 (Mr 32), itu **8,736** mg/L; bila CO_2 (Mr 44), **12,012** mg/L.

Cek satuan: mol/(L·atm) × atm = mol/L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAR-HENRY

TAMU DARI MASA LALU

William Henry, kimiawan Inggris, menerbitkan hukumnya pada 1803 setelah mengukur berapa banyak gas yang diserap air pada berbagai tekanan. Sahabatnya, **John Dalton**, juga meneliti penyerapan gas oleh air, dan penelitian itu ikut menuntun Dalton ke teori atomnya (Bab 5). Dua sahabat, satu gelas air, dua ide besar!

MITOS

"Gula yang larut itu hilang."

FAKTA

Molekul gula hanya tersebar di antara molekul air. Massa larutan = massa air + massa gula, dan gula kembali bila airnya diuapkan.

MITOS

"Air murni penghantar listrik yang baik."

FAKTA

Air murni nyaris tidak menghantar. Yang menghantar adalah ion terlarut, dan air keran, air hujan, serta keringat selalu mengandung ion. Jadi tetap jauhkan alat listrik dari air!

MITOS

"Air panas selalu melarutkan lebih banyak zat."

FAKTA

Benar untuk kebanyakan padatan, tetapi gas justru kurang larut di air panas. Itu sebabnya minuman bersoda hangat cepat "kempes" dan ikan megap-megap di air yang terlalu hangat.

23.3 Persen, ppm, dan ppb: kadar untuk kehidupan sehari-hari

Kembali ke kantin. Untuk menyatakan "seberapa manis", kita membandingkan banyaknya zat terlarut dengan banyaknya larutan. Cara paling sederhana memakai persen. Ada tiga jenis persen yang sering tertukar:

$$\%\ \text{massa} = \frac{m_{\text{zat terlarut}}}{m_{\text{larutan}}} \times 100\%$$

$$\%\ \text{volume} = \frac{V_{\text{zat terlarut}}}{V_{\text{larutan}}} \times 100\%$$

$$\%\ \text{b/v} = \frac{m_{\text{zat terlarut}}\ (\text{g})}{V_{\text{larutan}}\ (\text{mL})} \times 100\%$$

- **Persen massa** (% m/m): es teh 8% berisi 8 g gula dalam setiap 100 g es teh. Asam pekat di laboratorium juga dilabeli dengan persen massa.
- **Persen volume** (% v/v): cairan antiseptik alkohol 70% berisi 70 mL etanol dalam setiap 100 mL larutan.
- **Persen berat per volume** (% b/v): cairan infus NaCl 0,9% berisi 0,9 g NaCl dalam setiap 100 mL larutan.

CONTOH **Seberapa manis es tehmu?**

Ibu kantin melarutkan 20 g gula pasir ke dalam 230 g teh (anggap teh = air). Berapa persen massa gula dalam es teh itu?

1. Massa larutan = massa gula + massa teh = 20 + 230 = 250 g.
2. $\%\ \text{massa} = \frac{20}{250} \times 100\% = 8\%$.

Es teh itu berkadar gula 8% massa. Penyebutnya massa larutan (250 g), bukan massa air (230 g).

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Volume tidak selalu bisa dijumlahkan! Mencampur 70 mL etanol dengan 30 mL air menghasilkan larutan **kurang dari 100 mL** (±97 mL), karena molekul air dan etanol saling mendekat lewat ikatan hidrogen dan mengisi celah satu sama lain. Itu sebabnya alkohol 70% dibuat dengan menambahkan air **sampai** volumenya 100 mL, bukan dengan menambahkan 30 mL air.

Untuk zat yang sangat sedikit, seperti logam berat di air minum, persen terlalu "besar". Kimiawan memakai **ppm** (*parts per million*, bagian per sejuta) dan **ppb** (*parts per billion*, bagian per semiliar).

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}}}{m_{\text{larutan}}} \times 10^6$$

$$\text{ppb} = \frac{m_{\text{zat}}}{m_{\text{larutan}}} \times 10^{9}$$

Untuk larutan encer dalam air, 1 L larutan bermassa ±1 kg, sehingga **1 ppm ≈ 1 mg/L** dan **1 ppb ≈ 1 µg/L**.

Bahasa sederhana · Seberapa kecil 1 ppm? Satu ppm sama dengan 1 detik dalam ±11,6 hari. Satu ppb sama dengan 1 detik dalam ±32 tahun! Atau bayangkan satu butir beras merah di antara satu juta butir beras putih: itulah 1 ppm.

RUMUS HIDUP **ppm dan ppb dalam air**

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}}\ (\text{mg})}{V_{\text{air}}\ (\text{L})}$$

Untuk air yang encer, 1 L beratnya ±1 kg, jadi miligram per liter sama dengan bagian per sejuta.

m_{zat} Massa zat terlarut `mg` | V_{air} Volume sampel air `L` | ppm Kadar `ppm`

KADAR
0,01
ppm

✅ **≤ 10 ppb: masih di bawah pedoman WHO untuk timbal dan arsen dalam air minum**

0,05 mg zat dalam **5** L air = **0,01** ppm = **10** ppb.

Cek satuan: mg ÷ L ≈ mg ÷ kg = ppm ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAR-PPM-AIR

KIMIA NUSANTARA · TDS METER DI DEPOT AIR ISI ULANG

Banyak depot air minum isi ulang memamerkan angka dari **TDS meter** (*total dissolved solids*). Alat seharga puluhan ribu rupiah itu sebenarnya mengukur **daya hantar listrik** air, yaitu sumbangan ion-ion terlarut seperti $\mathrm{Ca^{2+}}$, $\mathrm{Mg^{2+}}$, dan $\mathrm{HCO_3^-}$, lalu mengubahnya menjadi perkiraan ppm. Air hasil osmosis balik bisa di bawah 10 ppm, sedangkan air tanah dan air pegunungan umumnya puluhan sampai beberapa ratus ppm; aturan kualitas air minum Kementerian Kesehatan membatasinya di sekitar 300 ppm. Ingat: angka TDS yang rendah tidak menjamin air bebas kuman, karena bakteri tidak bermuatan seperti ion dan tidak terbaca alat ini.

Zat dalam air minum	Pedoman WHO	Dalam ppb	Sumber pencemar di sekitar kita
timbal	0,01 mg/L	10 ppb	pipa dan solder tua, aki bekas yang dibongkar sembarangan
arsen	0,01 mg/L	10 ppb	air tanah di daerah batuan tertentu, limbah tambang
merkuri (anorganik)	0,006 mg/L	6 ppb	penambangan emas skala kecil yang memakai merkuri
nitrat ($\mathrm{NO_3^-}$)	50 mg/L	50.000 ppb	pupuk berlebih yang meresap ke sumur

23.4 Molaritas dan pengenceran

Persen enak untuk label makanan, tetapi kimiawan ingin tahu **jumlah partikelnya**, karena reaksi kimia terjadi antarpartikel. Karena itu kita memakai mol (Bab 17). Satuan konsentrasi yang paling sering dipakai di laboratorium adalah molaritas.

DEFINISI · MOLARITAS

Molaritas (M) adalah jumlah mol zat terlarut dalam setiap liter **larutan**:

$$M = \frac{n}{V} \qquad n = \frac{m}{M_r}$$

Satuannya mol/L, sering ditulis M ("molar") atau mol $\mathrm{dm^{-3}}$. Larutan NaCl 0,1 M berisi 0,1 mol NaCl (5,85 g) dalam setiap 1 L larutan. Kebalikannya, jumlah mol dalam sejumlah larutan adalah $n = M \times V$.

Bahasa sederhana · Bayangkan setiap liter larutan sebagai satu kotak. Molaritas menjawab pertanyaan: "Ada berapa mol zat di dalam satu kotak?" Larutan 2 M berisi dua kali lebih banyak partikel zat terlarut di setiap kotaknya daripada larutan 1 M.

RUMUS HIDUP

Molaritas dari massa zat

$$M = \frac{m \,/\, M_r}{V}$$

Molaritas adalah jumlah mol zat terlarut di setiap liter larutan.

m Massa zat terlarut `g` · M_r Massa molar `g/mol` · V Volume larutan `L`

M Molaritas `mol/L`

MOLARITAS

0,154

mol/L

💉 **seperti cairan infus NaCl 0,9% (±0,154 M)**

9 g zat (Mr **58,5**) dalam **1** L larutan: n = **0,154** mol, jadi M = **0,154** mol/L = **153,846** mmol/L.

Satuan Nusantara: ≈ 100% dari NaCl dalam cairan infus 0,9% · ≈ 26% dari garam di air laut (±) · ≈ 19% dari asam asetat dalam cuka dapur 5% (±)

Cek satuan: g ÷ (g/mol) ÷ L = mol/L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAR-MOLARITAS

MOLARITAS DI LABORATORIUM KLINIK

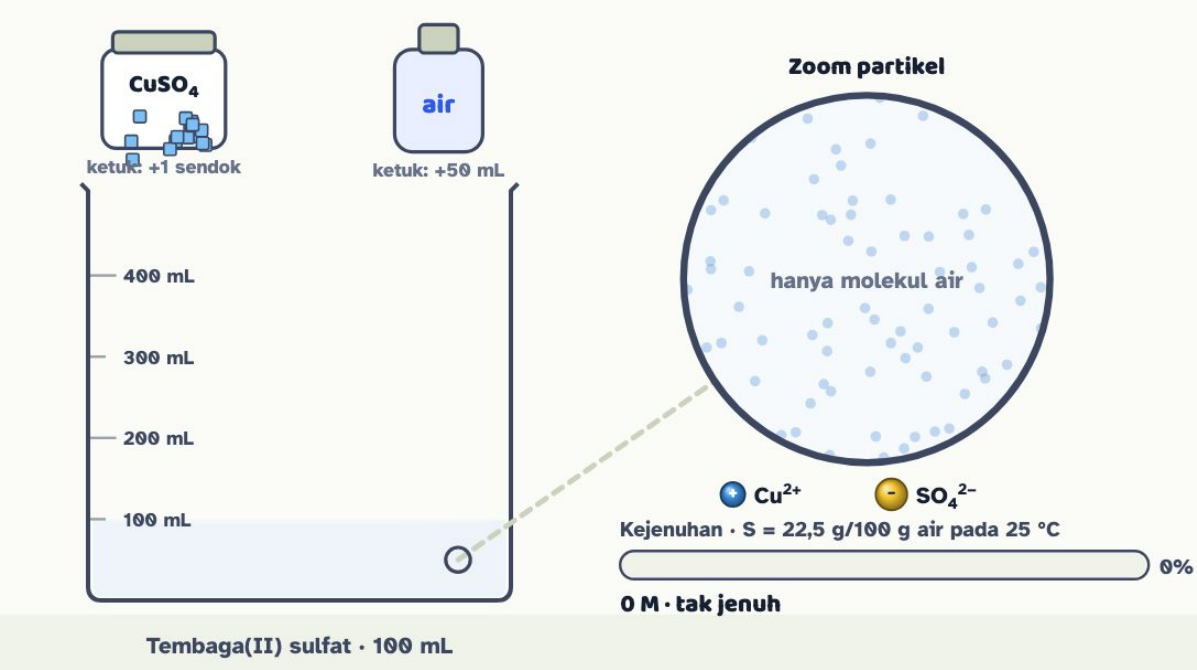
Hasil cek gula darah sering ditulis dalam mg/dL atau mmol/L. Gula darah puasa 100 mg/dL berarti 1 g glukosa per liter darah. Dengan Mr glukosa 180, itu $1/180 = 0{,}0056$ mol/L = 5,6 mmol/L. Dokter di berbagai negara memakai satuan berbeda, tetapi kimianya sama.

Sekarang giliranmu menjadi peracik larutan. Tambahkan zat, tambahkan air, panaskan, dan perhatikan kapan larutan menjadi jenuh:

LAB MINI

Gelas Ajaib: tambah zat, tambah air, sampai jenuh

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-23



Volume	Zat dimasukkan	Terlarut	Endapan	Molaritas	Keadaan
100 mL	0 g	0 g	0 g	0 M	tak jenuh

Pilih zat, lalu ketuk **stoples zat** (atau tombol 🥄) dan **botol air** (atau tombol 💧). Apa yang terjadi pada warna dan molaritas ketika zat ditambah? Ketika air ditambah? Terus tambahkan zat sampai muncul endapan, lalu naikkan suhunya. Coba juga "Buang separuh larutan": mengapa molaritasnya tidak berubah? Catatan: lab ini menganggap volume larutan ≈ volume air; pada larutan sangat pekat (misalnya garam jenuh) volume sebenarnya sedikit lebih besar sehingga molaritas aslinya lebih kecil (±5,4 M untuk NaCl jenuh). Kalium permanganat sangat pekat warnanya: sedikit saja sudah ungu tua!

Tebak Dulu!

Segelas larutan gula 0,5 M (200 mL) dituang separuhnya ke gelas lain. Berapa molaritas larutan di gelas kedua?

0,25 M, karena isinya tinggal separuh.

0,5 M, sama seperti gelas pertama.

1 M, karena volumenya lebih kecil.

0,1 M, karena sebagian gula tertinggal.

Jawabannya: 0,5 M. Menuang tidak menambah pelarut. Jumlah mol dan volumenya sama-sama tinggal separuh, sehingga perbandingannya tetap. Konsentrasi adalah sifat intensif, seperti rasa: seteguk es teh sama manisnya dengan segelas penuh es teh yang sama.

Bagaimana dengan menambahkan air? Itulah **pengenceran**. Zat terlarutnya tidak bertambah dan tidak berkurang; hanya pelarutnya yang bertambah. Jadi jumlah mol sebelum dan sesudah pengenceran sama.

ATURAN · PENGENCERAN

$$n_{\text{sebelum}} = n_{\text{sesudah}}$$

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

M_1, V_1 = molaritas dan volume larutan pekat (stok) yang diambil; M_2, V_2 = molaritas dan volume larutan setelah diencerkan. Aturan yang sama berlaku untuk persen dan ppm: $C_1 V_1 = C_2 V_2$. Perbandingan V_2 / V_1 disebut **faktor pengenceran**.

RUMUS HIDUP

Pengenceran

$$M_1\,V_1 = M_2\,V_2$$

Saat diencerkan, mol zat terlarut tetap; yang bertambah hanya pelarutnya.

- M_1 Molaritas larutan stok `M`
- V_1 Volume stok yang diambil `mL`
- V_2 Volume akhir setelah diencerkan `mL`
- M_2 Molaritas akhir `M`

MOLARITAS AKHIR

0,2

M

pengenceran 10 kali

Ambil **25** mL larutan **2** M, tambahkan air sampai **250** mL: hasilnya **0,2** M, diencerkan **10** kali. Mol zat tetap **50** mmol.

Cek satuan: M × mL ÷ mL = M ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAR-PENGENCERAN

TRIK KAK TIRTA

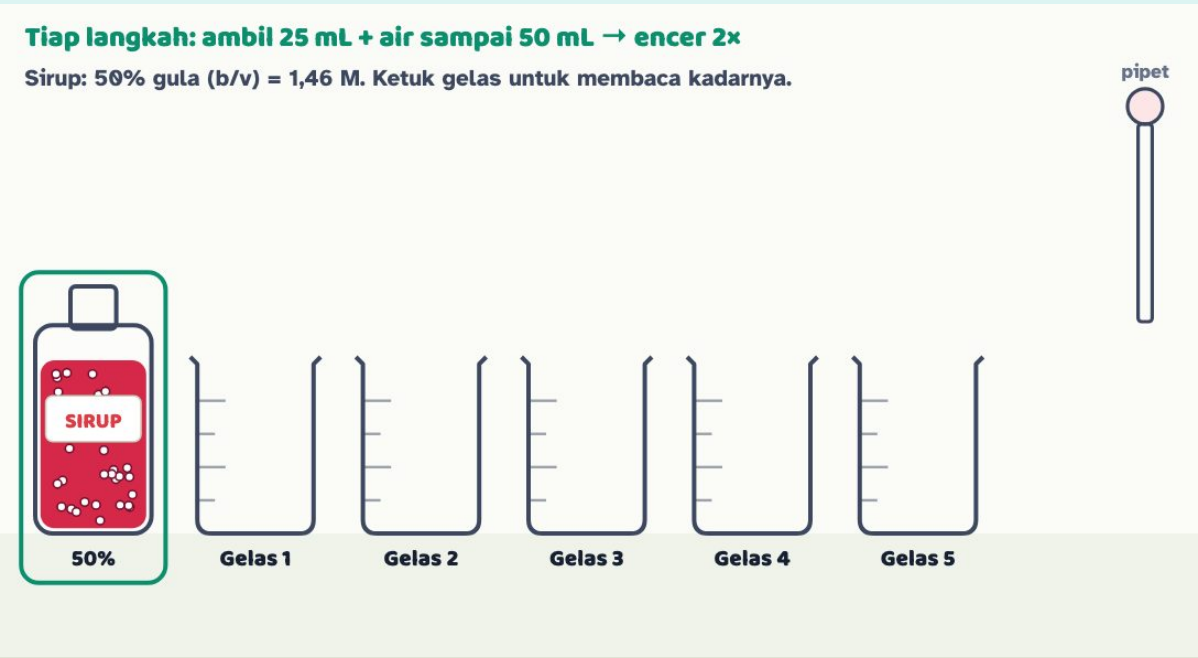
"Yang kekal saat diencerkan adalah mol." Jadi $M_1V_1 = M_2V_2$ hanyalah "mol sebelum = mol sesudah". Volume boleh dalam mL atau L, asal sama di kedua ruas. Lalu cek kewajaran: hasil M_2 harus **lebih kecil** daripada M_1. Kalau hasilmu lebih pekat, pasti ada yang tertukar!

LAB MINI Seri Pengenceran Sirup: makin encer, makin pudar

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-23

Tiap langkah: ambil 25 mL + air sampai 50 mL → encer 2×

Sirup: 50% gula (b/v) = 1,46 M. Ketuk gelas untuk membaca kadarnya.



Terpilih	Kadar gula	Molaritas gula	Lebih encer dari sirup	Volume
botol sirup	50 % (b/v)	1,462 M	1 kali	100 mL

Sirup di botol berkadar gula 50% (b/v). Pilih faktor pengenceran, lalu tekan **Encerkan berikutnya**: pipet memindahkan sebagian larutan ke gelas berikutnya, kemudian air ditambahkan sampai 50 mL. Ketuk gelas mana pun untuk membaca kadarnya. Setiap titik putih mewakili sejumlah molekul gula: hitung berapa yang tersisa! Setelah kelima gelas jadi, uji matamu dengan 🔍 **Gelas misteri**. Dengan pengenceran 10×, pada gelas keberapa warnanya tak lagi terlihat?

KERJAKAN BERSAMA Isi sachet oralit

Satu sachet oralit dilarutkan dalam air sampai 200 mL. Sachet itu berisi 0,52 g NaCl dan 2,7 g glukosa. Hitung molaritas NaCl dan glukosa dalam larutan oralit. (Mr NaCl = 58,5; glukosa = 180)

1. Mol NaCl $= 0{,}52/58{,}5 = 0{,}00889$ mol; mol glukosa $= 2{,}7/180 = 0{,}0150$ mol.
2. Volume larutan = 200 mL = 0,200 L.
3. $M_{\text{NaCl}} = 0{,}00889/0{,}200 = 0{,}044$ M = 44 mmol/L; $M_{\text{glukosa}} = 0{,}0150/0{,}200 = 0{,}075$ M = 75 mmol/L.

NaCl ±0,044 M dan glukosa 0,075 M. Sitrat dalam sachet juga menyumbang natrium, sehingga total natrium ±75 mmol/L, sama dengan glukosanya. Perbandingan 1 : 1 ini yang membuat usus menyerap natrium dan air paling cepat.

KIMIA NUSANTARA · ORALIT, PENYELAMAT JUTAAN ANAK

Diare membuat tubuh kehilangan air dan garam dengan cepat. Sejak puluhan tahun lalu, puskesmas dan posyandu di seluruh Indonesia membagikan **oralit**, campuran garam dan gula dengan takaran yang dirumuskan WHO. Kuncinya ada pada konsentrasi: glukosa membantu usus menyerap natrium, dan air ikut terserap bersamanya. Larutan yang terlalu pekat justru menarik air ke dalam usus dan memperparah diare. Karena itu aturan pakai pada sachet harus diikuti persis: satu sachet untuk 200 mL air matang.

KERJAKAN BERSAMA

Mengencerkan cuka biang

Di warung dijual cuka biang berkadar asam asetat 25%. Kak Tirta ingin membuat 400 mL cuka masak 5%. Berapa mL cuka biang yang diambil, dan berapa mL air yang ditambahkan (kira-kira)?

1. $C_1V_1 = C_2V_2$: $25\% \times V_1 = 5\% \times 400$ mL.
2. $V_1 = \dfrac{5 \times 400}{25} = 80$ mL cuka biang.
3. Tambahkan air sampai volumenya 400 mL, yaitu ±320 mL air.

Ambil 80 mL cuka biang, lalu tambahkan air sampai 400 mL (pengenceran 5 kali). Cuka biang 25% tidak boleh diminum atau dipakai langsung untuk makanan karena dapat melukai mulut dan kerongkongan.

ADU CEPAT

Massa & volume → molaritas

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-23

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

M = (m ÷ Mr) ÷ V dalam liter. Contoh: 5,85 g NaCl hingga 500 mL → 0,1 mol ÷ 0,5 L = 0,2 M.

ADU CEPAT

Pengenceran kilat

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-23

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$M_2 = M_1 \times V_1 \div V_2$. Mol zat tetap, volume bertambah, jadi M_2 selalu lebih kecil.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Melarutkan 0,1 mol zat ke dalam 1 L air **tidak** menghasilkan larutan 0,1 M. Zat terlarut ikut menempati ruang, sehingga volume larutannya lebih dari 1 L dan molaritasnya sedikit kurang dari 0,1 M. Cara yang benar: larutkan zat dalam sebagian air, lalu tambahkan air **sampai** volume larutan tepat 1 L (subbab 23.6).

23.5 Molalitas dan fraksi mol

Molaritas punya satu kelemahan kecil: volume larutan berubah bila suhunya berubah. Larutan yang dipanaskan memuai, sehingga molaritasnya sedikit turun walaupun tidak ada yang ditambahkan. Untuk percobaan yang melibatkan pemanasan atau pendinginan, seperti mendidihkan dan membekukan larutan di Bab 24, kimiawan memakai satuan berbasis **massa**, yang tidak terpengaruh suhu.

DEFINISI · MOLALITAS DAN FRAKSI MOL

Molalitas (m) adalah jumlah mol zat terlarut dalam setiap kilogram **pelarut** (bukan larutan):

$$m = \frac{n_{\text{zat terlarut}}}{\text{massa pelarut (kg)}}$$

$$m = \frac{m_t / M_r}{p} \times 1000 \quad (p \text{ dalam g})$$

Satuannya mol/kg atau "molal". **Fraksi mol** (X) adalah perbandingan mol suatu komponen dengan mol seluruh komponen:

$$X_A = \frac{n_A}{n_A + n_B}$$

$$X_A + X_B = 1$$

Fraksi mol tidak bersatuan. Udara kering, misalnya, memiliki $X_{\text{N}_2} \approx 0{,}78$ dan $X_{\text{O}_2} \approx 0{,}21$.

RUMUS HIDUP

Molalitas dan fraksi mol

$$m = \frac{m_t \,/\, M_r}{p} \times 1000$$

Molalitas adalah mol zat terlarut untuk setiap kilogram pelarut, bukan larutan.

- m_t Massa zat terlarut `g`
- M_r Massa molar zat terlarut `g/mol`
- p Massa pelarut (air) `g`
- m Molalitas `mol/kg`

MOLALITAS

0,2

mol/kg

glukosa

n zat terlarut = **0,1** mol, n air = **27,778** mol. Fraksi mol air = **0,996**; fraksi mol zat terlarut = **0,004**.

Cek satuan: (g ÷ g/mol) ÷ g × 1000 = mol/kg ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAR-MOLALITAS

KERJAKAN BERSAMA

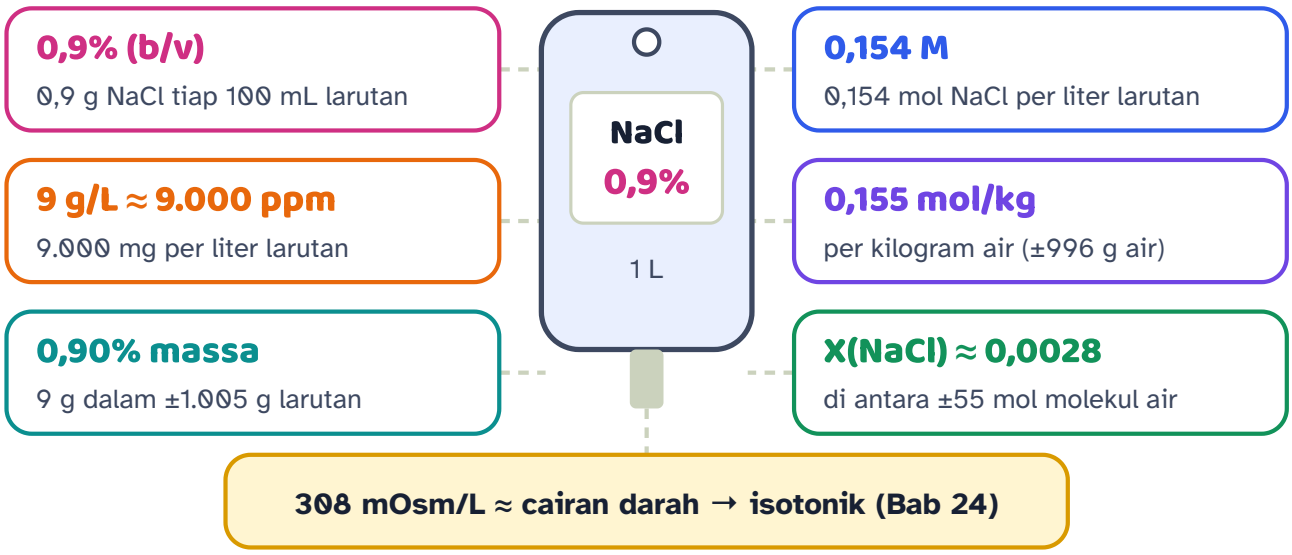
Glukosa dalam air

Sebanyak 18 g glukosa ($C_6H_{12}O_6$, Mr 180) dilarutkan dalam 500 g air (Mr 18). Hitung molalitas glukosa serta fraksi mol glukosa dan air.

1. Mol glukosa $= 18/180 = 0{,}100$ mol; mol air $= 500/18 = 27{,}8$ mol.
2. Molalitas $= 0{,}100/0{,}500 = 0{,}200$ mol/kg.
3. $X_{\text{glukosa}} = \dfrac{0{,}100}{0{,}100 + 27{,}8} = 0{,}0036$; $X_{\text{air}} = 1 - 0{,}0036 = 0{,}9964$.

Molalitas 0,200 mol/kg. Dari setiap 1.000 molekul di gelas itu, hanya ±4 yang molekul glukosa; sisanya air!

Satu larutan bisa "diceritakan" dengan banyak satuan. Lihat bagaimana sekantong cairan infus yang sama dinyatakan dalam tujuh cara:



Satu kantong cairan infus NaCl 0,9%, tujuh "bahasa" konsentrasi. Untuk berpindah dari satuan per volume (M, % b/v) ke satuan per massa (% massa, mol/kg, fraksi mol), kita membutuhkan massa jenis larutan (±1,005 g/mL).

Satuan	Pembilang	Penyebut	Berubah bila suhu berubah?	Sering dipakai untuk
% massa	massa zat terlarut	massa larutan	tidak	label pangan, asam pekat, bijih
% volume	volume zat terlarut	volume larutan	sedikit	alkohol, cairan antiseptik
% b/v	massa zat (g)	volume larutan (100 mL)	sedikit	infus, obat, pupuk cair
ppm, ppb	massa zat	massa larutan ($\times 10^6$, $\times 10^9$)	tidak	pencemar, logam berat, TDS
molaritas (M)	mol zat terlarut	volume larutan (L)	ya, sedikit	reaksi di laboratorium, titrasi
molalitas (m)	mol zat terlarut	massa pelarut (kg)	tidak	sifat koligatif (Bab 24)
fraksi mol (X)	mol satu komponen	mol semua komponen	tidak	campuran gas, tekanan uap

LANJUT · IB & OLIMPIADE

JEMBATAN MOLARITAS ↔ MOLALITAS

Untuk berpindah antara satuan "per volume" dan "per massa", kita butuh **massa jenis larutan** ρ (g/mL). Ambil 1 L larutan: massanya 1000ρ g, massa zat terlarutnya $M \cdot M_r$ g, sehingga massa pelarutnya $1000\rho - MM_r$ gram. Maka

$$m = \frac{1000\,M}{1000\,\rho - M\,M_r}$$

Untuk larutan encer dalam air, $\rho \approx 1$ dan MM_r kecil, sehingga $m \approx M$. Cek dengan infus: $m = 154/(1004{,}6 - 9{,}0) = 0{,}155$ mol/kg ✔. Untuk larutan pekat, perbedaannya besar sekali. Larutan NaOH 50% massa ($\rho = 1{,}52$ g/mL) adalah $10 \times 1{,}52 \times 50/40 = 19{,}0$ M, tetapi molalitasnya $19\,000/(1520 - 760) = 25{,}0$ mol/kg, karena separuh massanya adalah zat terlarut.

Mengapa molalitas dan fraksi mol bisa dikonversi tanpa massa jenis?

Keduanya hanya memakai massa dan mol, tanpa volume. Ambil 1 kg pelarut: ada m mol zat terlarut dan $1000/M_{r,\text{pelarut}}$ mol pelarut. Jadi $X_{\text{terlarut}} = \dfrac{m}{m + 1000/M_{r,\text{pelarut}}}$. Untuk air, $1000/18{,}02 = 55{,}5$ mol, sehingga larutan 1 molal dalam air memiliki $X = 1/56{,}5 = 0{,}0177$.

23.6 Membuat larutan baku di laboratorium

Hasil titrasi, uji kualitas air, dan pembuatan obat bergantung pada satu hal: larutan yang konsentrasinya diketahui dengan tepat. Larutan seperti itu disebut **larutan baku** (larutan standar). Bila dibuat langsung dengan menimbang zat yang sangat murni dan stabil, zat itu disebut **baku primer**, misalnya natrium karbonat anhidrat, asam oksalat dihidrat $\mathrm{H_2C_2O_4 \cdot 2\,H_2O}$, atau kalium hidrogen ftalat. Natrium hidroksida bukan baku primer karena menyerap uap air dan bereaksi dengan $\mathrm{CO_2}$ di udara.

Alat kuncinya adalah **labu ukur**: labu berleher panjang dengan satu garis melingkar, **tanda tera**. Bila cairan diisi tepat sampai garis itu pada suhu yang tertera (biasanya 20 °C), volumenya tepat seperti yang tertulis, misalnya 250,0 mL. Ikuti langkah membuat 250,0 mL larutan tembaga(II) sulfat 0,100 M:

1 · Hitung massa zat

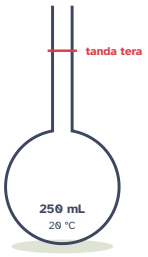
Target: 250,0 mL $CuSO_4$ 0,100 M

n = M × V = 0,100 × 0,2500 = 0,0250 mol

Ditimbang: kristal $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (terusi)

Mr = 63,5 + 32 + 4(16) + 5(18) = 249,5

m = 0,0250 × 249,5 = 6,24 g



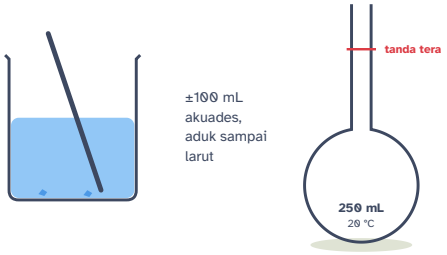
Langkah 1. Hitung dulu. Untuk 250,0 mL larutan 0,100 M dibutuhkan 0,0250 mol. Yang tersedia adalah kristal terusi $CuSO_4 \cdot 5\,H_2O$ (Mr 249,5), jadi massanya 6,24 g. Air kristal ikut ditimbang!

2 · Timbang dengan neraca



Langkah 2. Timbang ±6,24 g kristal dengan neraca analitik di atas kaca arloji atau gelas kimia kecil. Catat massa sebenarnya (misalnya 6,238 g) untuk menghitung konsentrasi yang tepat.

3 · Larutkan di gelas kimia



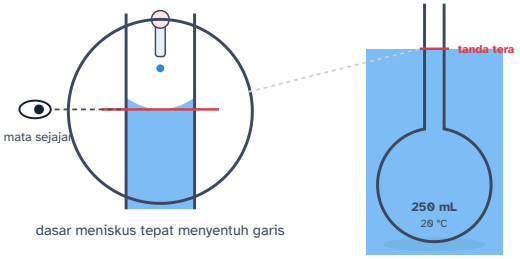
Langkah 3. Larutkan kristal dengan ±100 mL akuades di gelas kimia sambil diaduk. Melarutkan langsung di dalam labu ukur lebih sulit dan lebih lama.

4 · Pindahkan ke labu ukur



Langkah 4. Tuang larutan ke labu ukur 250 mL melalui corong. Bilas gelas kimia, batang pengaduk, dan corong 2–3 kali dengan akuades; semua air bilasan masuk ke labu agar tidak ada zat yang tertinggal.

5 · Tepatkan sampai tanda tera



Langkah 5. Tambahkan akuades sampai ±1 cm di bawah tanda tera, lalu tetes demi tetes dengan pipet tetes. Dasar meniskus harus tepat menyentuh tanda tera, dibaca dengan mata sejajar garis.

6 · Tutup, kocok, beri label



Langkah 6. Tutup labu, lalu balikkan 10–20 kali agar konsentrasinya sama di semua bagian. Pindahkan ke botol bersih dan beri label: nama zat, konsentrasi, tanggal, dan pembuat.

Bila larutan baku dibuat dengan mengencerkan asam pekat, ada satu aturan keselamatan yang tidak boleh dilanggar.

⚠️ **KESELAMATAN**

Selalu tuang **asam ke dalam air**, sedikit demi sedikit sambil diaduk, jangan sebaliknya. Pengenceran asam sulfat pekat melepaskan kalor yang sangat besar; bila air dituang ke asam, air bisa mendidih seketika dan memercikkan asam. Kerjakan di lemari asam, pakai kacamata pelindung, jas lab, dan sarung tangan, dan hanya di bawah pengawasan guru. Larutan sisa dibuang sesuai petunjuk guru, bukan langsung ke wastafel.



Korosif



Iritan



Bahaya lingkungan ($CuSO_4$)

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

Rumus kilat dari persen massa ke molaritas: $M = \dfrac{10 \times \rho \times \%}{M_r}$, dengan ρ dalam g/mL. Angka 10 muncul dari 1.000 mL ÷ 100%. Contoh: asam nitrat pekat 65% ($\rho = 1{,}40$ g/mL, Mr 63) memiliki $M = 10 \times 1{,}40 \times 65/63 = 14{,}4$ M.

COBA SENDIRI **Dari botol asam pekat ke larutan 0,10 M**

Botol asam klorida pekat bertuliskan: HCl 37%, $\rho = 1{,}19$ g/mL. Hitung molaritasnya, lalu tentukan volume yang harus diambil untuk membuat 500 mL HCl 0,10 M. (Mr HCl = 36,5)

1. Ambil 1 L = 1.000 mL larutan pekat: massanya $1.000 \times 1{,}19 = 1.190$ g.
2. Massa HCl di dalamnya $= 37\% \times 1.190 = 440$ g, yaitu $440/36{,}5 = 12{,}1$ mol. Jadi $M_1 = 12{,}1$ M.
3. Pengenceran: $V_1 = \dfrac{M_2 V_2}{M_1} = \dfrac{0{,}10 \times 500}{12{,}1} = 4{,}1$ mL.
4. Isi labu ukur 500 mL dengan ±300 mL akuades, tambahkan 4,1 mL HCl pekat perlahan di lemari asam, goyangkan, lalu tepatkan sampai tanda tera.

HCl pekat ≈ 12,1 M; ambil ±4,1 mL untuk membuat 500 mL HCl 0,10 M. Karena HCl pekat mudah menguap, larutan hasilnya biasanya dibakukan lagi dengan titrasi (Bab 27).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

AKTIVITAS: KONSENTRASI YANG "EFEKTIF"

Dalam **larutan ideal**, setiap partikel zat terlarut berperilaku seolah-olah sendirian di tengah pelarut. Larutan ion yang nyata tidak begitu: setiap kation dikelilingi "awan" anion dan sebaliknya (*atmosfer ion*), sehingga ion tampak kurang "aktif" daripada jumlahnya. Konsentrasi efektif ini disebut **aktivitas**:

$$a = \gamma \cdot \frac{c}{c^\circ}$$

$$\log \gamma_\pm = -0{,}509\,|z_+ z_-|\sqrt{I}$$

γ adalah koefisien aktivitas dan $I = \frac{1}{2}\sum c_i z_i^2$ adalah *kekuatan ion*. Rumus kedua adalah hukum pembatas Debye–Hückel (air, 25 °C), akurat hanya untuk larutan sangat encer. Untuk NaCl 0,010 M: $I = 0{,}010$, $\log \gamma_\pm = -0{,}0509$, $\gamma_\pm = 0{,}89$. Ion bermuatan ganda jauh lebih terpengaruh: untuk $MgSO_4$ 0,010 M, $I = 0{,}040$ dan $\gamma_\pm \approx 0{,}4$ (perkiraan kasar). Itulah sebabnya pH sejati didefinisikan sebagai $-\log a_{H^+}$, dan tetapan kesetimbangan termodinamika ditulis dengan aktivitas, bukan konsentrasi.

Kimia di sekitarmu

Es teh & sirup

Sirup gula pekat diencerkan 5–10 kali di setiap gelas. Penjual yang memakai gelas takar dan "garis batas" membuat es teh yang selalu sama manisnya: pengenceran yang rapi!

Oralit

Satu sachet untuk 200 mL air memberi glukosa dan natrium dengan perbandingan mol ±1 : 1, agar usus menyerap air paling cepat. Terlalu pekat justru memperparah diare.

Infus NaCl 0,9%

Konsentrasinya 0,154 M, isotonik dengan darah. Cairan yang terlalu encer atau terlalu pekat dapat merusak sel darah merah (Bab 24).

Air minum isi ulang

TDS meter membaca daya hantar listrik dari ion terlarut, lalu menampilkannya sebagai ppm. Kuman tidak terbaca oleh alat ini.

Pupuk cair

Label "larutkan 2 mL per liter air" berarti pengenceran ±500 kali. Larutan yang terlalu pekat membuat akar "terbakar" karena air justru tertarik keluar dari sel akar.

Cuka biang 25%

Cuka masak biasanya 4–5% asam asetat. Cuka biang harus diencerkan ±5 kali; meminumnya langsung dapat melukai kerongkongan.

Cek Cepat

Manakah larutan yang termasuk elektrolit lemah?

- NaCl(aq)
- HCl(aq)
- $\mathrm{CH_3COOH\,(aq)}$ (cuka)
- $\mathrm{C_{12}H_{22}O_{11}\,(aq)}$ (gula)

Sebanyak 50 mL larutan 0,4 M diencerkan menjadi 200 mL. Berapa molaritas akhirnya?

- 0,1 M
- 1,6 M
- 0,4 M
- 0,2 M

Mengapa minuman bersoda yang hangat lebih cepat "kempes" daripada yang dingin?

- $\mathrm{CO_2}$ lebih mudah larut dalam air hangat.
- Kelarutan gas berkurang ketika suhu naik.
- Gula di dalamnya menguap.
- Tekanan di dalam botol menjadi nol.

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. B

Tantangan Rumah: pelangi pengenceran sirup

Bahan: sirup merah (atau air dengan beberapa tetes pewarna makanan), air matang, 5 gelas plastik bening, gelas takar dapur, sendok, kertas putih, senter HP, spidol.

1. Gelas A: 50 mL sirup + air sampai 200 mL, aduk rata (sirup diencerkan 4 kali).
2. Gelas B: ambil 100 mL dari gelas A, tambahkan air sampai 200 mL, aduk.
3. Ulangi: 100 mL dari B ke gelas C, dari C ke D, dan dari D ke E, setiap kali ditambah air sampai 200 mL.
4. Jajarkan kelima gelas di atas kertas putih. Foto dari samping dengan senter HP menyinari dari belakang.
5. Hitung faktor pengenceran setiap gelas dibanding sirup asli (A = 4 kali, B = 8 kali, dan seterusnya).

Keselamatan: kerjakan bersama orang dewasa. Pakai gelas plastik agar tidak pecah, lap tumpahan sirup agar lantai tidak licin dan tidak mengundang semut, dan jangan meminum larutan percobaan. Buang sisanya ke wastafel dan bilas dengan banyak air.

Pertanyaan: Pada gelas keberapa warna merah hampir tak terlihat? Apakah gula dan zat warna di gelas itu benar-benar habis? Berapa kali lebih encer gelas E dibandingkan sirup aslinya?

RINGKASAN KILAT

Bab 23 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan **pelarut**, **zat terlarut**, dan **larutan**, serta mengelompokkan **elektrolit kuat, elektrolit lemah, dan nonelektrolit** dari partikel penyusunnya
- menjelaskan proses melarut pada tingkat partikel dan membaca **kurva kelarutan** (pengaruh suhu dan tekanan, hukum Henry)
- menyatakan kadar larutan dalam **persen massa, persen volume, persen b/v, ppm, dan ppb**
- menghitung **molaritas**, **pengenceran** $M_1V_1 = M_2V_2$, **molalitas**, dan **fraksi mol**, serta mengonversi antarsatuan dengan massa jenis
- membuat **larutan baku** dengan labu ukur secara tepat dan aman

Istilah kunci

Larutan · pelarut · zat terlarut · ion · larutan elektrolit · disosiasi · ionisasi · derajat ionisasi · sejenis melarutkan sejenis · Kelarutan · larutan jenuh · larutan tak jenuh · larutan lewat jenuh · ppm · ppb · Molaritas

Rumus penting

$$C = k_H \times P$$

Hukum Henry: gas larut sebanding tekanannya. Makin besar tekanan gas di atas cairan, makin banyak gas yang larut, asalkan suhunya tetap.

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}}\ (\text{mg})}{V_{\text{air}}\ (\text{L})}$$

ppm dan ppb dalam air. Untuk air yang encer, 1 L beratnya ±1 kg, jadi miligram per liter sama dengan bagian per sejuta.

$$M = \frac{m\ /\ M_r}{V}$$

Molaritas dari massa zat. Molaritas adalah jumlah mol zat terlarut di setiap liter larutan.

$$M_1\,V_1 = M_2\,V_2$$

Pengenceran. Saat diencerkan, mol zat terlarut tetap; yang bertambah hanya pelarutnya.

$$m = \frac{m_t\ /\ M_r}{p} \times 1000$$

Molalitas dan fraksi mol. Molalitas adalah mol zat terlarut untuk setiap kilogram pelarut, bukan larutan.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Di dalam larutan, yang membawa arus listrik adalah ion yang bergerak, bukan elektron yang berenang di air.
- Volume tidak selalu bisa dijumlahkan!
- Melarutkan 0,1 mol zat ke dalam 1 L air tidak menghasilkan larutan 0,1 M.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=23

🧩 Teka-teki untuk Bab 24

Penjual es puter menaburkan garam kasar di antara bongkahan es yang mengelilingi tabung adonan. Termometer menunjukkan campuran es dan garam itu bisa turun sampai sekitar −10 °C, jauh lebih dingin daripada es biasa. Padahal garam tidak dingin, bukan? Dari mana "dingin" itu datang?

▼ **Intip petunjuk**

Garam larut di lapisan air tipis di permukaan es dan **menurunkan titik beku** air. Es terus meleleh pada suhu di bawah 0 °C, dan untuk meleleh ia menyerap kalor dari sekelilingnya, termasuk dari adonan es krim. Besarnya penurunan titik beku bergantung pada **jumlah partikel** terlarut, dan untuk menghitungnya kamu butuh **molalitas** dari bab ini. Selamat datang di dunia sifat koligatif!

24 Sifat Koligatif: Yang Dihitung Hanya Jumlah Partikelnya

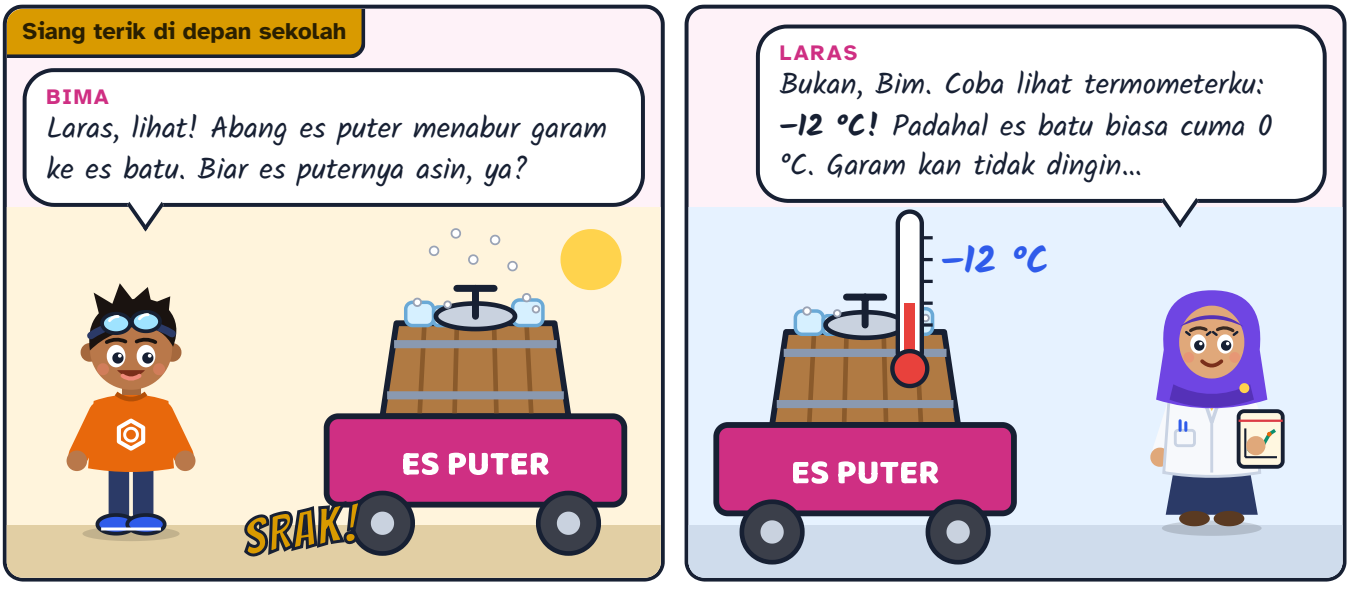
Penjual es puter menabur garam kasar ke es batu, dan adonan santan pun membeku. Ikan asin awet, sayur asinan layu, dan cairan infus harus sama "pekat"-nya dengan darah. Semua itu diatur oleh satu hal sederhana: berapa banyak partikel yang larut, bukan partikel apa.

Setelah bab ini, kamu bisa

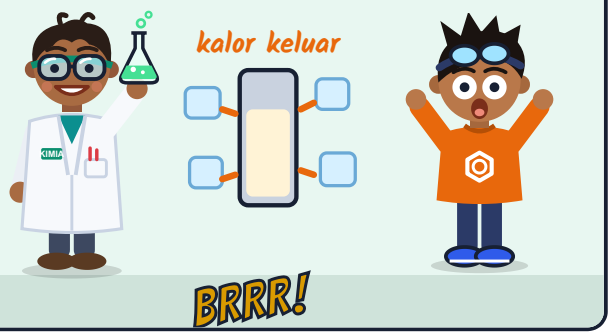
- menjelaskan **sifat koligatif** sebagai sifat yang hanya bergantung pada **jumlah partikel** zat terlarut, bukan jenisnya;
- menghitung **penurunan tekanan uap** dengan hukum Raoult, **kenaikan titik didih**, dan **penurunan titik beku** larutan;
- menjelaskan **osmosis** dan menghitung **tekanan osmotik**, misalnya cairan infus yang isotonik dengan darah;
- memakai **faktor van 't Hoff** i untuk larutan elektrolit;
- menentukan **massa molekul relatif** suatu zat dari data sifat koligatif.

GARAM YANG BIKIN BEKU

KOMIK · 4 PANEL



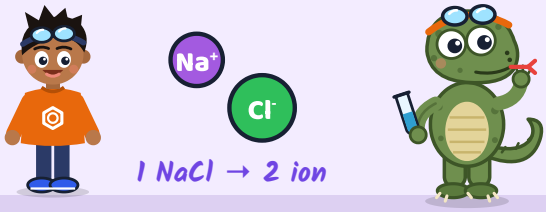
KAK TIRTA
Garam memang tidak dingin. Garam membuat es mencair di bawah 0 °C. Es yang mencair menyedot kalor dari sekitarnya, termasuk dari adonan santan!



Kimo ikut nimbrung...

KIMO
*Rahasianya: yang dihitung cuma **jumlah partikel**, bukan jenisnya. Satu NaCl pecah jadi dua ion!*

BIMA
Jadi garam dua kali lebih jago daripada gula?



Tebak Dulu!

Bima memasak air untuk mi instan. Ia menambahkan satu sendok teh garam (±6 g) ke dalam 1 liter air "supaya cepat mendidih". Apa yang sebenarnya terjadi pada titik didih air itu?

- Turun, sehingga air lebih cepat mendidih.
- Tidak berubah sama sekali.
- Naik, tetapi sangat sedikit (sekitar 0,1 °C), sehingga tidak mempercepat apa pun.
- Naik banyak, sampai sekitar 110 °C.

Jawabannya: naik sedikit sekali. Garam membuat titik didih *naik*, bukan turun. Untuk 6 g garam dalam 1 kg air, kenaikannya hanya ±0,1 °C, jadi tidak terasa. Air yang tiba-tiba bergolak saat garam ditabur bukan tanda mendidih lebih cepat: butir garam menjadi tempat lahirnya gelembung uap yang sudah "siap" terbentuk. Bab ini menjelaskan mengapa, dan cara menghitungnya.

24.1 Sifat koligatif: yang dihitung kepala, bukan wajah

Ambil dua gelas air. Ke gelas pertama larutkan satu sendok gula, ke gelas kedua satu sendok garam. Rasanya jelas berbeda: manis dan asin. Namun ada empat sifat larutan yang sama sekali tidak peduli pada rasa, warna, atau bau zat terlarut. Keempat sifat itu hanya "menghitung kepala": berapa banyak partikel zat terlarut yang menyelip di antara molekul pelarut.

Bahasa sederhana · Bayangkan pintu gerbong kereta pada jam sibuk. Molekul air adalah penumpang yang ingin turun ke peron. Zat terlarut adalah penumpang lain yang berdiri di dekat pintu dan tidak ikut turun. Siapa pun mereka, makin banyak orang yang menghalangi pintu, makin sedikit penumpang yang berhasil turun setiap menit. Yang penting jumlahnya, bukan siapa orangnya. Begitulah cara kerja sifat koligatif.

DEFINISI · SIFAT KOLIGATIF

Sifat koligatif larutan adalah sifat yang hanya bergantung pada **banyaknya partikel zat terlarut** (molekul atau ion) dalam sejumlah pelarut, tidak bergantung pada jenis zat terlarutnya. Ada empat sifat koligatif: **penurunan tekanan uap**, **kenaikan titik didih**, **penurunan titik beku**, dan **tekanan osmotik**. Kata *koligatif* berasal dari bahasa Latin *colligatus*, "terikat bersama". Rumus-rumus di bab ini berlaku tepat untuk larutan **encer** dengan zat terlarut yang **tidak mudah menguap**.

Sifat koligatif	Apa yang terjadi	Rumus (nonelektrolit)	Satuan konsentrasi	Contoh di sekitar kita
Penurunan tekanan uap	uap pelarut di atas larutan berkurang	$\Delta P = X_t\, P^\circ$	fraksi mol	air laut lebih lambat menguap daripada air tawar
Kenaikan titik didih	larutan mendidih di atas titik didih pelarut	$\Delta T_b = K_b\, m$	molalitas	cairan pendingin radiator lebih tahan mendidih
Penurunan titik beku	larutan membeku di bawah titik beku pelarut	$\Delta T_f = K_f\, m$	molalitas	es puter; air laut baru membeku pada ±−1,9 °C
Tekanan osmotik	pelarut merembes melewati membran menuju larutan	$\pi = M\,R\,T$	molaritas	cairan infus, ikan asin, air minum dari air laut

Untuk larutan elektrolit seperti garam dapur, setiap rumus di atas dikalikan dengan **faktor van 't Hoff** i, yaitu banyaknya partikel yang dihasilkan setiap satuan zat (subbab 24.6). Kedua satuan konsentrasi yang paling sering dipakai di bab ini sudah kamu kenal dari Bab 23:

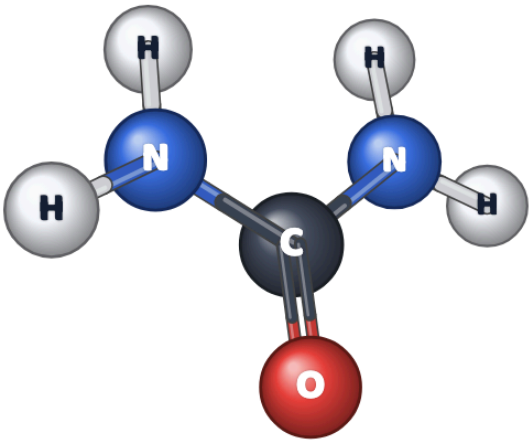
$$m = \frac{n_t}{\text{kg pelarut}} = \frac{g}{M_r} \times \frac{1000}{p} \qquad X_t = \frac{n_t}{n_t + n_1}$$

Di sini g adalah massa zat terlarut (gram), p massa pelarut (gram), n_t mol zat terlarut, dan n_p mol pelarut. Satu kilogram air berisi $1000/18 = 55{,}5$ mol molekul air.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Molalitas tidak sama dengan molaritas. **Molalitas** (m, mol/kg) dihitung per kilogram **pelarut**; **molaritas** (M, mol/L) dihitung per liter **larutan**. Titik didih dan titik beku memakai molalitas karena massa tidak ikut memuai saat suhu berubah, sedangkan tekanan osmotik memakai molaritas. Untuk larutan encer dalam air, nilai keduanya hampir sama.

MOLEKUL 3D **Satu molekul, satu partikel: zat terlarut nonelektrolit**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Urea CH_4N_2O Mr ≈ 60,06 PubChem ↗

Pupuk nitrogen paling banyak dipakai petani Indonesia (46% N).

Kelima zat ini larut dalam air tanpa pecah menjadi ion, jadi satu molekul tetap satu partikel. Bandingkan ukurannya: sukrosa (gula pasir, 45 atom) jauh lebih besar daripada urea (8 atom). Namun dalam larutan 1 molal, titik beku keduanya sama persis, yaitu –1,86 °C. Etilen glikol adalah bahan utama cairan pendingin radiator.

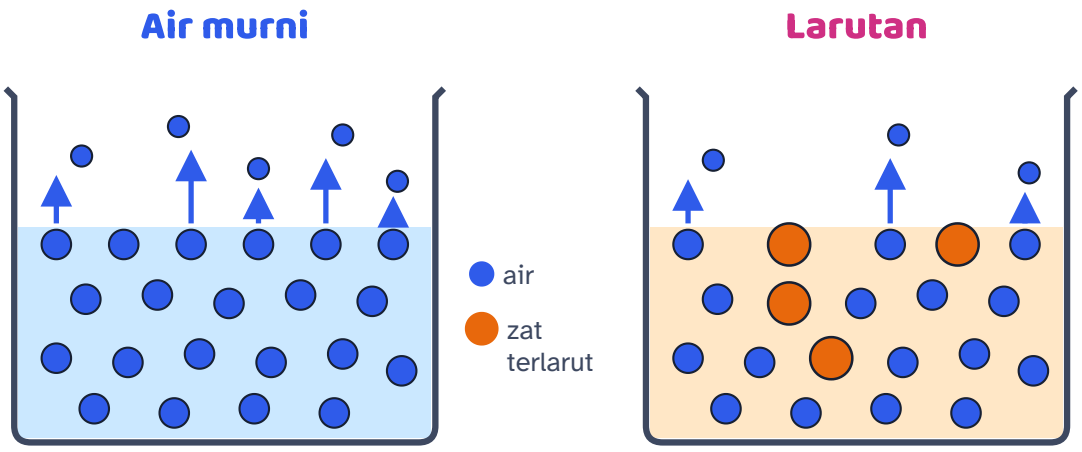
24.2 Penurunan tekanan uap: hukum Raoult

Petani garam di pesisir Madura mengalirkan air laut ke petak-petak tambak lalu membiarkan matahari bekerja. Air menguap, garam tertinggal. Pernahkah kamu memperhatikan bahwa air laut menguap sedikit lebih lambat daripada air tawar? Molekul air di permukaan air laut lebih "sulit" melepaskan diri.

Di dalam botol tertutup, sebagian molekul air di permukaan terus lepas menjadi uap, sementara sebagian uap kembali mengembun. Saat laju keduanya sama, tekanan yang diberikan uap itu disebut **tekanan uap jenuh**, P°. Makin panas airnya, makin banyak molekul yang cukup bertenaga untuk lepas, sehingga P° makin besar.

Suhu air	20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C

Tekanan uap jenuh P°	17,5 mmHg	23,8 mmHg	31,8 mmHg	55,3 mmHg	149 mmHg	355 mmHg	760 mmHg (1 atm)



Molekul air (biru) di permukaan larutan harus berbagi tempat dengan partikel zat terlarut (oranye), yang juga menarik molekul air di sekitarnya. Lebih sedikit molekul air yang lolos per detik, sehingga tekanan uap larutan lebih rendah.

HUKUM RAOULT

Untuk larutan dengan zat terlarut yang tidak mudah menguap, tekanan uap larutan sama dengan fraksi mol pelarut dikali tekanan uap pelarut murni:

$$P = X_p \cdot P^\circ \qquad \Delta P = P^\circ - P = X_t \cdot P^\circ$$

X_p = fraksi mol pelarut, X_t = fraksi mol zat terlarut, dan $X_p + X_t = 1$. Penurunan tekanan uap ΔP sebanding dengan fraksi mol zat terlarut, tidak peduli zat apa itu.

TAMU DARI MASA LALU

Pada tahun 1880-an, kimiawan Prancis **François-Marie Raoult** dengan tekun mengukur titik beku dan tekanan uap puluhan larutan. Ia menemukan pola yang mengejutkan: satu mol zat terlarut apa pun (gula, urea, atau gliserol) menurunkan tekanan uap dan titik beku pelarut yang sama dengan besar yang hampir sama. Pola inilah yang kini kita sebut hukum Raoult. Data titik bekunya juga menjadi cara pertama yang praktis untuk menentukan massa molekul zat-zat baru.

RUMUS HIDUP

Hukum Raoult: tekanan uap larutan

$$P = \frac{n_p}{n_p + i\, n_t} \times P^\circ$$

Tekanan uap larutan = bagian pelarut di antara semua partikel × tekanan uap pelarut murni.

- n_t Mol zat terlarut `mol`
- n_p Mol pelarut `mol`
- i Faktor van 't Hoff
- P° Tekanan uap pelarut murni `mmHg`
- P Tekanan uap larutan `mmHg`

TEKANAN UAP LARUTAN

31,24

mmHg

1 molal nonelektrolit dalam air: tekanan uap turun ±1,8%

Fraksi mol pelarut **0,982**; tekanan uap turun **0,563** mmHg, yaitu **1,77** % dari tekanan uap pelarut murni.

Cek satuan: mol/mol (tanpa satuan) × mmHg = mmHg ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLIGATIF-RAOULT

KERJAKAN BERSAMA **Air gula di siang hari**

Sebanyak 18 g glukosa ($M_r = 180$) dilarutkan dalam 90 g air pada 30 °C. Tekanan uap air murni pada suhu itu 31,82 mmHg. Hitung tekanan uap larutan dan penurunannya.

1. Mol zat terlarut: $n_t = 18/180 = 0{,}1$ mol. Mol pelarut: $n_p = 90/18 = 5$ mol.
2. Fraksi mol air: $X_p = \dfrac{5}{5 + 0{,}1} = 0{,}980$.
3. Hukum Raoult: $P = 0{,}980 \times 31{,}82 = 31{,}20$ mmHg.
4. Penurunan: $\Delta P = 31{,}82 - 31{,}20 = 0{,}62$ mmHg (atau langsung $X_t P^\circ = \frac{0{,}1}{5{,}1} \times 31{,}82$).

$P = 31{,}20$ mmHg, turun 0,62 mmHg (±2%). Kecil, tetapi cukup untuk menaikkan titik didih dan menurunkan titik beku, seperti yang akan kamu lihat.

MENGAPA GARAM DAPUR "BASAH" DI MUSIM HUJAN?

Garam dapur biasa mengandung sedikit pengotor seperti magnesium klorida yang sangat suka air. Pengotor itu menyerap uap air dan membentuk lapisan tipis larutan garam jenuh di permukaan kristal. Tekanan uap larutan jenuh itu lebih rendah daripada tekanan uap air di udara yang lembap, sehingga uap air terus mengembun ke garam. Garamnya pun menggumpal dan basah. Inilah penurunan tekanan uap yang bisa kamu lihat di dapur!

24.3 Kenaikan titik didih

Air mendidih ketika tekanan uapnya sama dengan tekanan udara di atasnya. Di tepi pantai (1 atm = 760 mmHg), hal itu terjadi pada 100 °C. Larutan punya tekanan uap yang lebih rendah, jadi pada 100 °C tekanan uapnya belum mencapai 760 mmHg. Larutan harus dipanaskan *sedikit lebih tinggi* untuk mendidih. Selisih suhu itu disebut **kenaikan titik didih**, ΔT_b (*b* dari *boiling*).

Bahasa sederhana · Ingat pintu kereta tadi. Karena zat terlarut menghalangi molekul air keluar, air harus diberi "dorongan" lebih kuat agar cukup banyak molekul yang lolos untuk membentuk gelembung uap. Dorongan itu adalah suhu yang lebih tinggi. Jadi air garam mendidih sedikit di atas 100 °C.

ATURAN · KENAIKAN TITIK DIDIH

Untuk larutan encer nonelektrolit:

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \qquad T_b\,\text{larutan} = T_b\,\text{pelarut} + \Delta T_b$$

K_b adalah **tetapan kenaikan titik didih molal**, khas untuk setiap pelarut (air: 0,52 °C·kg/mol). Artinya, setiap 1 mol partikel zat terlarut dalam 1 kg air menaikkan titik didih sebesar 0,52 °C.

Pelarut	Titik beku (°C)	K_f (°C·kg/mol)	Titik didih (°C)	K_b (°C·kg/mol)
Air	0	1,86	100	0,52
Benzena	5,5	5,12	80,1	2,53
Etanol	−114,6	1,99	78,4	1,22
Asam asetat	16,6	3,90	117,9	2,93
Sikloheksana	6,6	±20	80,7	2,79
Kamfer (kapur barus alami)	±179	±40	±207	±5,6

Grafik Hidup berikut adalah **diagram fasa** air (Bab 2) yang diperbesar di sekitar 0–100 °C. Garis biru adalah air murni, garis putus-putus magenta adalah larutan. Tambahkan zat terlarut dan perhatikan: kurva tekanan uap larutan **turun**, sehingga baru memotong garis 1 atm pada suhu yang lebih tinggi. Garis beku larutan **bergeser ke kiri**. Satu penyebab, tiga akibat.

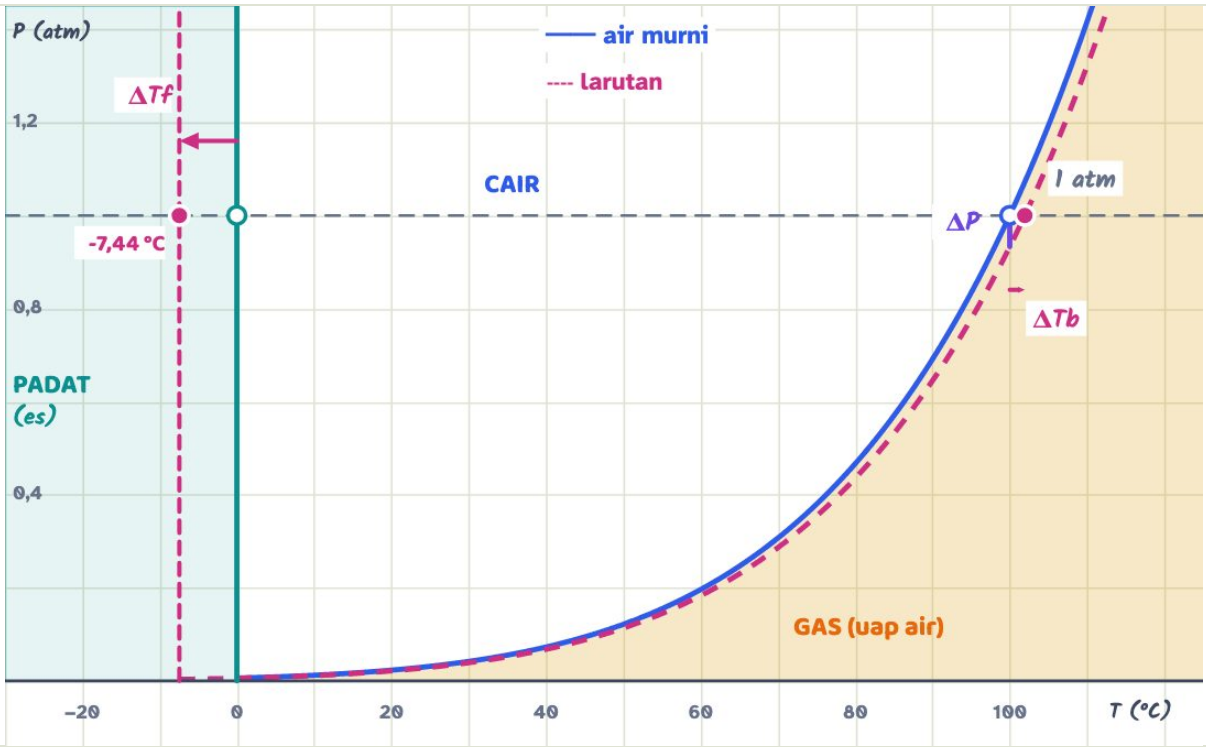
GRAFIK HIDUP

Diagram fasa air murni vs larutan: geser molalitasnya!

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-24

$$\Delta T_f = K_f\, m\, i \qquad \Delta T_b = K_b\, m\, i$$

$$T_f = -7{,}44\,^\circ\text{C} \qquad T_b \approx 102{,}08\,^\circ\text{C}$$



i = 2: seperti NaCl yang terionisasi sempurna

ΔTf = Kf·m·i	titik beku larutan	ΔTb = Kb·m·i	titik didih (kurva Raoult)
7,44 °C	-7,44 °C	2,08 °C	101,95 °C

P uap larutan pada 100 °C
0,933 atm

Geser molalitas dari 0 ke 4. Panah magenta di kiri adalah ΔT_f, panah di kanan adalah ΔT_b, dan garis ungu di 100 °C adalah penurunan tekanan uap ΔP. Perhatikan: ΔT_f selalu ±3,6 kali ΔT_b karena $K_f/K_b = 1{,}86/0{,}52$. Bandingkan dua bacaan titik didih: kurva Raoult dan rumus $K_b m i$ cocok untuk larutan encer, tetapi mulai berbeda saat larutan pekat. Wilayah kuning adalah daerah gas.

RUMUS HIDUP

Kenaikan titik didih

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$$

Setiap mol partikel zat terlarut dalam satu kilogram pelarut menaikkan titik didih sebesar Kb derajat.

- K_b Tetapan titik didih molal `°C·kg/mol`
- m Molalitas `mol/kg`
- i Faktor van 't Hoff
- ΔT_b Kenaikan titik didih `°C`

KENAIKAN TITIK DIDIH

0,52

°C

pelarut air

Konsentrasi partikel **1** mol/kg. Kalau pelarutnya air (Kb 0,52), larutan ini mendidih pada **100,52** °C.

Cek satuan: (°C·kg/mol) × (mol/kg) = °C ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLIGATIF-DIDIH

CONTOH **Seberapa tinggi air gula mendidih?**

Sebanyak 34,2 g gula pasir (sukrosa, $M_r = 342$) dilarutkan dalam 500 g air. Pada tekanan 1 atm, berapa titik didih larutan? (K_b air = 0,52 °C·kg/mol)

1. Mol gula: $n = 34{,}2/342 = 0{,}1$ mol.
2. Molalitas: $m = 0{,}1\ \text{mol}/0{,}500\ \text{kg} = 0{,}2$ mol/kg.
3. $\Delta T_b = K_b \cdot m = 0{,}52 \times 0{,}2 = 0{,}104$ °C.
4. $T_b = 100 + 0{,}104 = 100{,}104$ °C.

Larutan mendidih pada ±100,10 °C. Tiga sendok makan gula hanya menaikkan titik didih seperseratus derajat. Memasak sirup kental, yang gulanya jauh lebih banyak, bisa mencapai 105–115 °C.

MITOS

"Garam membuat air lebih cepat mendidih."

FAKTA

Garam justru menaikkan titik didih, walau hanya sedikit. Air garam butuh sedikit lebih banyak kalor untuk mendidih. Gelembung yang muncul saat garam ditabur berasal dari butir garam yang menjadi tempat gelembung terbentuk.

MITOS

"Air radiator diberi cairan pendingin supaya tidak beku. Di Indonesia itu tidak perlu."

FAKTA

Di negeri tropis, cairan pendingin (campuran air dan etilen glikol) terutama menaikkan titik didih sehingga mesin panas tidak cepat membuat air mendidih, dan mengandung zat antikarat.

MITOS

"Minum air laut bisa menghilangkan haus saat terdampar di laut."

FAKTA

Air laut jauh lebih pekat daripada cairan tubuh. Ginjal harus membuang garam berlebih memakai air dari tubuh, sehingga dehidrasi makin parah.

MITOS

"Garam mendinginkan es karena garam itu dingin."

FAKTA

Garam bersuhu ruang. Garam membuat es mencair di bawah 0 °C, dan pencairan menyerap kalor dari sekitarnya. Dingin itu datang dari es yang mencair.

24.4 Penurunan titik beku: rahasia es puter

Pada 0 °C, es dan air murni hidup berdampingan dengan damai. Setiap detik, sejumlah molekul air menempel ke kristal es, dan jumlah yang sama lepas dari kristal. Sekarang larutkan garam ke dalam airnya. Ion-ion garam tidak bisa masuk ke dalam kisi kristal es, tetapi mereka "mengganggu" molekul air yang hendak menempel. Laju membeku turun, laju mencair tetap. Hasilnya: es mencair. Supaya keseimbangan kembali, suhu harus diturunkan. Inilah **penurunan titik beku**, ΔT_f (*f* dari *freezing*).

Bahasa sederhana · Gampangnya: zat terlarut membuat air "malas" membeku. Air garam baru membeku jika didinginkan di bawah 0 °C. Makin banyak partikel garam, makin dingin yang dibutuhkan. Karena itulah es di dalam campuran es dan garam terus mencair, dan pencairan itu menyedot panas dari sekitarnya.

ATURAN · PENURUNAN TITIK BEKU

Untuk larutan encer nonelektrolit:

$$\Delta T_f = K_f \cdot m \qquad T_f \,\text{larutan} = T_f \,\text{pelarut} - \Delta T_f$$

K_f adalah **tetapan penurunan titik beku molal** (air: 1,86 °C·kg/mol). Bila molalitas ditulis dari massa: $\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p}$.

RUMUS HIDUP

Penurunan titik beku larutan dalam air

$$\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p} \cdot i$$

Penurunan titik beku = Kf × molalitas × jumlah partikel per satuan zat.

- g Massa zat terlarut `g`
- M_r Massa molar zat terlarut `g/mol`
- p Massa air `g`
- i Faktor van 't Hoff
- ΔT_f Penurunan titik beku `°C`

PENURUNAN TITIK BEKU

3,72

°C

garam dapur NaCl

Molalitas **1** mol/kg, jadi larutan baru membeku pada **-3,72** °C.

Cek satuan: (°C·kg/mol) × (g ÷ g/mol) × (1/kg) = °C ✔

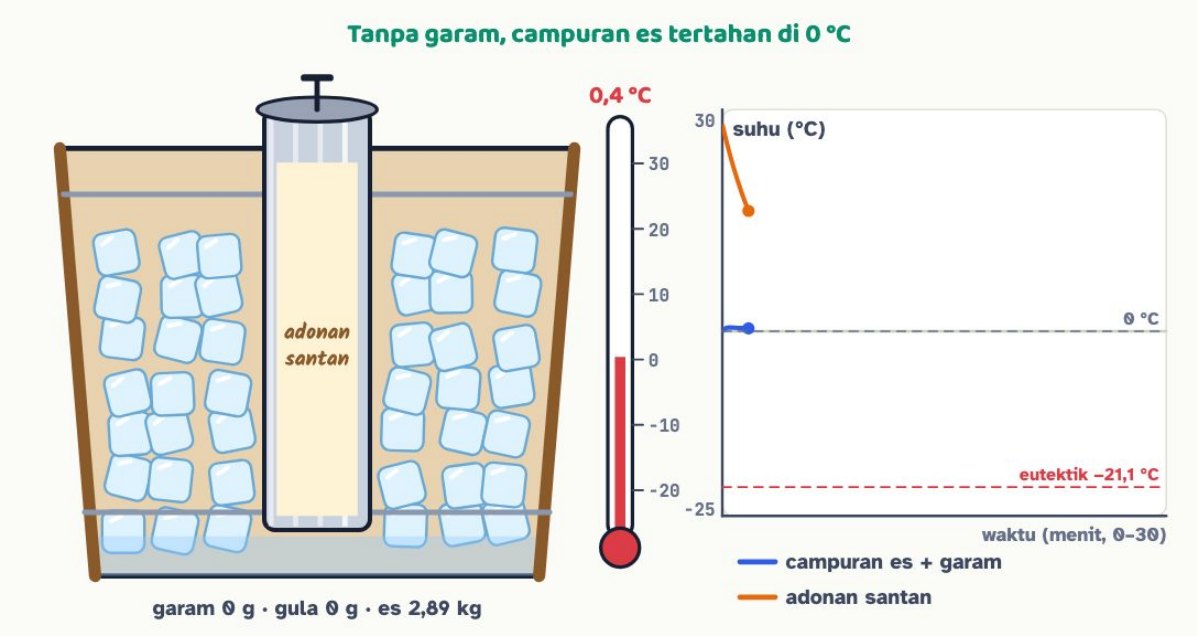
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLIGATIF-BEKU

Lalu dari mana datangnya dingin pada es puter? Saat garam ditabur ke es, garam larut di lapisan tipis air di permukaan es. Titik beku air garam itu jauh di bawah 0 °C, jadi es di sekitarnya mencair. Untuk mencair, setiap gram es membutuhkan 334 joule **kalor lebur**. Kalor itu diambil dari apa saja di dekatnya: dari es itu sendiri, dari air garam, dari dinding tong, dan dari adonan santan di dalam tabung logam. Suhu campuran terus turun sampai sama dengan titik beku air garamnya. Cobalah sendiri di Lab Mini berikut.

LAB MINI

Es Puter Virtual: tabur garam, lihat suhunya anjlok

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-24



Waktu	Suhu es + air garam	Titik beku air lelehan	Kadar garam air lelehan
1,8 menit	0,4 °C	-0 °C	0 %

Suhu adonan	Adonan
16,1 °C	masih cair

Tong berisi 3 kg es batu dan sedikit air lelehan. Adonan santan (28 °C) ada di tabung logam di tengah. Jalankan dulu **tanpa garam**: apakah adonan bisa membeku? Lalu tekan **Tabur garam** dan bandingkan dengan **Tabur gula** dalam takaran gram yang sama. Nyalakan **Putar tabung** seperti abang es puter. Bisakah suhunya turun di bawah −21 °C?

KIMIA NUSANTARA · ES PUTER, ES KRIM TRADISIONAL

Es puter disebut "puter" karena tabung adonannya diputar terus-menerus di dalam tong kayu berisi es batu dan garam kasar. Adonannya santan, gula, sedikit garam, dan rasa pilihan: kelapa muda, durian, nangka, alpukat, atau kacang hijau. Garam kasar dari tambak garam Madura dan pantai utara Jawa dipakai karena murah dan butirannya larut perlahan, sehingga dinginnya awet. Campuran es dan garam di dalam tong bisa mencapai ±−10 sampai −20 °C. Sambil memutar, penjual mengerok adonan yang membeku di dinding tabung agar kristal esnya kecil-kecil dan teksturnya lembut.

FAKTA DARI KIMO

Air laut (kadar garam ±3,5%) baru membeku pada ±−1,9 °C. Es yang terbentuk di laut kutub ternyata hampir tawar, karena ion garam tidak bisa masuk ke dalam kisi kristal es dan tertinggal di air laut di sekitarnya. Prinsip yang sama terjadi di tong es puter: es tetap air murni, garamnya berkumpul di air lelehan.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

ΔT_f adalah **besarnya penurunan**, selalu bernilai positif, bukan titik bekunya. Titik beku larutan = titik beku pelarut − ΔT_f. Untuk air, $\Delta T_f = 3{,}72$ °C berarti larutan membeku pada −3,72 °C. Untuk pelarut benzena (titik beku 5,5 °C), $\Delta T_f = 1{,}02$ °C berarti larutan membeku pada 4,48 °C, masih di atas nol!

COBA SENDIRI **Zat putih misterius**

Laras menemukan sebungkus serbuk putih berlabel "pupuk N". Ia melarutkan 6,0 g serbuk itu (nonelektrolit) dalam 250 g air. Larutan membeku pada −0,744 °C. Tentukan M_r zat itu dan tebak identitasnya. (K_f air = 1,86 °C·kg/mol)

1. $\Delta T_f = 0 - (-0{,}744) = 0{,}744$ °C.
2. Rumus: $\Delta T_f = K_f \cdot \dfrac{g}{M_r} \cdot \dfrac{1000}{p}$, sehingga $M_r = \dfrac{K_f \cdot g \cdot 1000}{\Delta T_f \cdot p}$.
3. $M_r = \dfrac{1{,}86 \times 6{,}0 \times 1000}{0{,}744 \times 250} = \dfrac{11\,160}{186} = 60.$

$M_r = 60$. Pupuk nitrogen nonelektrolit dengan M_r 60 adalah urea, $\mathrm{CO(NH_2)_2}$ (Bab 17). Sifat koligatif menjadi "timbangan molekul"!

ADU CEPAT **Kilat titik beku**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-24

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

ΔTf = Kf × m × i. Contoh: m = 0,5 dan i = 2 → 1,86 × 0,5 × 2 = 1,86 °C.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DARI MANA ANGKA 1,86 DAN 0,52? JUGA: BATAS EUTEKTIK

Termodinamika (lewat hukum Raoult dan persamaan Clausius–Clapeyron) memberi rumus tetapan untuk larutan encer:

$$K_f = \frac{R\,T_f^{2}\,M_{\text{pelarut}}}{\Delta H_{\text{lebur}}} \qquad K_b = \frac{R\,T_b^{2}\,M_{\text{pelar}}}{\Delta H_{\text{uap}}}$$

Untuk air ($M = 0{,}018015$ kg/mol, $\Delta H_{\text{lebur}} = 6{,}01$ kJ/mol, $\Delta H_{\text{uap}} = 40{,}7$ kJ/mol): $K_f = \frac{8{,}314 \times 273{,}15^2 \times 0{,}018015}{6010} = 1{,}86$ K·kg/mol dan $K_b = \frac{8{,}314 \times 373{,}15^2 \times 0{,}018015}{40\,660} = 0{,}513$ K·kg/mol. Kalor lebur air jauh lebih kecil daripada kalor uapnya, sehingga K_f lebih besar. Kamfer punya $K_f \approx 40$ karena kalor leburnya kecil dan titik lelehnya tinggi; itulah sebabnya kamfer dipakai untuk menentukan M_r dengan **metode Rast**.

Apakah es puter bisa terus didinginkan dengan menambah garam? Tidak. Pada kadar 23,3% NaCl dan suhu **–21,1 °C**, air garam berada dalam kesetimbangan dengan es *dan* kristal garam ($\text{NaCl}\cdot 2\,\text{H}_2\text{O}$) sekaligus. Titik ini disebut **titik eutektik**. Garam tambahan tidak lagi larut, jadi suhu tidak bisa turun lebih jauh. Rumus ideal memberi $\Delta T_f = 1{,}86 \times 5{,}19 \times 2 = 19{,}3$ °C untuk kadar itu; nilai nyata 21,1 °C lebih besar karena ion-ion terhidrasi "mengikat" sebagian molekul air sehingga air bebasnya lebih sedikit. Larutan pekat tidak lagi ideal.

Tantangan Rumah: es krim dalam kantong

Bahan: 2 kantong plastik klip berukuran kecil, 1 kantong plastik klip besar (atau kantong tebal), ±2 gelas es batu yang dihancurkan, 6 sendok makan garam kasar, 1 gelas susu cair, 1 sendok makan gula, termometer dapur (bila ada), handuk kecil atau sarung tangan kain.

1. Masukkan susu dan gula ke kantong kecil, tutup rapat. Masukkan ke kantong kecil kedua (lapisan ganda supaya air garam tidak bocor masuk).
2. Isi kantong besar dengan es hancur. Ukur suhunya bila ada termometer.
3. Taburkan garam ke es, masukkan kantong susu, tutup kantong besar rapat.
4. Bungkus dengan handuk, lalu kocok dan remas perlahan selama 8–10 menit. Ukur lagi suhu campuran es dan garam.
5. Ulangi dengan gula sebagai pengganti garam di kantong besar. Mana yang lebih dingin?

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Campuran es dan garam bisa mencapai −10 °C atau lebih rendah dan dapat melukai kulit seperti luka bakar dingin, jadi selalu pegang kantong dengan handuk atau sarung tangan dan jangan menempelkannya ke kulit lebih dari beberapa detik. Bila semua alat bersih dan khusus untuk makanan, es krimnya boleh dinikmati: bilas dulu bagian luar kantong kecil agar air garam tidak ikut masuk. Buang air garam ke wastafel sambil dialiri air.

Pertanyaan: Mengapa es yang ditaburi garam lebih dingin daripada es yang ditaburi gula dengan massa sama? Hitung perbandingan jumlah partikel dalam 1 g garam (M_r 58,5, i = 2) dan 1 g gula (M_r 342).

24.5 Tekanan osmotik: dinding yang pilih-pilih

Tebak Dulu!

Sebatang kentang mentah direndam dalam air garam pekat selama satu jam. Apa yang terjadi?

- Garam masuk ke kentang, sehingga kentang makin berat dan makin keras.
- Tidak terjadi apa-apa, karena garam tidak bisa menembus kentang.
- Garam masuk dan air masuk sama banyak, sehingga massanya tetap.
- Air keluar dari sel-sel kentang, sehingga kentang menjadi lemas dan lebih ringan.

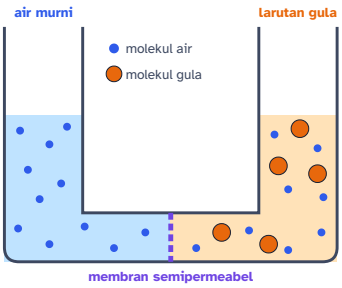
Jawabannya: air keluar dari sel kentang. Membran sel kentang mudah dilewati air, tetapi sulit dilewati ion garam. Air berpindah dari cairan sel (lebih encer) ke air garam (lebih pekat). Sel kehilangan air, mengempis, dan kentang menjadi lentur. Peristiwa ini disebut **osmosis**, dan yang berpindah adalah *pelarutnya*, bukan garamnya.

Mengapa sawi yang diremas dengan garam menjadi layu dan berair saat membuat asinan? Mengapa ikan asin bisa awet berbulan-bulan tanpa kulkas? Jawabannya ada pada dinding tipis yang pilih-pilih.

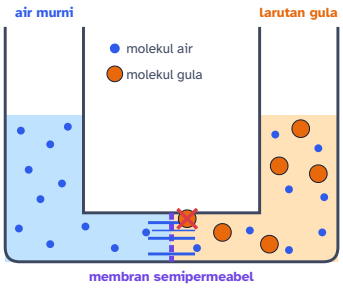
DEFINISI · OSMOSIS DAN TEKANAN OSMOTIK

Membran semipermeabel adalah selaput yang dapat dilewati molekul pelarut (misalnya air), tetapi tidak dapat dilewati partikel zat terlarut. **Osmosis** adalah perpindahan pelarut melalui membran semipermeabel dari larutan yang **lebih encer** (atau pelarut murni) ke larutan yang **lebih pekat**. **Tekanan osmotik** (π) adalah tekanan yang harus diberikan pada larutan untuk tepat menghentikan osmosis.

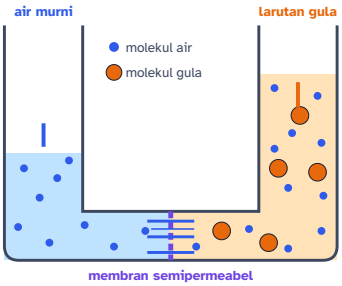
Bahasa sederhana · Membran semipermeabel bekerja seperti saringan teh yang sangat-sangat halus: lubangnya cukup besar untuk molekul air yang kecil, tetapi terlalu sempit bagi molekul gula yang besar atau bagi ion yang terbungkus molekul air. Air merembes ke sisi yang lebih pekat seolah-olah ingin "mengencerkan" larutan itu.



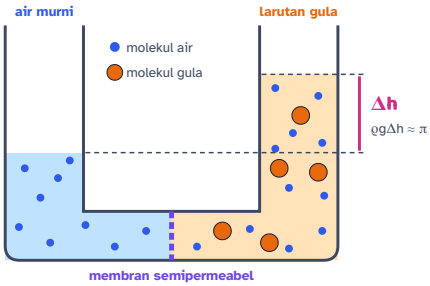
Langkah 1. Pipa U dengan membran semipermeabel di dasar. Kiri: air murni. Kanan: larutan gula. Mula-mula tinggi permukaan keduanya sama.



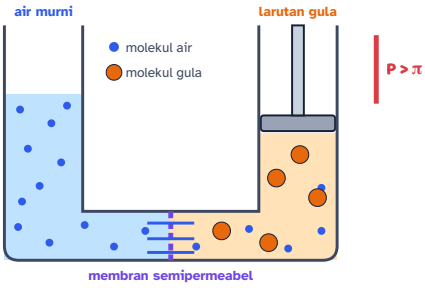
Langkah 2. Molekul air menembus membran ke dua arah, tetapi dari kiri lebih sering, karena di kanan sebagian molekul air "sibuk" di sekitar molekul gula. Molekul gula terlalu besar: tidak bisa lewat.



Langkah 3. Akibatnya air mengalir bersih ke kanan. Permukaan kanan naik, kiri turun. Larutan gula menjadi sedikit lebih encer.



Langkah 4. Aliran berhenti saat tekanan hidrostatik kolom setinggi Δh kira-kira sama dengan tekanan osmotik larutan: $\pi \approx \rho g \Delta h$.



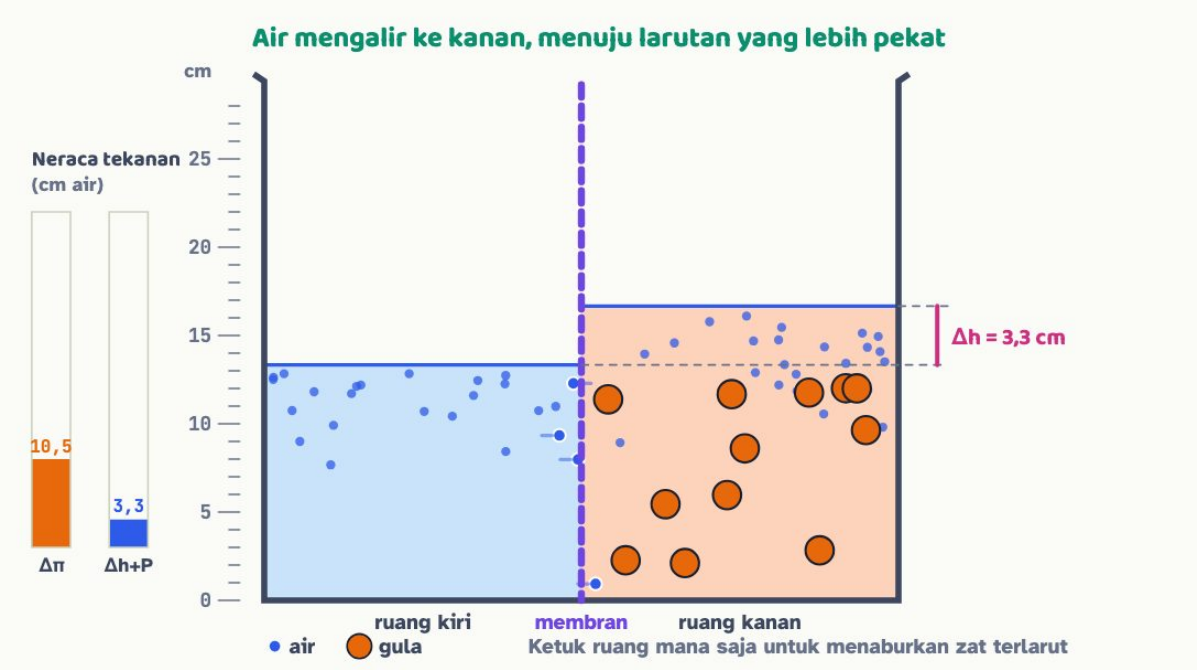
Langkah 5. Osmosis balik: tekan larutan dengan piston bertekanan lebih besar daripada π. Air didorong ke kiri, gula tertahan. Begitulah air tawar dibuat dari air laut.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Dalam osmosis, yang berpindah adalah **pelarut** (air), bukan zat terlarut. Arahnya dari larutan encer ke larutan pekat, seolah-olah air "mengejar" partikel zat terlarut. Kalau zat terlarut yang menyebar dari pekat ke encer, itu namanya **difusi**, dan difusi tidak membutuhkan membran semipermeabel.

LAB MINI **Membran Semipermeabel: siapa yang boleh lewat?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-24



Beda tinggi Δh (kanan – kiri)
3,3 cm

Selisih tekanan osmotik Δπ
10,5 cm air

Aliran air bersih
ke kanan →

Molekul air menyeberang
→ 9 · ← 2

Molekul air (titik biru kecil) menyeberangi membran ke dua arah; partikel zat terlarut selalu terpantul. Atur jumlah zat terlarut di kiri dan kanan, atau **ketuk salah satu ruang** untuk menaburkan zat terlarut. Kapan permukaan berhenti bergerak? Coba samakan kepekatan kedua ruang (isotonik). Lalu ganti gula dengan garam dalam jumlah satuan yang sama: mengapa kolom naik lebih tinggi? Terakhir, beri tekanan piston yang besar untuk melihat **osmosis balik**.

HUKUM VAN 'T HOFF · TEKANAN OSMOTIK

Untuk larutan encer nonelektrolit, tekanan osmotik mirip dengan tekanan gas ideal:

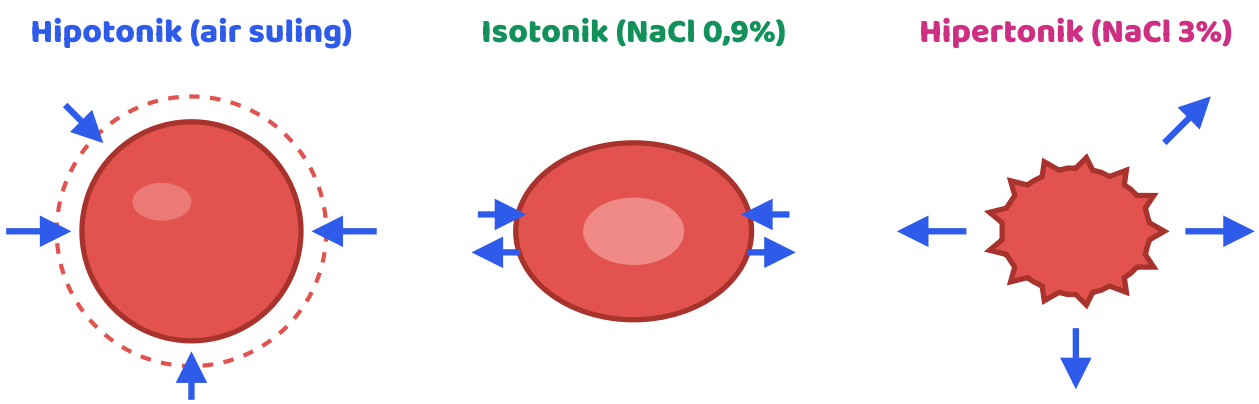
$$\pi = M \cdot R \cdot T \qquad (\text{bandingkan } P = \tfrac{n}{V}RT)$$

M = molaritas (mol/L), $R = 0{,}082$ L·atm/(mol·K), dan T = suhu dalam **kelvin**. Hasilnya dalam atm.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1748, **Jean-Antoine Nollet** dari Prancis menutup bejana berisi alkohol dengan selaput kandung kemih hewan lalu merendamnya dalam air. Selaputnya menggembung, bahkan pecah: air merembes masuk. Tahun 1877, ahli botani Jerman **Wilhelm Pfeffer** membuat membran semipermeabel buatan di dalam pot tanah liat berpori dan berhasil mengukur tekanan osmotik larutan gula. Dari data Pfeffer, **Jacobus van 't Hoff** dari Belanda menemukan (1886) bahwa tekanan osmotik mengikuti rumus yang mirip hukum gas ideal. Atas penemuan ini dan karyanya tentang laju reaksi, ia menerima **Hadiah Nobel Kimia yang pertama** pada 1901.

Sel-sel tubuh kita dibungkus membran yang bersifat semipermeabel. Karena itu, kepekatan cairan di sekeliling sel sangat penting. Dua larutan yang tekanan osmotiknya sama disebut **isotonik**. Larutan yang tekanan osmotiknya lebih rendah disebut **hipotonik**, dan yang lebih tinggi disebut **hipertonik**.



Sel darah merah dalam tiga lingkungan. Panah biru menunjukkan arah aliran air. Itulah sebabnya cairan infus harus isotonik dengan darah.

RUMUS HIDUP

Tekanan osmotik

$$\pi = M \cdot R \cdot T \cdot i$$

Tekanan osmotik = konsentrasi partikel × R × suhu mutlak, seperti tekanan gas ideal.

- M Molaritas `mol/L`
- T Suhu mutlak `K`
- i Faktor van 't Hoff
- π Tekanan osmotik `atm`

TEKANAN OSMOTIK

7,83

atm

±isotonik dengan darah (±7,7 atm)

Konsentrasi partikel **0,308** mol/L. Tekanan sebesar ini setara dengan kolom air setinggi **80,877** meter!

Cek satuan: (mol/L) × (L·atm/(mol·K)) × K = atm ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLIGATIF-OSMOTIK

COBA SENDIRI

Mengapa infus memakai NaCl 0,9%?

Cairan infus "NaCl 0,9%" berisi 0,9 g NaCl dalam setiap 100 mL larutan. Hitung tekanan osmotiknya pada suhu tubuh (37 °C), dengan menganggap NaCl terionisasi sempurna, lalu bandingkan dengan tekanan osmotik darah (±7,7 atm). (M_r NaCl = 58,5; $R = 0{,}082$ L·atm/(mol·K))

1. Massa NaCl per liter: $0{,}9\ \text{g} \times 10 = 9$ g/L, jadi $M = 9/58{,}5 = 0{,}154$ mol/L.
2. NaCl → $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$, jadi $i = 2$.
3. $T = 37 + 273 = 310$ K.
4. $\pi = MRTi = 0{,}154 \times 0{,}082 \times 310 \times 2 = 7{,}8$ atm.

$\pi \approx$ 7,8 atm, hampir sama dengan darah (±7,7 atm): isotonik. Sel darah merah tidak menggembung dan tidak mengerut. Infus glukosa 5% (50 g/L, M_r 180, i = 1) memberi $\pi = 0{,}278 \times 0{,}082 \times 310 = 7{,}1$ atm, juga mendekati isotonik.

Bagaimana jika osmosis kita "putar balik"? Bila larutan pekat ditekan dengan tekanan yang lebih besar daripada tekanan osmotiknya, air murni justru terdorong keluar melewati membran, meninggalkan garam di belakang. Inilah **osmosis balik** (*reverse osmosis*). Air laut punya tekanan osmotik ±27–30 atm, sehingga mesin desalinasi menekannya dengan ±55–80 atm melewati membran polimer berpori sangat halus. Air tawar keluar di satu sisi, air yang sangat asin dibuang di sisi lain.

KIMIA NUSANTARA · DARI IKAN ASIN SAMPAI KAPAL DI TENGAH LAUT

Ikan asin di pesisir utara Jawa dan banyak pantai Nusantara dibuat dengan menimbun ikan dalam garam lalu menjemurnya. Garam menarik air keluar dari sel daging ikan. Bakteri pembusuk yang hinggap juga ikut kehilangan air, sehingga tidak bisa berkembang biak. **Manisan pala** khas Bogor dan manisan mangga memakai gula dengan prinsip yang sama.

Asinan sayur dibuat dengan meremas sawi atau kol bersama garam: sayur menjadi layu dan airnya keluar, sehingga bumbu lebih meresap dan sayur lebih awet. Petani juga tahu bahwa pupuk yang ditabur terlalu banyak membuat tanaman layu, karena tanah di sekitar akar menjadi hipertonik.

Di tengah laut, banyak **kapal** membuat air minum sendiri dengan mesin **osmosis balik**. Beberapa pulau kecil yang sulit mendapat air tanah tawar juga memakai instalasi serupa.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA OSMOSIS TERJADI? BUKAN "DIDORONG", MELAINKAN ENTROPI

Molekul gula tidak "menarik" air seperti magnet. Penyebab osmosis adalah kecenderungan alami zat untuk bercampur (entropi). Dalam bahasa termodinamika, **potensial kimia** air dalam larutan lebih rendah daripada dalam air murni: $\mu_{\text{air}} = \mu^\circ + RT\ln X_{\text{air}}$, dengan $X_{\text{air}} < 1$. Air berpindah dari potensial kimia tinggi ke rendah. Tekanan tambahan π menaikkan potensial kimia larutan sebesar $\pi\bar{V}$ ($\bar{V}$ = volume molar air), sehingga kesetimbangan tercapai bila

$$\pi\bar{V} = -RT\ln X_{\text{air}} \approx RT\,X_t \quad\Longrightarrow\quad \pi \approx \frac{n_t}{V}RT$$

Pendekatan $-\ln X_{\text{air}} \approx X_t$ hanya berlaku untuk larutan encer. Itulah sebabnya rumus van 't Hoff, sama seperti hukum gas ideal, adalah pendekatan.

Tantangan Rumah: kentang yang kehausan

Bahan: 1 kentang besar (atau wortel), pisau dapur dan talenan, penggaris, timbangan dapur digital, 3 gelas plastik bening, garam, sendok makan, air, tisu, stopwatch HP.

1. Bersama orang dewasa, potong kentang menjadi 3 batang berukuran sama (±1 cm × 1 cm × 5 cm). Ukur panjang dan timbang massanya.
2. Gelas A: air tawar. Gelas B: 1 sendok teh garam dalam 1 gelas air. Gelas C: 3 sendok makan garam dalam 1 gelas air.
3. Rendam satu batang di setiap gelas selama 45–60 menit.
4. Angkat, keringkan permukaannya dengan tisu, lalu ukur panjang dan massanya lagi. Coba tekuk perlahan: mana yang kaku, mana yang lentur?

Keselamatan: pisau tajam: potong di atas talenan, arahkan pisau menjauhi tubuh, dan minta orang dewasa memotongkan bila belum terbiasa. Buang bagian kentang yang berwarna hijau, dan jangan memakan kentang mentah yang sudah direndam. Air garam pekat terasa perih pada luka dan mata; bila terkena mata, bilas dengan air mengalir. Cuci tangan setelah selesai, buang kentang ke tempat sampah organik.

Pertanyaan: Pada gelas mana kentang bertambah berat dan pada gelas mana berkurang? Ke arah mana air bergerak? Kira-kira berapa kepekatan garam yang membuat massa kentang tidak berubah (isotonik)?

24.6 Larutan elektrolit dan faktor van 't Hoff

Kimo benar: garam memang lebih "jago" daripada gula. Satu molekul gula yang larut tetap satu partikel. Namun satu satuan rumus garam dapur yang larut pecah menjadi dua ion, ion natrium Na dan ion klorida Cl. Untuk sifat koligatif yang hanya menghitung kepala, dua ion berarti dua partikel.

$$\mathrm{NaCl\,(s)} \longrightarrow \mathrm{Na^{+}\,(aq)} + \mathrm{Cl^{-}\,(aq)} \qquad (n = 2)$$

$$\mathrm{CaCl_2\,(s)} \longrightarrow \mathrm{Ca^{2+}\,(aq)} + 2\,\mathrm{Cl^{-}\,(aq)} \qquad (n = 3)$$

$$\mathrm{Al_2(SO_4)_3\,(s)} \longrightarrow 2\,\mathrm{Al^{3+}\,(aq)} + 3\,\mathrm{SO_4^{2-}\,(aq)} \qquad (n =$$

Bahasa sederhana · Bayangkan satu bungkus kerupuk yang dibuka dan isinya tumpah menjadi beberapa keping. Gula seperti bungkus yang tidak dibuka: tetap satu. Garam dapur pecah menjadi dua keping, kalsium klorida menjadi tiga keping. Makin banyak keping, makin kuat pengaruhnya pada titik beku dan titik didih.

ATURAN · FAKTOR VAN 'T HOFF

Untuk elektrolit yang terurai menjadi n ion dengan **derajat ionisasi** α (bagian zat yang terionisasi, 0 sampai 1):

$$i = 1 + (n - 1)\,\alpha$$

Semua rumus sifat koligatif dikalikan i: $\Delta T_b = K_b\, m\, i$, $\Delta T_f = K_f\, m\, i$, $\pi = MRT\, i$, dan pada hukum Raoult $X_t = \dfrac{i\, n_t}{i\, n_t + n_p}$. Elektrolit kuat: $\alpha \approx 1$, jadi $i \approx n$. Nonelektrolit: $i = 1$.

Mengapa $i = 1 + (n-1)\alpha$?

Misalkan mula-mula ada 1 mol zat. Sebanyak α mol terionisasi, masing-masing menghasilkan n ion; sisanya $(1 - \alpha)$ mol tetap utuh. Jumlah partikel = $(1 - \alpha) + n\alpha = 1 + (n - 1)\alpha$. Contoh: asam asetat 0,1 m dengan $\alpha = 0{,}013$ memberi $i = 1 + 0{,}013 = 1{,}013$, nyaris seperti nonelektrolit.

RUMUS HIDUP **Faktor van 't Hoff**

$$i = 1 + (n - 1)\,\alpha$$

Jumlah partikel dari setiap satuan zat setelah sebagian atau seluruhnya terurai menjadi ion.

n Jumlah ion per satuan rumus

α Derajat ionisasi

i Faktor van 't Hoff

FAKTOR VAN 'T HOFF

2

elektrolit kuat ideal: i = n

NaCl, KCl, KNO_3

Setiap 100 satuan zat menjadi **200** partikel di dalam larutan.

Cek satuan: tanpa satuan (partikel per satuan zat)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLIGATIF-VANTHOFF

Kenyataannya sedikit berbeda dari hitungan ideal. Ion-ion yang muatannya berlawanan kadang saling menempel sesaat membentuk **pasangan ion**, sehingga jumlah partikel bebas sedikit lebih kecil. Efek ini makin besar untuk ion bermuatan tinggi dan larutan pekat.

Zat (±0,05 mol/L)	Ion yang terbentuk	i ideal	i terukur (perkiraan)
Sukrosa (gula pasir)	tidak ada (molekul utuh)	1	1,0
NaCl	Na^+, Cl^-	2	1,9
$MgSO_4$	Mg^{2+}, $SO_4{}^{2-}$	2	1,3
$MgCl_2$	Mg^{2+}, $2Cl^-$	3	2,7
$FeCl_3$	Fe^{3+}, $3Cl^-$	4	3,4

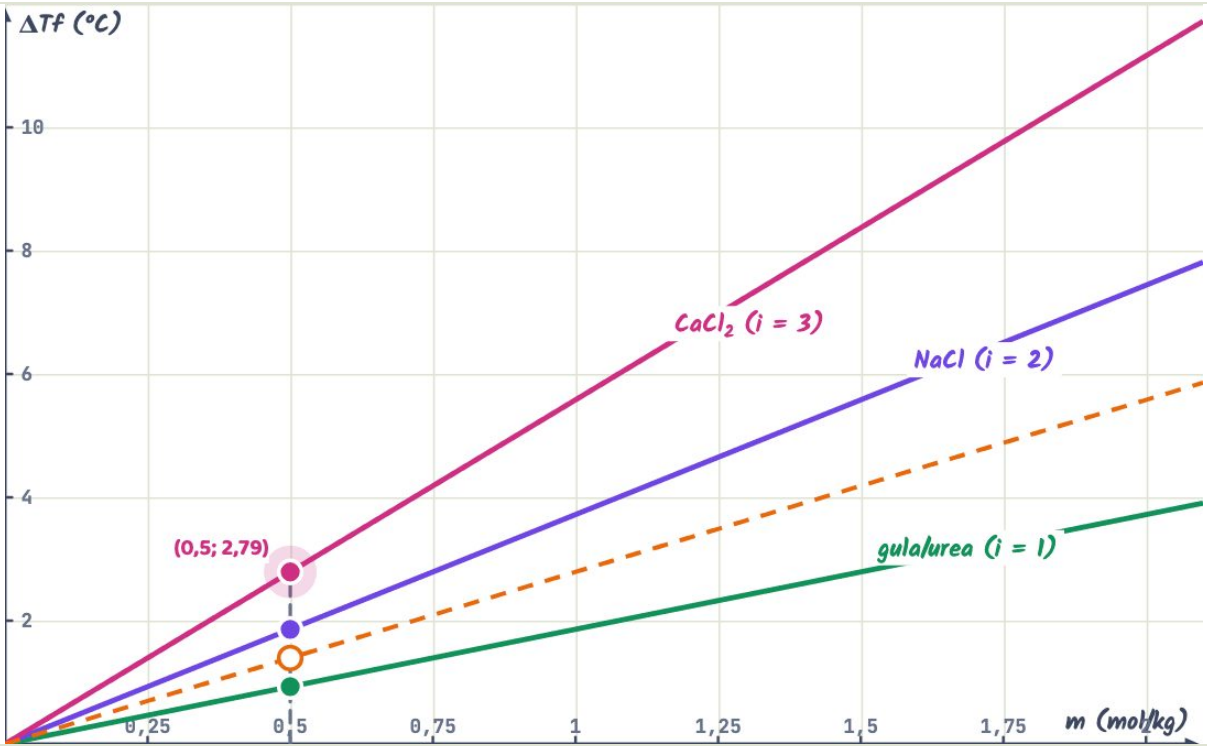
GRAFIK HIDUP

Satu molalitas, tiga kemiringan: hitung partikelnya!

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-24

$$\Delta T_f = K_f \cdot m \cdot i$$

$$m = 0{,}5: \quad \Delta T_f(\text{gula}) = 0{,}93, \quad \Delta T_f(\text{NaCl}) = 1{,}86, \quad \Delta T_f(\text{CaCl}$$



gula (i = 1)	NaCl (i = 2)	$CaCl_2$ (i = 3)	elektrolit AB (oranye)	i elektrolit AB
0,93 °C	1,86 °C	2,79 °C	1,4 °C	1,5

Seret titik magenta ke kanan. Pada molalitas yang sama, garis $CaCl_2$ tiga kali lebih curam daripada garis gula, karena setiap satuannya menghasilkan tiga partikel. Garis oranye putus-putus adalah elektrolit AB yang hanya sebagian terionisasi: geser α dari 0 ke 1 dan lihat garisnya berpindah dari "gula" ke "NaCl".

KERJAKAN BERSAMA **Mencari derajat ionisasi**

Larutan 0,1 molal suatu elektrolit $\mathrm{AB_2}$ dalam air membeku pada –0,465 °C. Berapa derajat ionisasi α elektrolit itu? (K_f air = 1,86 °C·kg/mol)

1. $\Delta T_f = 0{,}465$ °C, jadi $i = \dfrac{\Delta T_f}{K_f\, m} = \dfrac{0{,}465}{1{,}86 \times 0{,}1} = 2{,}5.$
2. $\mathrm{AB_2} \longrightarrow \mathrm{A^{2+}} + 2\,\mathrm{B^-}$, jadi $n = 3$.
3. $i = 1 + (n-1)\alpha \Rightarrow 2{,}5 = 1 + 2\alpha \Rightarrow \alpha = 0{,}75.$

$\alpha = 0{,}75$: tiga perempat satuan $\mathrm{AB_2}$ terionisasi. Cek: $i = 1 + 2(0{,}75) = 2{,}5$ dan $\Delta T_f = 1{,}86 \times 0{,}1 \times 2{,}5 = 0{,}465$ °C ✔

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

Keempat rumus sifat koligatif punya pola yang sama: **tetapan × konsentrasi partikel**. $\Delta P = P^\circ \cdot X_t$, $\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$, $\Delta T_f = K_f \cdot m \cdot i$, $\pi = RT \cdot M \cdot i$. Ingat tiga pertanyaan sebelum menghitung: **(1)** Ada ion? Kalikan i. **(2)** Titik didih/beku? Pakai molalitas (per kg pelarut). **(3)** Tekanan osmotik? Pakai molaritas dan suhu dalam kelvin. Seperti resep sambal: bahannya sedikit, tetapi urutannya jangan tertukar.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Van 't Hoff bingung: larutan garam selalu memberi penurunan titik beku dan tekanan osmotik yang hampir dua kali lipat dari perhitungan. Ia terpaksa menambahkan faktor koreksi i tanpa tahu sebabnya. Pada 1884–1887, ilmuwan muda Swedia **Svante Arrhenius** mengajukan gagasan berani: garam di dalam air terurai menjadi ion-ion bermuatan, bahkan tanpa dialiri listrik. Banyak profesor menertawakan gagasan itu, tetapi data sifat koligatif mendukungnya. Arrhenius menerima Hadiah Nobel Kimia pada 1903.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENENTUKAN M_R: MEMILIH SIFAT KOLIGATIF YANG TEPAT

Keempat sifat koligatif dapat dipakai sebagai "timbangan molekul": ukur ΔT_f, ΔT_b, atau π, hitung jumlah mol partikel, lalu $M_r = \dfrac{\text{massa}}{\text{mol}}$. Namun kepekaannya sangat berbeda. Bayangkan 1,00 g protein hemoglobin ($M_r \approx 65\,000$) dalam 100 mL larutan pada 25 °C:

- Konsentrasi: $M = \dfrac{1{,}00/65\,000}{0{,}100} = 1{,}54 \times 10^{-4}$ mol/L.
- $\Delta T_f \approx 1{,}86 \times 1{,}54 \times 10^{-4} = 2{,}9 \times 10^{-4}$ °C: terlalu kecil untuk diukur termometer biasa.
- $\pi = 1{,}54 \times 10^{-4} \times 0{,}082 \times 298 = 3{,}8 \times 10^{-3}$ atm $\approx$ 2,9 mmHg, setara kolom air ±3,9 cm: mudah diukur!

Karena itu, M_r protein dan polimer ditentukan dengan **osmometri**, sedangkan zat kecil cukup dengan krioskopi (penurunan titik beku), termasuk metode Rast memakai kamfer.

Faktor i juga bisa **kurang dari 1** bila partikel bergabung. Dalam benzena, asam asetat membentuk dimer lewat ikatan hidrogen: $2\,\mathrm{CH_3COOH} \rightleftharpoons (\mathrm{CH_3COOH})_2$. Jika fraksi β molekul berdimer, jumlah partikel = $(1-\beta) + \beta/2 = 1 - \beta/2$. Data titik beku yang memberi $i \approx 0{,}5$ berarti hampir semua asam asetat berpasangan, sehingga M_r terukurnya ±120, bukan 60.

Kimia di sekitarmu

Es puter & es krim

Es batu + garam kasar menurunkan titik beku air lelehan sampai suhu campuran ±−10 hingga −20 °C, cukup dingin untuk membekukan adonan santan.

Infus & tetes mata

Cairan infus NaCl 0,9%, infus glukosa 5%, obat tetes mata, dan cairan lensa kontak dibuat isotonik agar sel tidak menggembung atau mengerut.

Ikan asin & manisan

Garam dan gula pekat menarik air keluar dari sel bahan makanan dan dari sel bakteri, sehingga makanan awet tanpa kulkas.

Air tawar dari laut

Mesin osmosis balik di kapal dan pulau kecil menekan air laut melewati membran dengan tekanan di atas ±27 atm sehingga garam tertahan.

Cairan pendingin radiator

Etilen glikol menaikkan titik didih air radiator di negeri tropis dan menurunkan titik bekunya bila mobil dibawa ke negeri bersalju.

Asinan & pupuk

Sawi yang diremas garam menjadi layu karena osmosis. Pupuk yang terlalu banyak membuat tanah di sekitar akar hipertonik sehingga tanaman layu.

Cek Cepat

Larutan-larutan berikut sama-sama 0,1 molal dalam air. Manakah yang titik didihnya paling tinggi?

- Glukosa
- Urea
- $MgCl_2$
- NaCl

Sel darah merah dimasukkan ke dalam air suling. Apa yang terjadi?

- Sel menggembung dan bisa pecah
- Sel mengerut
- Sel tidak berubah
- Garam dari sel berpindah ke air dan sel tetap utuh

Berapa tekanan osmotik larutan glukosa 0,1 M pada 27 °C? ($R = 0{,}082$ L·atm/(mol·K))

- 0,22 atm
- 2,46 atm
- 4,92 atm
- 24,6 atm

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. B

RINGKASAN KILAT **Bab 24 dalam 3 menit**

☑ **Kamu sekarang bisa...**

- menjelaskan **sifat koligatif** sebagai sifat yang hanya bergantung pada **jumlah partikel** zat terlarut, bukan jenisnya
- menghitung **penurunan tekanan uap** dengan hukum Raoult, **kenaikan titik didih**, dan **penurunan titik beku** larutan

- menjelaskan **osmosis** dan menghitung **tekanan osmotik**, misalnya cairan infus yang isotonik dengan darah
- memakai **faktor van 't Hoff** i untuk larutan elektrolit
- menentukan **massa molekul relatif** suatu zat dari data sifat koligatif

🔑 Istilah kunci

Sifat koligatif · tekanan uap jenuh · kenaikan titik didih · tetapan kenaikan titik didih molal · diagram fasa · penurunan titik beku · tetapan penurunan titik beku molal · titik eutektik · Membran semipermeabel · Osmosis · Tekanan osmotik · isotonik · hipotonik · hipertonik · osmosis balik · derajat ionisasi

🧮 Rumus penting

$$P = \frac{n_p}{n_p + i\,n_t} \times P^\circ$$

Hukum Raoult: tekanan uap larutan. Tekanan uap larutan = bagian pelarut di antara semua partikel × tekanan uap pelarut murni.

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$$

Kenaikan titik didih. Setiap mol partikel zat terlarut dalam satu kilogram pelarut menaikkan titik didih sebesar Kb derajat.

$$\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p} \cdot i$$

Penurunan titik beku larutan dalam air. Penurunan titik beku = Kf × molalitas × jumlah partikel per satuan zat.

$$\pi = M \cdot R \cdot T \cdot i$$

Tekanan osmotik. Tekanan osmotik = konsentrasi partikel × R × suhu mutlak, seperti tekanan gas ideal.

$$i = 1 + (n - 1)\,\alpha$$

Faktor van 't Hoff. Jumlah partikel dari setiap satuan zat setelah sebagian atau seluruhnya terurai menjadi ion.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Molalitas tidak sama dengan molaritas.
- ΔT_f adalah besarnya penurunan, selalu bernilai positif, bukan titik bekunya.
- Dalam osmosis, yang berpindah adalah pelarut (air), bukan zat terlarut.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=24

Teka-teki untuk Bab 25

Santan yang baru diperas tampak putih merata seperti larutan. Namun saat dimasak terlalu lama atau tidak diaduk, santan bisa "pecah": minyaknya memisah dan mengambang. Larutan gula tidak pernah pecah seperti itu. Apa sebenarnya santan? Dan mengapa partikel di dalam santan hampir tidak memengaruhi titik beku air?

▼ **Intip petunjuk**

Santan bukan larutan, melainkan **koloid** jenis emulsi: tetesan minyak yang sangat kecil tersebar di dalam air dan dijaga oleh protein kelapa. Partikel koloid jauh lebih besar dan jumlahnya jauh lebih sedikit daripada molekul gula, jadi efek koligatifnya sangat kecil, persis seperti hemoglobin di kotak Lanjut tadi. Di Bab 25 kamu akan menyorotkan senter ke santan dan melihat "pedang cahaya"!

25 Sistem Koloid: Dunia di Antara Larut dan Mengendap

Mengapa berkas senter tampak di kabut tetapi lenyap di air gula? Mengapa santan bisa "pecah", dan bagaimana sejumput tawas mengubah air sungai cokelat menjadi jernih? Semua jawabannya ada pada partikel mungil berukuran 1 sampai 1000 nanometer.

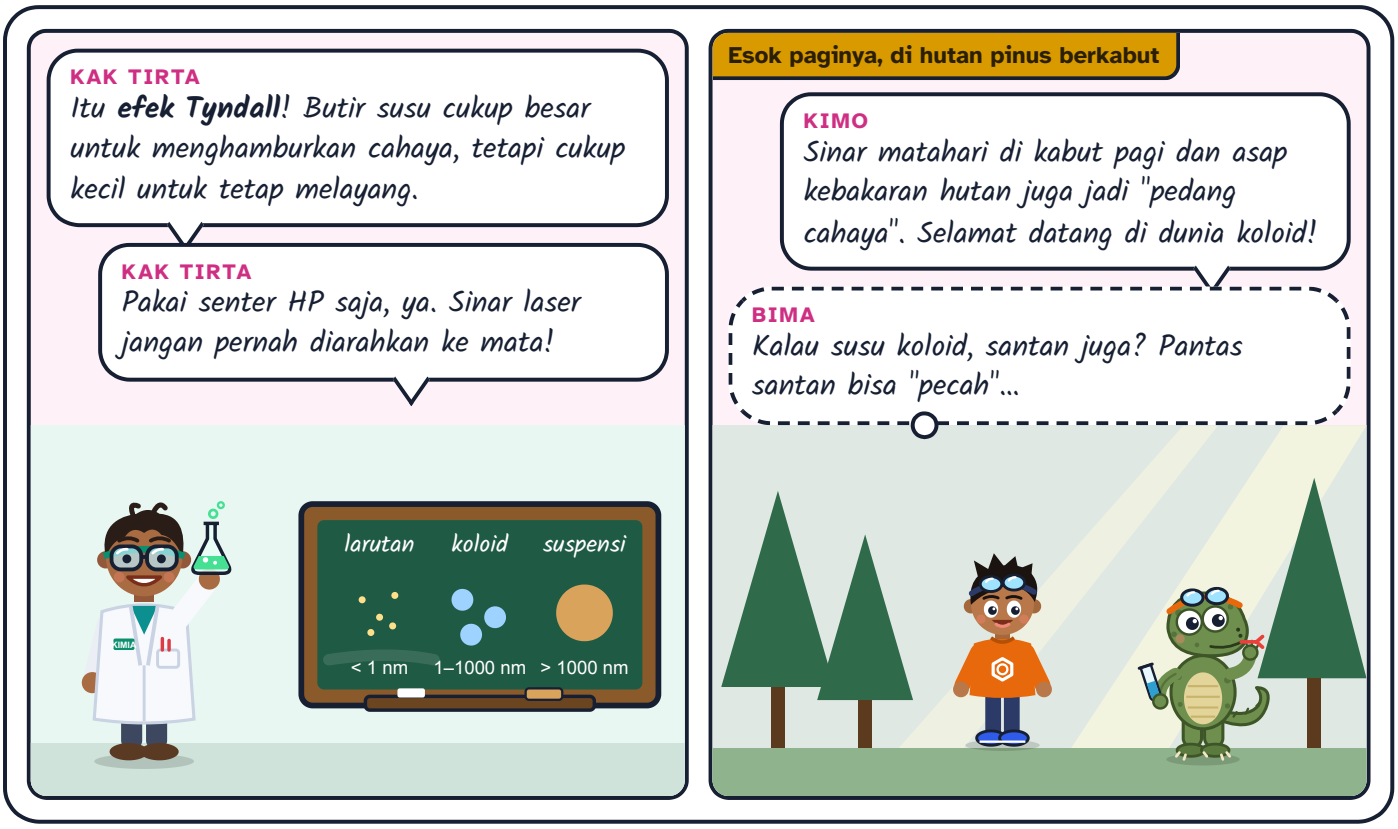
Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **larutan**, **koloid**, dan **suspensi** dari ukuran partikel (1–1000 nm), efek Tyndall, pengendapan, dan penyaringan;
- menggolongkan **jenis koloid** (sol, emulsi, buih, gel, aerosol, buih padat, sol padat) dari fase terdispersi dan medium pendispersinya;
- menjelaskan **sifat koloid**: efek Tyndall, gerak Brown, adsorpsi, muatan, elektroforesis, koagulasi (aturan Hardy–Schulze), dan dialisis;
- membedakan koloid **liofil** dan **liofob**, serta menjelaskan kerja **sabun dan pengemulsi** dengan model misel;
- menjelaskan cara **membuat koloid** (kondensasi & dispersi) dan menghitung **dosis tawas** pada penjernihan air.

PEDANG CAHAYA

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Di kamar gelap, Bima menyorotkan senter HP dari samping ke segelas air gula dan segelas susu encer. Di gelas mana berkas cahaya tampak jelas bila dilihat dari samping?

- Di kedua gelas, karena keduanya cairan yang dilewati cahaya.
- Hanya di air gula, karena air gula bening sehingga cahaya mudah lewat.
- Hanya di susu encer.
- Tidak di keduanya; berkas cahaya hanya tampak di udara berdebu.

Jawabannya: hanya di susu encer. Kita melihat berkas cahaya dari samping hanya jika ada partikel yang *menghamburkan* cahaya ke mata kita. Molekul gula terlalu kecil untuk itu, sehingga cahaya lewat "diam-diam". Butir lemak dan protein susu jauh lebih besar dan memantulkan cahaya ke segala arah. Ini disebut **efek Tyndall**, ciri khas koloid.

25.1 Larutan, koloid, atau suspensi?

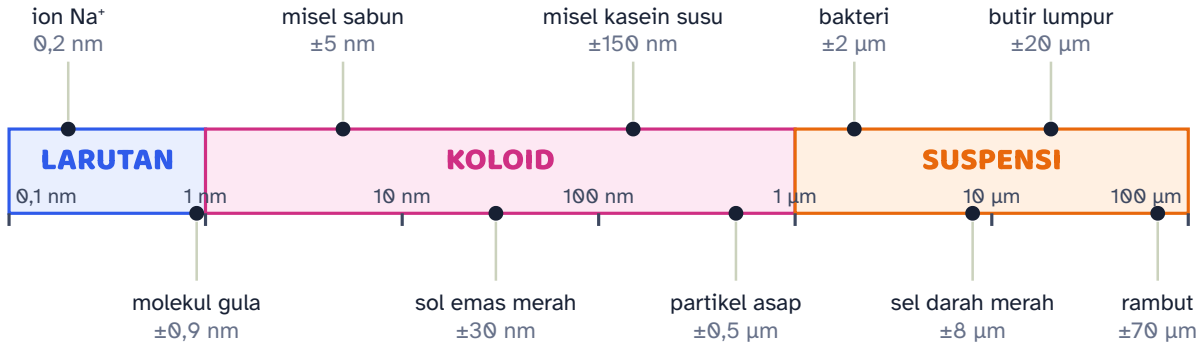
Di Bab 3 kamu sudah mengenal **campuran homogen** (merata, satu fase) dan **campuran heterogen** (tidak merata). Ternyata ada "daerah abu-abu" di antara keduanya: campuran yang tampak merata oleh mata, tetapi di bawah mikroskop super ternyata berbutir. Inilah **koloid**.

Bahasa sederhana · Bayangkan tiga gelas air. Gelas pertama diberi gula: gulanya "hilang" karena terpecah menjadi molekul yang sangat kecil. Gelas kedua diberi susu: tampak putih merata, tetapi sebenarnya berisi butiran lemak mungil yang melayang. Gelas ketiga diberi tanah: butirannya besar, jadi lama-lama tenggelam ke dasar. Ketiganya berbeda karena **ukuran partikelnya** berbeda.

Penentunya adalah ukuran **partikel terdispersi** (zat yang tersebar) di dalam **medium pendispersi** (zat tempat menyebar). Satuan yang pas adalah **nanometer**: $1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m}$, sepersejuta milimeter. Selembar rambutmu kira-kira 70.000 nm tebalnya!

DEFINISI · KOLOID

Koloid adalah campuran yang partikel terdispersinya berukuran sekitar **1–1000 nm** (10^{-9}–10^{-6} m) dan tersebar dalam medium pendispersi. Koloid tampak homogen oleh mata, tetapi sebenarnya **heterogen** (dua fase). Bandingkan: **larutan** sejati berpartikel < 1 nm (ion atau molekul tunggal), sedangkan **suspensi** berpartikel > 1000 nm.



Skala logaritma: setiap garis = 10 kali lebih besar

Dari ion sampai rambut. Koloid menempati wilayah luas di tengah, tiga "angka nol" lebarnya, dari 1 nm sampai 1000 nm (= 1 µm).

Sifat	Larutan	Koloid	Suspensi
Ukuran partikel	< 1 nm	1–1000 nm	> 1000 nm
Partikel terdispersi	ion atau molekul tunggal	gugus molekul, makromolekul, misel, butir halus	butir kasar
Jumlah fase	satu (homogen)	dua (tampak homogen)	dua (heterogen)
Kenampakan	jernih (boleh berwarna)	jernih sampai keruh	keruh
Bila didiamkan	tidak memisah	tidak memisah (stabil)	mengendap

Kertas saring biasa	lolos	lolos	tertahan
Membran semipermeabel	lolos	tertahan	tertahan
Efek Tyndall	tidak	**ya**, berkas tampak	cahaya terhalang butir kasar; butir lalu mengendap
Contoh	air gula, air garam, cuka, udara bersih	susu, santan, kabut, agar-agar, cat	air lumpur, kopi tubruk, air kapur sirih yang baru diaduk

Mengapa ukuran begitu penting? Partikel yang makin kecil punya **luas permukaan** yang makin besar untuk setiap gramnya. Permukaan yang luas inilah "panggung" bagi banyak sifat istimewa koloid, misalnya menyerap zat lain dan membawa muatan listrik. Geser diameternya dan saksikan permukaannya "meledak".

RUMUS HIDUP **Skala ukuran partikel**

$$A = \frac{6000}{\rho\, d}$$

Luas permukaan setiap gram butiran bulat berbanding terbalik dengan diameternya: pecah butir menjadi sepuluh kali lebih kecil, permukaannya sepuluh kali lebih luas.

d Diameter partikel nm

ρ Massa jenis partikel g/cm³

A Luas permukaan per gram m²/g

LUAS PERMUKAAN PER GRAM

46,2

m²/g

1–1000 nm: koloid, permukaannya sangat luas

Diameter **50** nm termasuk **koloid**. Partikel ini **±178,571** kali diameter molekul air. Satu gramnya berpermukaan **46,2** m², kira-kira **0,565** lapangan bulu tangkis.

Cek satuan: 6000 menyatukan satuan: 1 ÷ (g/cm³ × nm) → m²/g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLOID-UKURAN

Cara paling cepat membedakan larutan dan koloid? Matikan lampu, lalu sorotkan cahaya! Cobalah di laboratorium virtual berikut. Ketuk kanvas untuk menaikkan atau menurunkan berkas, lalu biarkan campurannya diam beberapa saat.

LAB MINI

Pedang Cahaya: Uji Efek Tyndall

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25



Jenis campuran
koloid (emulsi)

Ukuran partikel
±100–1000 nm (misel kasein, butir lemak)

Berkas dari samping
tampak sangat terang

Saat didiamkan
tetap tersebar (tidak mengendap)

Cahaya tembus
32 %

Pilih campuran dan sumber cahaya. Campuran mana yang memperlihatkan berkas dari samping? Bandingkan **agar-agar cair** yang bening dengan **kopi saring** yang gelap. Lalu amati **air lumpur** dan **susu kapur** saat didiamkan: apa yang terjadi pada berkasnya? Lingkaran kecil memperbesar partikelnya sekitar sejuta kali.

Tebak Dulu!

Agar-agar encer yang masih hangat tampak bening seperti air. Apa yang terjadi bila disorot senter dari samping?

- Berkas tidak tampak, karena cairan bening pasti larutan.
- Berkas tampak: agar-agar adalah koloid walaupun bening.
- Cahaya dipantulkan seluruhnya seperti cermin.
- Seluruh cahaya diserap sehingga gelas tampak gelap.

Jawabannya: berkas tampak. Rantai panjang agarosa dari rumput laut berukuran koloid. Karena hanya sedikit dan indeks biasnya mirip air, agar-agar encer tampak bening, tetapi tetap menghamburkan cukup cahaya untuk memperlihatkan "pedang cahaya". Bening tidak berarti larutan!

AWAS JEBAKAN

Koloid tidak selalu keruh, dan cairan berwarna tidak selalu koloid. Air sabun encer dan agar-agar cair tampak hampir bening tetapi menunjukkan efek Tyndall, sedangkan teh atau sirup berwarna pekat bisa saja larutan. Warna muncul karena cahaya *diserap*; efek Tyndall muncul karena cahaya *dihamburkan*. Jadi ujilah dengan berkas cahaya, bukan dengan menebak dari warna.

CONTOH **Golongkan empat campuran**

Golongkan sebagai larutan, koloid, atau suspensi: (a) air gula, (b) susu, (c) air kapur sirih yang baru diaduk, (d) kabut pagi.

1. (a) Air gula: jernih, tidak mengendap, berkas senter tidak tampak. Partikelnya molekul sukrosa (±1 nm) → **larutan**.
2. (b) Susu: putih merata, tidak mengendap, lolos kertas saring, berkas tampak → **koloid** (emulsi lemak dalam air).
3. (c) Air kapur sirih yang baru diaduk: keruh, butir kapur mengendap dalam beberapa menit → **suspensi**.
4. (d) Kabut: titik-titik air sangat halus melayang di udara dan memperlihatkan sorot lampu kendaraan → **koloid** (aerosol cair).

Larutan: (a). Koloid: (b) dan (d). Suspensi: (c). Tiga uji kilat: sorot (Tyndall), diamkan (mengendap?), saring (tertahan?).

25.2 Delapan jenis koloid

Setiap koloid punya dua "pemain": **fase terdispersi** (si penumpang yang tersebar) dan **medium pendispersi** (si "kendaraan"). Masing-masing bisa berwujud padat, cair, atau gas. Dari 3 × 3 = 9 pasangan, hanya **8** yang menjadi koloid. Pasangan gas dalam gas selalu bercampur sempurna menjadi larutan, misalnya udara.

Fase terdispersi	Medium pendispersi	Nama koloid	Contoh di sekitarmu
gas	cair	**buih**	busa sabun, putih telur kocok untuk bolu, buih ombak, busa sampo
gas	padat	**buih padat**	batu apung, roti dan bolu yang mengembang, kerupuk, gabus stirena
cair	gas	**aerosol cair**	kabut pagi di Dieng, awan, semprotan obat nyamuk, percikan air terjun
cair	cair	**emulsi**	santan, susu, mayones, saus salad
cair	padat	**emulsi padat (gel)**	agar-agar, jeli, keju, mentega, dodol

padat	gas	**aerosol padat**	asap kebakaran hutan, abu vulkanik di udara, debu jalanan
padat	cair	**sol**	cat, tinta, air tajin (kanji), lateks karet, sol emas
padat	padat	**sol padat**	kaca rubi merah berisi butir emas, kaca patri, batu opal
gas	gas	bukan koloid	udara: gas-gas selalu bercampur homogen (larutan)



TRIK KAK TIRTA

Baca nama koloid dari **mediumnya** dulu. Medium gas → **aerosol**. Medium cair → **sol, emulsi, buih**. Medium padat → nama yang sama ditambah kata **"padat"**. Lalu lihat **penumpangnya**: padat = sol, cair = emulsi, gas = buih. Jembatan keledainya: **"SEB = Padat, Cair, Gas"**, seperti **S**ate–**E**s–**B**alon: sate itu padat, es teh itu cair, balon berisi gas. (Pengecualian nama: cair dalam padat lebih sering disebut **gel**.)



KIMIA NUSANTARA · KOLOID DI MEJA MAKAN

Kerupuk yang digoreng mengembang karena air di dalam adonan kanji berubah menjadi uap, lalu terperangkap sebagai gelembung: jadilah buih padat yang renyah. **Agar-agar** dibuat dari rumput laut *Gracilaria* dan *Gelidium*, dan Indonesia termasuk penghasil rumput laut terbesar di dunia. Rantai agarosanya membentuk jaring yang memerangkap air, sehingga "air menjadi padat". **Dodol** Garut dan Kudus pun gel kental: kanji ketan, santan, dan gula aren diaduk berjam-jam sampai jaring patinya menahan minyak dan air. Bahkan **batu apung** dari pantai Lombok adalah buih padat alami: lava berbuih gas yang membeku seketika.

MITOS

"Koloid selalu keruh."

FAKTA

Agar-agar encer, jeli, dan air sabun encer tampak hampir bening, tetapi menunjukkan efek Tyndall. Keruh atau bening bergantung pada jumlah partikel dan perbedaan indeks bias, bukan penentu jenis campuran.

MITOS

"Santan adalah larutan karena tampak merata."

FAKTA

Santan adalah **emulsi**: butiran minyak kelapa (sekitar 1 µm atau lebih) tersebar dalam air dan dijaga protein kelapa. Didiamkan lama, kepala santan naik ke atas. Larutan tidak pernah memisah begitu.

MITOS

"Campuran dua gas bisa jadi koloid kalau warnanya berbeda."

FAKTA

Molekul gas selalu bergerak bebas dan bercampur sempurna, jadi campuran gas selalu larutan. Yang membuat udara berkabut atau berasap adalah titik cair atau butir padat di dalamnya.

25.3 Efek Tyndall, gerak Brown, adsorpsi, dan muatan

Efek Tyndall: cahaya yang dihamburkan

Efek Tyndall adalah penghamburan cahaya oleh partikel koloid sehingga jalannya berkas cahaya tampak dari samping. Partikel koloid berukuran sebanding dengan panjang gelombang cahaya tampak (400–700 nm), jadi mereka "memantulkan" cahaya ke segala arah. Ion dan molekul dalam larutan terlalu kecil, sehingga hamburannya hampir tidak ada.

Efek Tyndall ada di mana-mana: sorot lampu motor di jalan berkabut, berkas cahaya matahari yang menembus sela daun di hutan pinus pagi hari, dan sorot proyektor di aula berdebu. Langit biru dan matahari terbenam yang jingga di Bromo pun berasal dari penghamburan cahaya oleh partikel yang sangat kecil.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HAMBURAN RAYLEIGH: $I \propto D^6/\lambda^4$

Untuk partikel yang jauh lebih kecil daripada panjang gelombang, intensitas hamburan sebanding dengan d^6/λ^4. Akibatnya ada dua hal mengejutkan:

- **Ukuran sangat menentukan.** Partikel 10 kali lebih besar menghamburkan 10^6 kali lebih kuat. Itulah sebabnya molekul gula (±1 nm) "tak terlihat", sedangkan misel kasein (±150 nm) bercahaya.
- **Warna biru dihamburkan lebih kuat.** Cahaya biru (450 nm) dihamburkan $(700/450)^4 \approx 6$ kali lebih kuat daripada merah (700 nm). Langit siang tampak biru; saat matahari rendah, cahaya biru sudah "habis" dihamburkan sepanjang jalan, sehingga yang tersisa jingga-merah. Laser hijau juga tampak lebih terang daripada laser merah di kabut.

Untuk butir yang seukuran atau lebih besar dari panjang gelombang (titik air awan, ±10 µm), semua warna dihamburkan hampir sama kuat. Hasilnya awan dan kabut tampak **putih**.

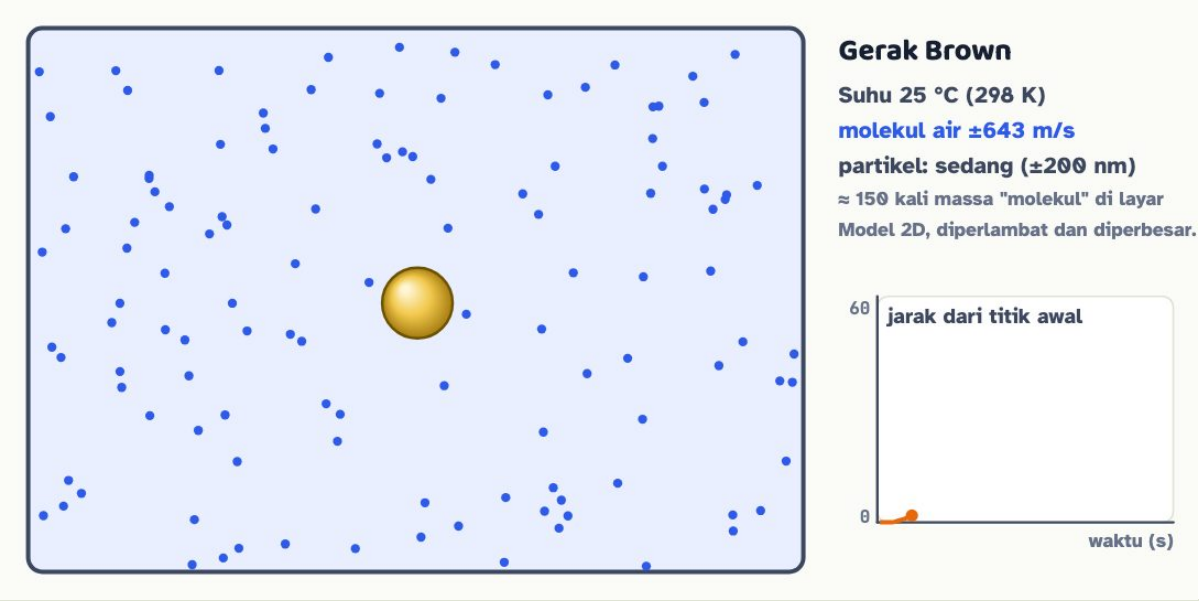
Gerak Brown: tarian zig-zag

Di bawah mikroskop, partikel koloid tidak pernah diam. Mereka bergerak **gerak Brown**: gerak acak zig-zag akibat ditabrak molekul medium dari segala arah secara tidak seimbang. Partikel koloid cukup kecil sehingga tabrakan

ini tidak saling meniadakan, tetapi cukup besar untuk terlihat. Gerak Brown inilah yang membuat koloid **tidak mengendap**: setiap kali gravitasi menarik ke bawah, tabrakan acak mengaduknya kembali.

LAB MINI **Gerak Brown: Siapa yang Menendang?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25



Kecepatan rata-rata molekul air	Tumbukan per detik (layar)	Jarak dari titik awal
643 m/s	3	2 px

Bola besar adalah partikel koloid, titik-titik biru adalah molekul air. Matikan "Tampilkan molekul air" untuk melihat apa yang dilihat Robert Brown di mikroskopnya. Naikkan suhu: apa yang terjadi pada tariannya? Bandingkan partikel kecil dan besar. Partikel mana yang lebih "gelisah"?

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1827, ahli botani Skotlandia **Robert Brown** mengamati butir-butir sangat halus dari serbuk sari bunga yang bergerak gelisah di dalam air. Ia mengira itu tanda "kehidupan", sampai ia melihat butir debu batu pun bergerak sama! Pada 1905 **Albert Einstein** menjelaskan bahwa gerak itu akibat tumbukan molekul air, dan pada 1908 **Jean Perrin** membuktikannya dengan percobaan sekaligus menghitung bilangan Avogadro (Bab 17). Sementara itu, pada 1869 **John Tyndall** dari Irlandia meneliti mengapa berkas cahaya tampak di udara berdebu tetapi tidak di udara yang sangat bersih. Nama keduanya kini menjadi nama sifat koloid.

Adsorpsi: permukaan yang lengket

Adsorpsi adalah penyerapan zat **pada permukaan** partikel. Karena luas permukaannya sangat besar (ingat Rumus Hidup di 25.1!), partikel koloid jago mengadsorpsi ion, molekul pewarna, dan bau. Contohnya:

- **Norit** (karbon aktif) untuk diare dan keracunan ringan: racun dan bakteri menempel di permukaannya.
- **Pemutihan gula tebu**: nira yang cokelat dilewatkan karbon aktif atau tanah pemucat sehingga zat warnanya teradsorpsi.

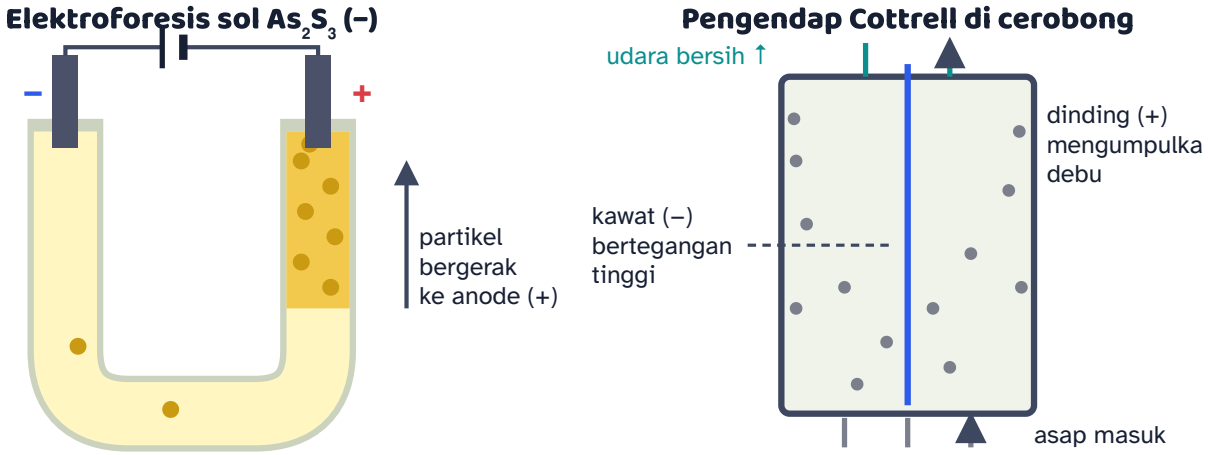
- **Pewarnaan batik alam**: kain dicelup larutan tawas (proses *fiksasi*) agar zat warna dari kayu tingi, jambal, atau indigo menempel kuat di serat.
- **Penjernihan air**: flok $\mathrm{Al(OH)_3}$ mengadsorpsi lumpur dan zat warna (subbab 25.7).

> ⚠️ **AWAS JEBAKAN**
>
> Adsorpsi berbeda dengan absorpsi. **Adsorpsi** hanya di permukaan, seperti debu menempel di kaca. **Absorpsi** masuk ke seluruh bagian, seperti air diserap spons. Karbon aktif bekerja dengan adsorpsi; karena itulah ia dibuat berpori-pori sangat banyak: satu gram karbon aktif bisa berpermukaan ratusan sampai lebih dari seribu meter persegi.

Muatan koloid dan elektroforesis

Banyak partikel koloid bermuatan listrik karena **mengadsorpsi ion** pada permukaannya, biasanya ion yang sejenis dengan penyusunnya. Sol besi(III) hidroksida, $\mathrm{Fe(OH)_3}$, mengadsorpsi ion $\mathrm{Fe^{3+}}$ sehingga bermuatan **positif**. Sol arsen(III) sulfida, $\mathrm{As_2S_3}$, mengadsorpsi ion $\mathrm{HS^-}$ sehingga bermuatan **negatif**. Butir lempung di air sungai juga bermuatan negatif. Karena muatannya sejenis, partikel-partikel itu **saling tolak** dan tidak bergabung. Inilah rahasia kestabilan koloid.

Bila dua elektrode dicelupkan ke dalam koloid dan diberi arus searah, partikel bergerak ke elektrode yang muatannya berlawanan. Peristiwa ini disebut **elektroforesis**, dan dipakai untuk menentukan muatan koloid, memisahkan protein dan DNA (tes DNA forensik), serta menyaring asap pabrik.



Kiri: elektroforesis menunjukkan muatan koloid. Kanan: di cerobong pabrik semen atau pembangkit listrik, partikel asap diberi muatan oleh kawat bertegangan tinggi, lalu tertarik ke dinding dan berjatuhan ke penampung.

25.4 Koagulasi dan dialisis

Kalau muatan sejenis membuat koloid stabil, apa yang terjadi bila muatannya **dinetralkan**? Partikel tidak lagi saling tolak. Setiap kali bertabrakan (ingat gerak Brown!), mereka menempel, menjadi gumpalan besar, lalu mengendap. Peristiwa ini disebut **koagulasi**.

DEFINISI · KOAGULASI

Koagulasi adalah penggumpalan partikel koloid sehingga koloid rusak dan fase terdispersinya memisah (mengendap atau mengapung). Penyebabnya antara lain: penambahan **elektrolit**, **pemanasan**, perubahan **pH**, **pencampuran** dua koloid yang berlawanan muatan, dan **elektroforesis** (partikel kehilangan muatan di elektrode).

Ion dari elektrolit yang muatannya **berlawanan** dengan muatan koloid berkerumun di sekitar partikel dan "menyelimuti" muatannya. Makin besar muatan ion itu, makin sedikit yang dibutuhkan.

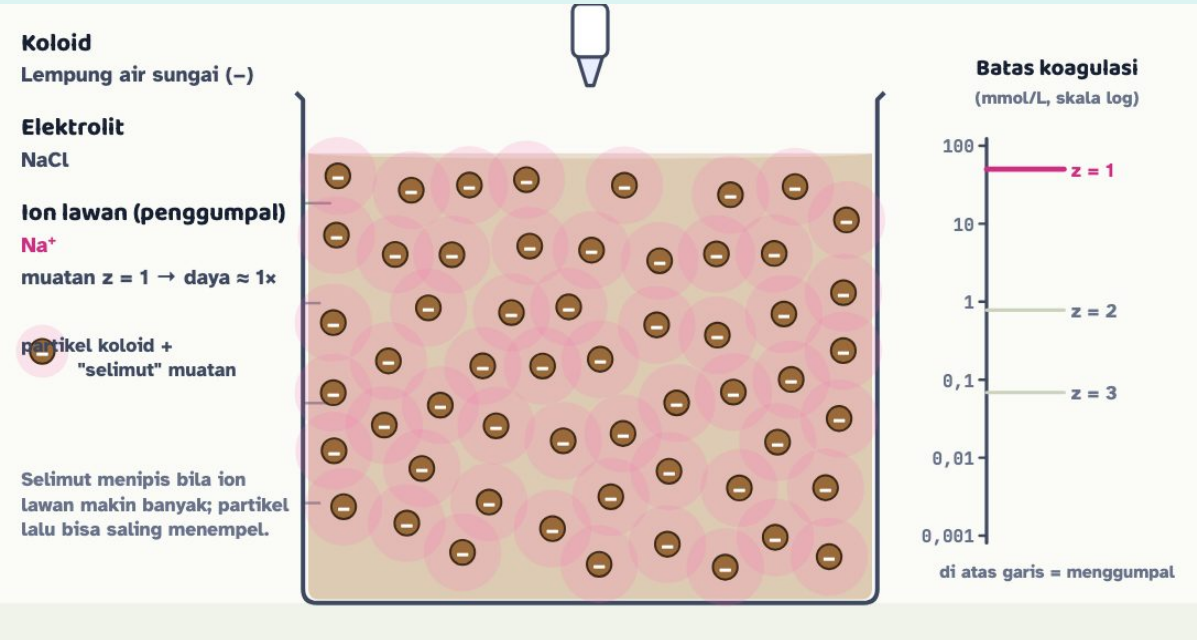
ATURAN HARDY–SCHULZE

Daya penggumpal suatu elektrolit ditentukan oleh ionnya yang bermuatan **berlawanan** dengan muatan koloid. Makin besar muatan ion itu, makin kuat daya penggumpalnya, kira-kira sebanding dengan z^6:

$$\text{koloid negatif: } Al^{3+} \gg Ca^{2+} \gg Na^{+} \qquad \text{koloid positif: } PO_4^{3-} \gg SO_4^{2-} \gg Cl^{-}$$

LAB MINI **Gumpalkan Koloidnya!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25



Ion penggumpal	Konsentrasi ion lawan	Batas koagulasi (model)
Na⁺ (muatan +1)	0 mmol/L	±50 mmol/L Na⁺

Keadaan	Kejernihan
stabil: partikel saling tolak	0 %

Mulailah dengan koloid lempung bermuatan negatif dan **NaCl**. Naikkan konsentrasinya setingkat demi setingkat dengan tombol **Teteskan**. Pada konsentrasi berapa partikelnya mulai menggumpal? Ulangi dengan **$CaCl_2$** dan **tawas**. Lalu ganti ke sol positif $Fe(OH)_3$: elektrolit mana yang kini paling jago? Perhatikan "selimut" muatan di sekitar partikel yang menipis.

RUMUS HIDUP

Daya penggumpal ion (Hardy–Schulze)

$$c_z \approx \frac{c_1}{z^6}$$

Konsentrasi ion yang cukup untuk menggumpalkan koloid turun drastis bila muatan ionnya naik: ion bermuatan 3 sekitar 729 kali lebih jago daripada ion bermuatan 1.

- z Muatan ion penggumpal
- c_1 Konsentrasi kritis ion bermuatan 1 mmol/L
- c_z Konsentrasi kritis ion bermuatan z mmol/L

KONSENTRASI KRITIS ION BERMUATAN Z

0,0686

mmol/L

Al^{3+}, Fe^{3+} (atau PO_4^{3-}): inilah kekuatan tawas!

Ion bermuatan **3** kira-kira **729** kali lebih kuat daripada ion bermuatan 1. Cukup **0,0686** mmol/L untuk mulai menggumpalkan koloid.

Cek satuan: mmol/L ÷ (tanpa satuan) = mmol/L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-HARDY-SCHULZE

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

"**Lawan muatan, besar muatan, dialah juara.**" Untuk koloid negatif, lihat *kation*nya saja; untuk koloid positif, lihat *anion*nya saja. Ion yang muatannya sejenis dengan koloid hanyalah penonton.

COBA SENDIRI

Mengapa cukup sejumput tawas?

Koloid lempung (bermuatan negatif) di air sungai mulai menggumpal bila konsentrasi $\mathrm{Na^+}$ mencapai 50 mmol/L. Dengan aturan z^6, perkirakan konsentrasi kritis $\mathrm{Ca^{2+}}$ dan $\mathrm{Al^{3+}}$. Lalu bandingkan massa NaCl (Mr 58,5) dan $\mathrm{AlCl_3}$ (Mr 133,5) yang dibutuhkan untuk 1 L air.

1. $\mathrm{Ca^{2+}}$: $c = 50/2^6 = 50/64 \approx 0{,}78$ mmol/L.
2. $\mathrm{Al^{3+}}$: $c = 50/3^6 = 50/729 \approx 0{,}069$ mmol/L.
3. NaCl: 50 mmol × 58,5 mg/mmol ≈ 2.900 mg = 2,9 g per liter (hampir setengah sendok teh garam!).
4. $\mathrm{AlCl_3}$: satu satuan rumus memberi satu $\mathrm{Al^{3+}}$, jadi 0,069 mmol × 133,5 mg/mmol ≈ 9 mg per liter = 9 ppm.

$\mathrm{Ca^{2+}}$ ±0,78 mmol/L dan $\mathrm{Al^{3+}}$ ±0,069 mmol/L. Massa garam aluminium yang dibutuhkan ±300 kali lebih kecil daripada garam dapur, dan airnya tidak menjadi asin. Itulah sebabnya PDAM memakai garam aluminium (tawas), bukan garam dapur.

KIMIA NUSANTARA · TAHU DAN KARET: KOAGULASI YANG KITA MAKAN DAN PAKAI

Tahu adalah koagulasi protein kedelai. Sari kedelai panas diberi **batu tahu** (kalsium sulfat, $\mathrm{CaSO_4 \cdot 2\,H_2O}$), cuka, atau "air biang" asam sisa pembuatan tahu sebelumnya. Ion $\mathrm{Ca^{2+}}$ atau ion $\mathrm{H^+}$ menetralkan muatan negatif protein sehingga protein menggumpal menjadi dadih putih yang lalu dicetak dan dipres. Di kebun karet Sumatra dan Kalimantan, **lateks** (sol partikel karet bermuatan negatif) digumpalkan petani dengan asam semut (asam format) atau cuka menjadi lembaran karet. Bahkan **delta sungai** seperti delta Mahakam terbentuk karena lumpur koloid dari sungai menggumpal saat bertemu ion-ion garam di air laut.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

LAPISAN GANDA LISTRIK DAN POTENSIAL ZETA

Sebuah partikel koloid bermuatan dikelilingi dua lapisan: lapisan ion lawan yang melekat erat (lapisan Stern) dan "awan" ion lawan yang makin renggang ke luar (lapisan difus). Beda potensial di batas lapisan yang ikut bergerak bersama partikel disebut **potensial zeta**, ζ. Koloid dalam air umumnya stabil bila $|\zeta|$ lebih dari sekitar 30 mV.

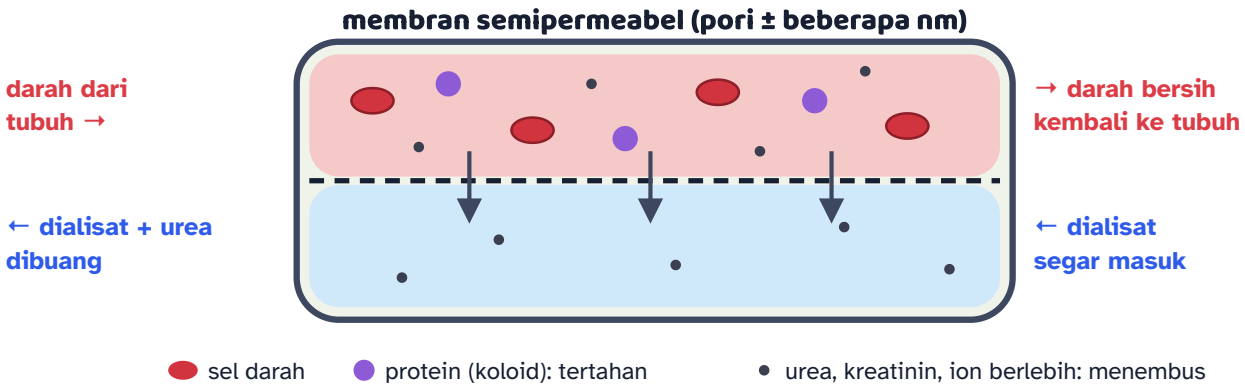
Tebal awan ion diukur dengan **panjang Debye**. Untuk elektrolit 1:1 dalam air 25 °C, $\kappa^{-1} \approx 0{,}304/\sqrt{c}$ nm (c dalam mol/L): 9,6 nm pada 1 mmol/L, tetapi hanya 0,96 nm pada 0,1 mol/L. Elektrolit "memampatkan" awan itu sehingga gaya tarik van der Waals antarpartikel menang. Teori DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek) menggabungkan kedua gaya ini, dan untuk potensial permukaan yang tinggi meramalkan konsentrasi koagulasi kritis $\propto 1/z^6$: asal-usul aturan Hardy–Schulze.

Koloid pelindung

Kadang kita justru ingin koloid **tidak** menggumpal. Caranya: tambahkan **koloid pelindung**, yaitu koloid liofil yang membungkus partikel koloid lain. Gelatin menjaga kristal es dan gula pada es krim tetap halus, gom arab menjaga partikel tinta tetap tersebar, dan kasein menjaga butir lemak susu tidak bergabung.

Dialisis: menyaring dengan membran

Koloid hasil pembuatan sering tercemar ion-ion yang bisa menggumpalkannya. Ion itu dapat dibuang dengan **dialisis**: koloid dimasukkan ke kantong **membran semipermeabel**, lalu dicelupkan ke air yang terus mengalir. Ion dan molekul kecil menembus pori membran, sedangkan partikel koloid tertahan. Prinsip yang sama menyelamatkan nyawa jutaan orang lewat **cuci darah** (hemodialisis).



Ginjal buatan. Darah dan cairan dialisat mengalir berlawanan arah. Zat sisa yang kecil berpindah ke dialisat, sedangkan sel darah dan protein (berukuran koloid atau lebih besar) tetap di dalam darah.

TAMU DARI MASA LALU

Kata **koloid** diciptakan kimiawan Skotlandia **Thomas Graham** pada 1861, dari bahasa Yunani *kolla* yang berarti lem. Graham memperhatikan bahwa zat seperti lem, gelatin, dan kanji sangat lambat menembus kertas perkamen, sedangkan garam dan gula menembusnya dengan cepat. Ia menamai cara pemisahan itu **dialisis**. Delapan puluh tahun kemudian, pada 1943, dokter Belanda **Willem Kolff** membangun ginjal buatan pertama dari membran selofan, drum berputar, dan tangki cairan. Kini pasien gagal ginjal di banyak rumah sakit Indonesia menjalani cuci darah biasanya 2–3 kali seminggu, sekitar 4 jam setiap kali.

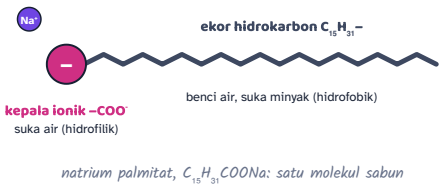
25.5 Liofil, liofob, dan rahasia pengemulsi

Koloid dengan medium cair dibedakan menurut "hubungan" partikelnya dengan medium. **Koloid liofil** (Yunani: *suka cairan*) menarik dan menyerap medium di sekitarnya. **Koloid liofob** (*takut cairan*) hampir tidak menarik medium dan hanya stabil berkat muatan listriknya. Bila mediumnya air, keduanya disebut **hidrofil** dan **hidrofob**.

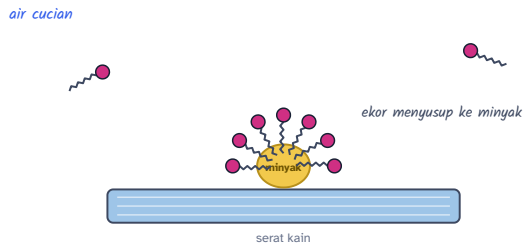
Sifat	Liofil (suka medium)	Liofob (takut medium)

Hubungan dengan medium	menyerap medium, dibungkus lapisan solvasi tebal	sedikit menarik medium; stabil karena muatan
Cara membuat	cukup didispersikan (gelatin + air hangat)	perlu cara khusus (kondensasi, busur Bredig)
Kekentalan	lebih kental daripada mediumnya	hampir sama dengan medium
Bila diberi sedikit elektrolit	tetap stabil; perlu elektrolit sangat banyak	mudah menggumpal
Setelah dikeringkan	dapat didispersikan kembali (reversibel)	sulit kembali (tak reversibel)
Efek Tyndall	lemah	jelas
Contoh	gelatin, agar-agar, kanji, protein, sabun	sol emas, sol belerang, sol $\mathrm{Fe(OH)_3}$, sol $\mathrm{As_2S_3}$, sol AgCl

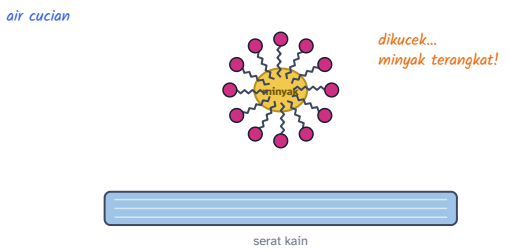
Minyak dan air dikocok sekuat apa pun akan segera memisah lagi. Agar menjadi emulsi yang stabil, kita butuh **pengemulsi** (emulgator): zat yang molekulnya punya satu ujung **suka air** dan satu ujung **suka minyak**. Sabun, deterjen, **kuning telur** (mengandung lesitin) pada mayones, **kasein** pada susu, dan **garam empedu** yang mengemulsi lemak makanan di ususmu adalah pengemulsi.



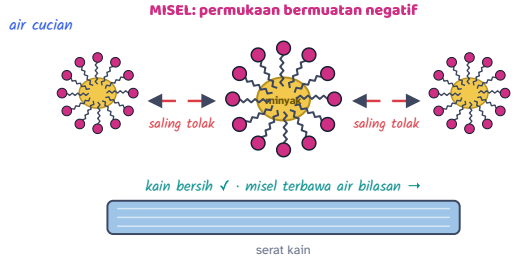
Langkah 1. Molekul sabun punya dua "kepribadian": kepala ionik $-\mathrm{COO}-$ yang suka air (hidrofilik) dan ekor hidrokarbon panjang yang benci air tetapi suka minyak (hidrofobik).



Langkah 2. Di air cucian, ekor-ekor sabun menyusup ke dalam noda minyak, sedangkan kepalanya tetap "berenang" di air.



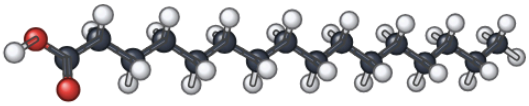
Langkah 3. Saat kain dikucek, air menarik kepala-kepala sabun sehingga tetesan minyak terangkat dari serat, dan makin banyak molekul sabun membungkusnya.



Langkah 4. Terbentuklah **misel**: minyak terkurung di tengah, kepala bermuatan negatif di luar. Misel saling tolak sehingga tetap tersebar sebagai koloid (emulsi), lalu terbawa air bilasan.

MOLEKUL 3D

Kepala suka air, ekor suka minyak



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam palmitat $C_{16}H_{32}O_2$ Mr ≈ 256,43 PubChem ↗

Asam lemak jenuh 16 karbon, banyak di minyak sawit (dinamai dari palma).

Putar **asam palmitat**: di satu ujung ada gugus –COOH, di ujung lain rantai 15 atom karbon. Pada sabun, H dari –COOH diganti Na^+ sehingga ujung itu menjadi kepala ionik $–COO^- Na^+$. Bandingkan dengan **asam oleat** yang rantainya "tertekuk" karena ikatan rangkap *cis*. Terakhir lihat **gliserol**, hasil samping pembuatan sabun yang sangat suka air karena punya tiga gugus –OH.

Sabun dibuat dengan **saponifikasi**: lemak atau minyak (trigliserida) dipanaskan dengan basa kuat. Misalnya tripalmitin dari minyak sawit:

$$(C_{15}H_{31}COO)_3C_3H_5 + 3\,NaOH \longrightarrow C_3H_5(OH)_3 + 3\,C$$

ID

KIMIA NUSANTARA · SANTAN, KALIO, DAN RENDANG

Santan adalah emulsi minyak kelapa dalam air yang dijaga oleh **protein kelapa** sebagai pengemulsi alami. Saat memasak rendang, santan direbus berjam-jam. Air menguap, protein rusak karena panas, dan "satpam" emulsi pun hilang: santan **pecah**, minyaknya keluar. Juru masak Minang menyebut tahap berkuah kental sebagai *kalio*; bila dimasak terus, bumbu dan daging akhirnya "digoreng" dalam minyak kelapanya sendiri sampai menjadi rendang yang kering dan tahan lama. Itulah sebabnya santan untuk opor atau gulai harus terus diaduk dan tidak dididihkan terlalu keras: pengadukan menjaga butir minyak tetap tersebar dan mencegah protein menggumpal.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Sabun tidak "melarutkan" minyak menjadi larutan sejati. Minyak hanya dipecah menjadi tetes-tetes kecil yang dibungkus misel, jadi hasilnya **emulsi** (koloid). Itu sebabnya air bekas cucian tampak keruh dan menunjukkan efek Tyndall.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

KONSENTRASI MISEL KRITIS

Pada konsentrasi rendah, molekul sabun atau deterjen berdiri sendiri-sendiri dan sebagian berjajar di permukaan air (karena itu tegangan permukaan turun). Di atas **konsentrasi misel kritis** (KMK, *critical micelle concentration*), molekul tambahan berkumpul menjadi misel berisi puluhan molekul. Untuk natrium dodesil sulfat (SDS, atau natrium lauril sulfat pada sampo) KMK-nya sekitar 8 mmol/L pada 25 °C. Di atas KMK, tegangan permukaan hampir tidak turun lagi, tetapi kemampuan "menyimpan" minyak di dalam misel meningkat tajam. Koloid yang terbentuk dari kumpulan molekul seperti ini disebut **koloid asosiasi**.

25.6 Membuat koloid: kondensasi dan dispersi

Ukuran koloid ada di tengah, jadi ada dua jalan untuk mencapainya. **Kondensasi** menggabungkan partikel yang lebih kecil (ion atau molekul dari larutan) menjadi berukuran koloid. **Dispersi** memecah partikel yang lebih besar (butir kasar suspensi) menjadi berukuran koloid.

Cara	Prinsip	Contoh
Kondensasi (kecil → koloid)		
Reaksi redoks	hasil reaksi berupa unsur yang tidak larut	sol belerang: $2\,H_2S + SO_2 \longrightarrow 3\,S + 2\,H_2O$; sol emas: $2\,AuCl_3 + 3\,HCHO + 3\,H_2O \longrightarrow 2\,Au + 3\,HCOOH + 6\,HCl$
Hidrolisis	garam bereaksi dengan air panas	sol merah cokelat: $FeCl_3 + 3\,H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 + 3\,HCl$ ($FeCl_3$ diteteskan ke air mendidih)
Dekomposisi rangkap	dua larutan encer membentuk zat sukar larut	sol kuning: $As_2O_3 + 3\,H_2S \longrightarrow As_2S_3 + 3\,H_2O$; sol AgCl dari $AgNO_3$ dan NaCl yang sangat encer
Penggantian pelarut	zat dituang ke pelarut yang tidak melarutkannya	larutan belerang dalam alkohol dituang ke air → sol belerang
Dispersi (besar → koloid)		

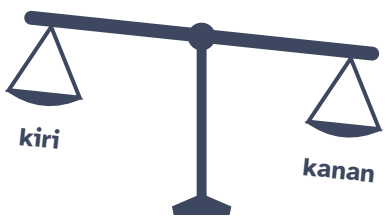
Mekanik	digiling halus (penggiling koloid) atau dikocok kuat dengan pengemulsi	cat, tinta, cokelat, mayones
Peptisasi	endapan dipecah oleh ion atau zat pemecah (peptisator)	endapan $Al(OH)_3$ + sedikit $AlCl_3$; endapan NiS + H_2S; karet + bensin
Busur Bredig	loncatan listrik antara dua kawat logam di dalam air menguapkan logam; uapnya mengembun menjadi butir koloid	sol emas, sol perak, sol platina
Homogenisasi	cairan ditekan melewati celah sempit bertekanan tinggi	susu homogen: butir lemaknya diperkecil agar krim tidak naik

Perhatikan bahwa semua reaksi di atas **setara**. Setarakan sendiri dengan Penyetara Reaksi berikut. Bonusnya: reaksi saponifikasi pembuat sabun dari subbab 25.5.

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi pembuatan sol (dan sabun)**

− 1 + $FeCl_3$ + − 1 + H_2O → − 1 + $Fe(OH)_3$ + − 1 + HCl

Unsur	Kiri	Kanan	
Fe	1 ●	1 ●	✓
Cl	3 ●●●	1 ●	✗
H	2 ○○	4 ○○○○	✗



Unsur	Kiri	Kanan	
O	1 ●	3 ●●●	✕

Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 7 null

Mulailah dari atom yang hanya muncul di satu zat pada setiap ruas. Untuk sol emas, setarakan Au dan Cl dulu, lalu C, kemudian O dan H. Reaksi kelima adalah hidrolisis ion $\mathrm{Al^{3+}}$ yang membuat flok $\mathrm{Al(OH)_3}$ di PDAM; jangan lupa menyetarakan muatannya juga!

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

"**Kondensasi naik, dispersi turun.**" Bayangkan tangga ukuran: larutan di lantai bawah, koloid di lantai tengah, suspensi di lantai atas. Kondensasi *naik* dari larutan (biasanya lewat reaksi kimia), dispersi *turun* dari suspensi (biasanya lewat cara fisika: giling, kocok, setrum).

KERJAKAN BERSAMA **Sol merah dari air mendidih**

Beberapa tetes larutan besi(III) klorida pekat diteteskan ke dalam air mendidih. Air berubah menjadi merah cokelat jernih dan menunjukkan efek Tyndall. (a) Tuliskan persamaan reaksinya. (b) Termasuk cara apa? (c) Mengapa partikelnya bermuatan positif?

1. (a) Ion $\mathrm{Fe^{3+}}$ terhidrolisis: $\mathrm{FeCl_3 + 3\,H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 + 3\,HCl}$. Cek: Fe 1 = 1; Cl 3 = 3; H 6 = 3 + 3; O 3 = 3 ✔
2. (b) Ion-ion kecil bergabung menjadi partikel $\mathrm{Fe(OH)_3}$ berukuran koloid, jadi termasuk **kondensasi** (cara hidrolisis). Air mendidih mempercepat hidrolisis dan menghasilkan banyak inti kecil sekaligus.
3. (c) Permukaan $\mathrm{Fe(OH)_3}$ mengadsorpsi ion yang "sejenis" dan berlebih di sekitarnya, yaitu $\mathrm{Fe^{3+}}$, sehingga bermuatan positif.

Sol $\mathrm{Fe(OH)_3}$ bermuatan positif dibuat secara kondensasi (hidrolisis). Karena positif, sol ini paling mudah digumpalkan oleh anion bermuatan besar seperti $\mathrm{PO_4^{3-}}$.



TAMU DARI MASA LALU

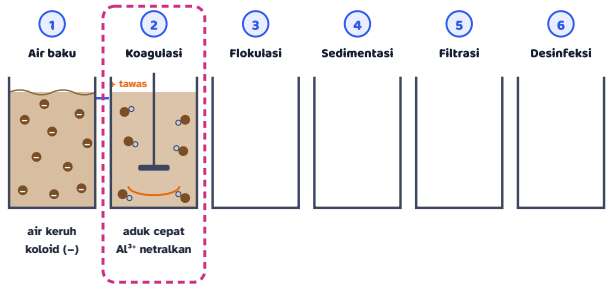
Pada 1857 **Michael Faraday** mereduksi larutan garam emas dan mendapatkan cairan berwarna merah delima. Ia menduga warnanya berasal dari butir emas yang sangat halus, bukan emas terlarut, dan menguji dugaan itu dengan berkas cahaya. Sebagian contoh sol emas Faraday konon masih tersimpan di Royal Institution, London, dan tetap merah lebih dari 150 tahun kemudian! Pada 1898 **Georg Bredig** membuat sol logam dengan loncatan listrik, dan pada 1925 **Richard Zsigmondy** meraih Nobel Kimia berkat ultramikroskop yang membuat partikel koloid dapat diamati satu per satu.

25.7 Koloid untuk kehidupan: dari PDAM sampai nano-perak

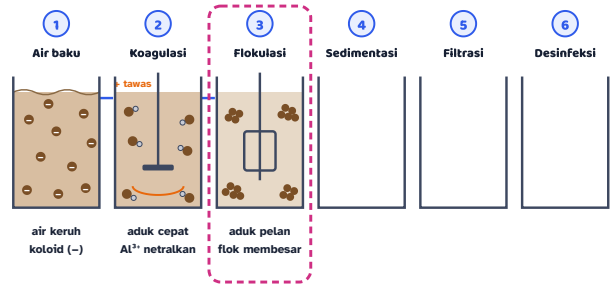
Air sungai yang menjadi bahan baku PDAM sering berwarna cokelat karena **koloid lempung** bermuatan negatif. Butir-butir ini terlalu kecil untuk mengendap sendiri dan lolos dari saringan pasir biasa. Solusinya adalah semua yang sudah kamu pelajari di bab ini: muatan, koagulasi, adsorpsi, dan penyaringan.



Langkah 1. Air baku dari sungai keruh karena koloid lempung bermuatan negatif. Partikelnya saling tolak, jadi tidak mau mengendap sendiri walau didiamkan berhari-hari.



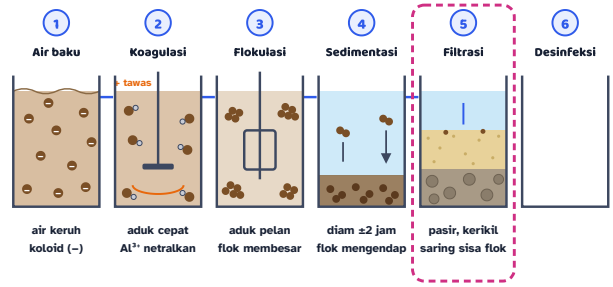
Langkah 2. Koagulasi: tawas, $\mathrm{Al_2(SO_4)_3}$, dicampur dengan pengadukan cepat. Ion $\mathrm{Al^{3+}}$ menetralkan muatan negatif koloid (aturan Hardy–Schulze), dan $\mathrm{Al(OH)_3}$ yang terbentuk bertindak sebagai "lem" yang lengket.



Langkah 3. Flokulasi: pengadukan pelan mempertemukan partikel yang sudah netral sehingga bergabung menjadi **flok** yang makin besar, seperti bola salju yang menggelinding.



Langkah 4. Sedimentasi: flok yang besar dan berat mengendap di dasar bak sebagai lumpur. Air di bagian atas sudah jauh lebih jernih.



Langkah 5. Filtrasi: air dilewatkan lapisan pasir dan kerikil yang menahan sisa flok kecil. Beberapa instalasi menambah karbon aktif untuk mengadsorpsi bau dan warna.



Langkah 6. Desinfeksi: klorin atau kaporit membunuh kuman yang tersisa, lalu air dialirkan ke rumahmu. Ingat: tawas menjernihkan, klorin menyehatkan.

Ion aluminium tidak hanya menetralkan muatan. Di dalam air, ion itu terhidrolisis membentuk endapan seperti agar-agar yang menyapu partikel lain:

$$\mathrm{Al^{3+} + 3\,H_2O \longrightarrow Al(OH)_3 + 3\,H^+} \qquad \mathrm{Al_2(SO_4)_3 + 3}$$

Ion $\mathrm{H^+}$ yang terbentuk dinetralkan oleh alkalinitas alami air (ion hidrogen karbonat). Bila airnya terlalu asam, PDAM menambahkan kapur agar flok terbentuk baik, biasanya pada pH sekitar 6–7,5. Berapa banyak tawas yang dipakai? Dosisnya biasa dinyatakan dalam **ppm**: untuk air, 1 ppm = 1 mg zat per liter air.

RUMUS HIDUP

Dosis tawas untuk volume air

$$m = \frac{D \times V}{1000}$$

Massa tawas (gram) sama dengan dosis (mg per liter, alias ppm) dikali volume air (liter), lalu dibagi 1000 untuk mengubah miligram menjadi gram.

- D Dosis tawas `ppm (mg/L)`
- V Volume air `L`
- m Massa tawas `g`

MASSA TAWAS

30

g

🛢️ **seukuran tandon rumah**

1.000 L air dengan dosis **30** ppm membutuhkan **30** g tawas, atau **0,03** kg. Kira-kira **2,5** sendok makan tawas bubuk (±12 g per sendok).

Satuan Nusantara: ≈ 51% dari 1 mol garam dapur (NaCl) · ≈ 2 × satu sendok makan air · ≈ 6 × satu sendok teh gula pasir (±)

Cek satuan: (mg/L) × L ÷ 1000 = g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLOID-TAWAS

KERJAKAN BERSAMA

Menjernihkan air tandon

Pak RT ingin menjernihkan air sumur keruh dalam tandon 1.200 L. Uji jar menunjukkan dosis terbaik 25 ppm. Berapa gram tawas yang diperlukan, dan berapa sendok makan bila satu sendok makan tawas bubuk ±12 g?

1. 25 ppm berarti 25 mg tawas untuk setiap liter air.
2. $m = 25\ \text{mg/L} \times 1.200\ \text{L} = 30.000\ \text{mg} = 30\ \text{g}$.
3. Banyak sendok: $30/12 = 2{,}5$ sendok makan.

30 g tawas, sekitar 2,5 sendok makan. Larutkan dulu dalam seember air, tuang sambil diaduk cepat, aduk pelan beberapa menit, lalu diamkan beberapa jam sebelum air bagian atas dialirkan. Air ini tetap perlu dimasak sebelum diminum!

ADU CEPAT

Dosis tawas kilat

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

m (g) = D (mg/L) × V (L) ÷ 1000. Contoh: 20 ppm × 500 L = 10.000 mg = 10 g.

⚠

AWAS JEBAKAN

Air yang jernih belum tentu aman diminum. Tawas hanya menggumpalkan koloid; kuman, ion logam berat, dan zat terlarut lain tidak hilang. Air sumur yang dijernihkan dengan tawas tetap harus **dimasak sampai mendidih**. Jangan pula menambah tawas berlebihan: air menjadi asam dan sisa aluminiumnya tidak baik bagi tubuh.

ID

KIMIA NUSANTARA · KABUT ASAP: AEROSOL YANG MENYESAKKAN

Saat musim kemarau, kebakaran hutan dan lahan gambut di Riau, Jambi, Sumatra Selatan, dan Kalimantan dapat menyelimuti kota-kota dengan **kabut asap**, aerosol padat berisi partikel jelaga dan abu. Partikel berdiameter di bawah 2,5 µm ($PM_{2,5}$) sangat berbahaya karena dapat masuk jauh ke paru-paru. Matahari pun tampak jingga kemerahan karena cahaya birunya dihamburkan. Masker biasa kurang efektif; masker berfilter khusus partikel halus lebih melindungi, dan gerak Brown membuat partikel asap tetap melayang berhari-hari.

Kimia di sekitarmu

Cuci darah

Mesin hemodialisis membuang urea dan ion berlebih dari darah pasien gagal ginjal lewat membran semipermeabel, sementara sel darah dan protein tetap tinggal.

Cerobong bersih

Pabrik semen dan pembangkit listrik batu bara memasang pengendap elektrostatis (Cottrell) yang menangkap partikel debu bermuatan sebelum keluar ke udara.

Norit untuk diare

Karbon aktif yang sangat berpori mengadsorpsi racun dan bakteri di saluran cerna, lalu dibuang bersama kotoran.

Cat dan tinta

Pigmen padat digiling sampai berukuran koloid dan diberi zat penstabil agar tidak menggumpal atau mengendap di dalam kaleng.

Krim dan losion

Kosmetik adalah emulsi minyak dan air yang dijaga pengemulsi. Losion encer berupa minyak dalam air, krim malam yang berminyak sering berupa air dalam minyak.

Nano-perak

Partikel perak berukuran 1–100 nm pada pembalut luka dan kain antibakteri perlahan melepas ion perak yang membunuh bakteri. Luas permukaannya yang besar membuatnya sangat ampuh.

Cek Cepat

Berkas senter tampak jelas ketika menembus …

- air garam
- air gula
- kabut
- air suling

Tawas menjernihkan air keruh terutama karena ...

- membunuh kuman di dalam air
- ion Al^{3+} menetralkan muatan koloid lempung sehingga menggumpal
- membuat air menjadi basa
- melarutkan lumpur menjadi larutan jernih

Mesin cuci darah memanfaatkan sifat koloid yang disebut ...

- efek Tyndall
- gerak Brown
- elektroforesis
- dialisis

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. D

Tantangan Rumah: pedang cahaya di dapur dan tahu buatan sendiri

Bahan: senter HP, 5 gelas bening, air, gula, garam, susu cair, sabun cuci piring, 1 sendok teh tanah, 250 mL susu kedelai tawar, 2 sendok makan cuka dapur, panci kecil, saringan dan kain bersih.

1. Isi lima gelas dengan air, lalu tambahkan: gula (2 sdm), garam (1 sdt), susu (1 sdm), sabun cuci piring (beberapa tetes, aduk pelan), dan tanah (1 sdt).
2. Matikan lampu. Sorotkan senter HP mendatar ke sisi setiap gelas dan amati dari samping. Catat gelas mana yang memperlihatkan berkas.
3. Diamkan 15 menit, lalu sorot lagi. Apa yang berubah pada gelas berisi tanah?
4. Bersama orang dewasa, panaskan susu kedelai sampai hampir mendidih, matikan api, lalu tuangkan cuka sedikit demi sedikit sambil diaduk pelan. Amati gumpalan putih yang muncul, lalu saring dengan kain.

Keselamatan: pakai senter HP, **jangan pointer laser**: sinar laser dapat merusak retina walau hanya sekejap, dan jangan menyorot mata siapa pun. Kompor dan susu panas ditangani orang dewasa. Jangan mencicipi air sabun atau air tanah. Tahu buatanmu hanya untuk diamati bila alatnya juga dipakai untuk percobaan sabun. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Gelas mana yang berisi larutan, koloid, dan suspensi? Mengapa cuka membuat protein susu kedelai menggumpal? Hubungkan dengan muatan koloid dan koagulasi.

RINGKASAN KILAT

Bab 25 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan **larutan**, **koloid**, dan **suspensi** dari ukuran partikel (1–1000 nm), efek Tyndall, pengendapan, dan penyaringan
- menggolongkan **jenis koloid** (sol, emulsi, buih, gel, aerosol, buih padat, sol padat) dari fase terdispersi dan medium pendispersinya
- menjelaskan **sifat koloid**: efek Tyndall, gerak Brown, adsorpsi, muatan, elektroforesis, koagulasi (aturan Hardy–Schulze), dan dialisis
- membedakan koloid **liofil** dan **liofob**, serta menjelaskan kerja **sabun dan pengemulsi** dengan model misel
- menjelaskan cara **membuat koloid** (kondensasi & dispersi) dan menghitung **dosis tawas** pada penjernihan air

Istilah kunci

koloid · Koloid · larutan · suspensi · Efek Tyndall · gerak Brown · Adsorpsi · elektroforesis · koagulasi · Koagulasi · koloid pelindung · dialisis · Koloid liofil · Koloid liofob · pengemulsi · Kondensasi

Rumus penting

$$A = \frac{6000}{\rho\, d}$$

Skala ukuran partikel. Luas permukaan setiap gram butiran bulat berbanding terbalik dengan diameternya: pecah butir menjadi sepuluh kali lebih kecil, permukaannya sepuluh kali lebih luas.

$$c_z \approx \frac{c_1}{z^6}$$

Daya penggumpal ion (Hardy–Schulze). Konsentrasi ion yang cukup untuk menggumpalkan koloid turun drastis bila muatan ionnya naik: ion bermuatan 3 sekitar 729 kali lebih jago daripada ion bermuatan 1.

$$m = \frac{D \times V}{1000}$$

Dosis tawas untuk volume air. Massa tawas (gram) sama dengan dosis (mg per liter, alias ppm) dikali volume air (liter), lalu dibagi 1000 untuk mengubah miligram menjadi gram.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Koloid tidak selalu keruh, dan cairan berwarna tidak selalu koloid.
- Adsorpsi berbeda dengan absorpsi.
- Sabun tidak "melarutkan" minyak menjadi larutan sejati.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=25

🧩 Teka-teki untuk Bab 26

Kunyit berwarna kuning di dapur, tetapi berubah merah saat terkena air sabun. Apakah kunyit bisa "merasakan" sesuatu?

▼ **Intip petunjuk**

Air sabun bersifat **basa**. Zat warna kurkumin dalam kunyit berubah bentuk saat bertemu basa sehingga warnanya bergeser menjadi merah kecokelatan, lalu kembali kuning di lingkungan asam. Zat yang warnanya berubah menurut keasaman disebut **indikator**. Di Bab 26 kamu akan mengukur "rasa" asam dan basa itu dengan skala pH.

26 Asam & Basa: Ketika Kunyit Berubah Merah

Setetes air kunyit yang kuning bisa mendadak merah hanya karena bertemu air sabun. Di balik sulap dapur itu ada partikel paling mungil di dunia kimia, yaitu proton, yang berpindah dari satu molekul ke molekul lain.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan sifat **asam** dan **basa**, lalu mengujinya dengan **indikator** alami (kunyit, kubis ungu, bunga sepatu) dan sintetis;
- menjelaskan asam-basa menurut **Arrhenius**, **Brønsted–Lowry** (pasangan konjugat), dan **Lewis**;
- menghitung **pH**, **pOH**, $[\mathrm{H}^+]$, dan $[\mathrm{OH}^-]$ dengan tetapan air K_w;
- membedakan asam/basa **kuat** dan **lemah**, lalu memakai K_a, K_b, dan derajat ionisasi untuk menghitung pH;
- menulis reaksi **netralisasi** yang setara dan memilih cara **membuat garam** di laboratorium.

SULAP KUNYIT LARAS

KOMIK · 4 PANEL



KAK TIRTA

*Bukan kepanasan, Bima. Air sabun dan air kapur sirih bersifat **basa**. Di dalam basa, kurkumin kunyit melepas H^+ sehingga warnanya berubah. Di cuka yang asam, ia tetap kuning.*



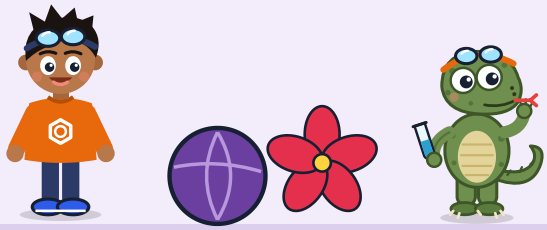
Kimo ikut meneliti...

KIMO

Kunyit adalah indikator alami Nusantara! Kubis ungu dan bunga sepatu malah punya lebih banyak warna.

BIMA

Jadi dapur kita penuh alat laboratorium...



Tebak Dulu!

Mengapa air kunyit berubah merah kecokelatan saat diteteskan ke air sabun?

- Sabun menyimpan pewarna merah yang terlepas oleh kunyit.
- Kunyit "terbakar" oleh panas yang dihasilkan sabun.
- Di dalam basa, molekul kurkumin melepas ion H^+ sehingga bentuk dan warnanya berubah.
- Kunyit membusuk dengan sangat cepat ketika terkena sabun.

Jawabannya: kurkumin melepas H^+. Air sabun bersifat basa. Basa "menarik" ion hidrogen (proton) dari molekul kurkumin. Kurkumin yang kehilangan proton menyerap cahaya dengan panjang gelombang berbeda, sehingga mata kita melihat merah kecokelatan. Tidak ada yang terbakar atau membusuk: cukup teteskan cuka, dan warnanya kembali kuning!

26.1 Asam dan basa di dapurmu

Air jeruk nipis untuk sambal, cuka di acar timun, dan asam jawa di sayur asem punya satu kesamaan: rasanya masam. Kata *acid* berasal dari bahasa Latin *acidus*, artinya "masam". Zat-zat itu tergolong **asam**.

Lawan asam adalah **basa**. Air sabun, air kapur sirih, larutan soda kue, dan obat maag bersifat basa. Basa yang larut baik dalam air disebut juga **alkali**, dari bahasa Arab *al-qaly*, yaitu abu tumbuhan yang dulu dipakai untuk

membuat sabun.

Bahasa sederhana · Bayangkan asam dan basa sebagai dua tim yang saling berlawanan. Kalau keduanya dicampur dalam jumlah yang pas, mereka saling "menjinakkan" dan berubah menjadi air dan garam. Untuk tahu sebuah cairan masuk tim mana, kita tidak boleh mencicipinya. Kita memakai **indikator**, yaitu zat yang berganti warna seperti bunglon.

Sifat	Asam	Basa
Rasa (hanya untuk bahan pangan!)	masam	pahit, getir
Saat disentuh	yang pekat membakar kulit	licin seperti sabun; yang pekat merusak kulit
Kertas lakmus	biru → **merah**	merah → **biru**
Dengan logam aktif (Mg, Zn)	menghasilkan gas $\mathrm{H_2}$	umumnya tidak bereaksi
Dengan karbonat (soda kue, kapur)	berbuih gas $\mathrm{CO_2}$	tidak berbuih
pH pada 25 °C	kurang dari 7	lebih dari 7
Contoh di rumah	cuka, jeruk nipis, asam jawa, tomat, minuman bersoda	soda kue, sabun, kapur sirih, obat maag, pembersih kaca

Dua reaksi khas asam mudah diamati. Asam bereaksi dengan logam aktif seperti **Mg** menghasilkan gas hidrogen, dan dengan karbonat menghasilkan gas karbon dioksida yang berbuih:

$$\mathrm{Mg\,(s) + 2\,HCl\,(aq) \longrightarrow MgCl_2\,(aq) + H_2\,(g)}$$

$$\mathrm{NaHCO_3\,(s) + CH_3COOH\,(aq) \longrightarrow CH_3COONa\,(aq)}$$

⚠ **KESELAMATAN**

Di laboratorium, **jangan pernah mencicipi atau menyentuh** zat untuk menebak sifatnya. Asam dan basa pekat bersifat **korosif**: soda api (NaOH) dan asam klorida pekat dapat melukai kulit dan membutakan mata. Pakai kacamata pelindung. Di rumah, **jangan mencampur pembersih**: pemutih pakaian yang tercampur pembersih porselen yang asam melepaskan gas klorin yang beracun.



Korosif



Iritan

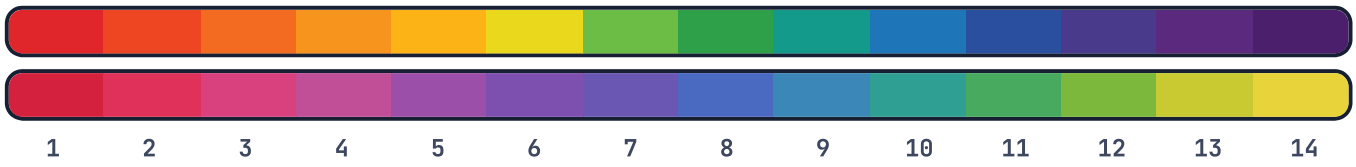
Indikator: bunglon kimia

DEFINISI · INDIKATOR ASAM-BASA

Indikator adalah zat (biasanya pewarna organik yang bersifat asam lemah) yang warnanya berbeda dalam suasana asam dan basa. Perubahan warna terjadi pada rentang pH tertentu yang disebut **trayek pH** indikator itu.

Indikator	Trayek pH	Warna di sisi asam	Warna di sisi basa
Metil oranye	3,1–4,4	merah	kuning
Metil merah	4,4–6,2	merah	kuning
Bromtimol biru	6,0–7,6	kuning	biru
Lakmus	±4,5–8,3	merah	biru
Fenolftalein	8,2–10,0	tak berwarna	merah muda keunguan
Kunyit (kurkumin)	±7,4–8,6	kuning	merah kecokelatan
Kubis ungu, bunga sepatu (antosianin)	bertahap 1–14	merah → ungu	biru → hijau → kuning
Indikator universal (campuran)	1–14	merah → jingga → kuning	hijau → biru → ungu

Indikator universal dan ekstrak kubis ungu sama-sama memberi "pelangi" warna dari pH 1 sampai 14:



Atas: indikator universal. Bawah: ekstrak kubis ungu (warna nyata bisa sedikit berbeda, bergantung pada jenis kubis dan kepekatan ekstrak).

✏️ **TRIK KAK TIRTA · LAKMUS**

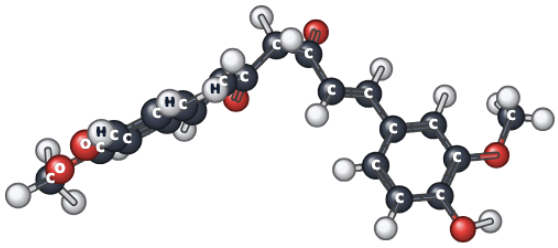
"aSaM → Merah": kata **asam** dan **merah** sama-sama punya huruf M, jadi lakmus biru memerah di dalam asam. "Basa → Biru": sama-sama berawal B, jadi lakmus merah membiru di dalam basa.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1664, **Robert Boyle** dari Inggris mencatat bahwa sirup bunga violet berubah merah oleh asam dan hijau oleh basa. Itu salah satu catatan tertua tentang indikator. Kertas lakmus yang kita pakai sekarang dibuat dari pewarna lumut kerak (*lichen*). Boyle memakai uji warna seperti ini untuk mengelompokkan zat menjadi asam, basa, atau netral, bukan sekadar berdasarkan rasa.

Mengapa kunyit bisa berganti warna? Jawabannya ada pada bentuk molekulnya. Putar molekul **kurkumin** di bawah ini. Bandingkan juga dengan asam-asam dapur: cari gugus $-\mathrm{COOH}$ pada setiap molekul. Atom H pada gugus itulah yang dilepas sebagai H^{+}.

MOLEKUL 3D **Kurkumin dan asam-asam dapur**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

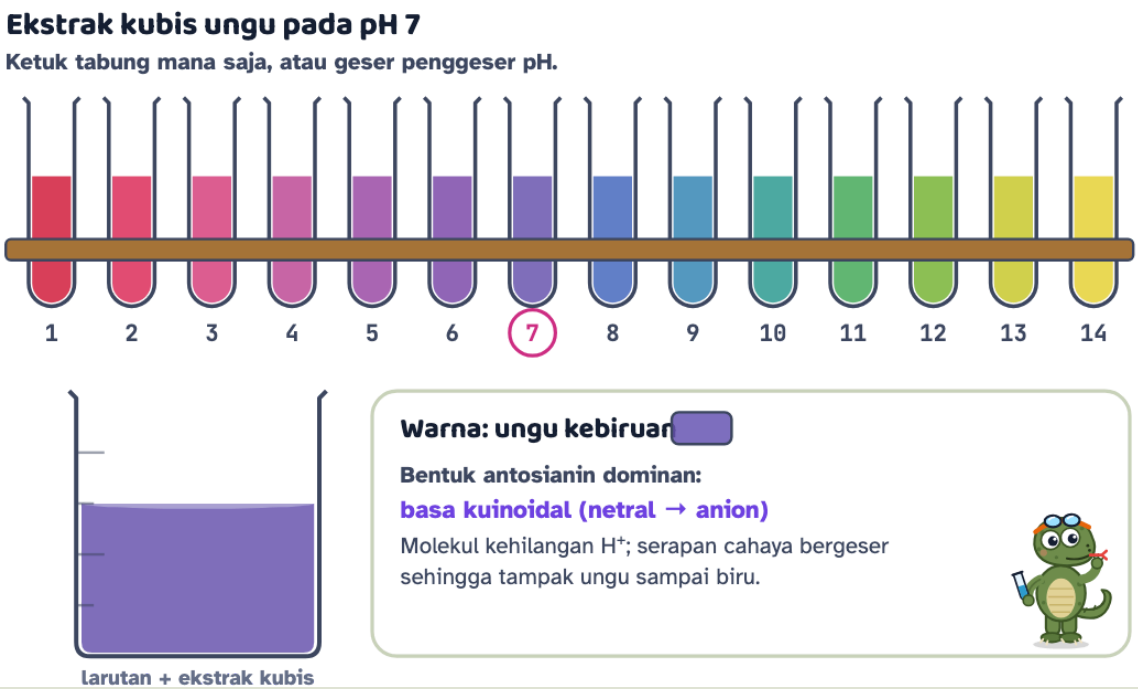
Kurkumin $\mathrm{C_{21}H_{20}O_6}$ Mr ≈ 368,39 PubChem ↗

Pigmen kuning kunyit; berubah merah dalam basa, sehingga kunyit menjadi indikator asam-basa alami.

Kurkumin ($C_{21}H_{20}O_6$) punya dua gugus –OH fenol dan sistem ikatan rangkap selang-seling yang panjang. Dalam basa, H^+ dari gugus –OH lepas, elektron tersebar lebih luas, dan warna yang diserap bergeser: kuning menjadi merah kecokelatan. Hitung gugus –COOH pada asam sitrat (jeruk nipis): ada berapa?

LAB MINI **Kubis Ungu Virtual: pelangi pH 1–14**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26



pH	warna	sifat	tebakan benar
7	ungu kebiruan	netral	0 dari 0

Mode **Jelajah**: geser pH atau ketuk tabung untuk melihat warna antosianin dan bentuk molekulnya. Mode **Tebak**: pilih sampel rumah tangga, lalu ketuk tabung pembanding yang warnanya paling mirip. Bisakah kamu menebak pH air sabun hanya dari warnanya?

ID **KIMIA NUSANTARA · LABORATORIUM DI DAPUR**

Indonesia kaya indikator alami. **Kunyit** (kurkumin) kuning di suasana asam dan netral, lalu merah kecokelatan di atas pH ±8. **Kubis ungu**, **bunga sepatu**, dan **kulit manggis** mengandung antosianin yang berganti warna merah → ungu → hijau → kuning. Minuman **bunga telang** yang biru berubah ungu kemerahan begitu diberi perasan jeruk nipis. Bahkan jamu *kunyit asam* tetap kuning-jingga karena asam jawa membuatnya bersuasana asam.

26.2 Tiga teori: Arrhenius, Brønsted–Lowry, dan Lewis

Mengapa semua asam berperilaku mirip? Jawabannya sebuah partikel super mungil: **ion hidrogen**, H^+. Atom H hanya punya satu proton dan satu elektron. Jika elektronnya lepas, yang tersisa hanyalah **sebuah proton telanjang**. Karena itu kimiawan sering menyebut H^+ sebagai "proton".

TEORI ARRHENIUS (1887)

Asam adalah zat yang dalam air menghasilkan ion $\mathrm{H^+}$. **Basa** adalah zat yang dalam air menghasilkan ion $\mathrm{OH^-}$.

$$\mathrm{HCl\,(aq) \longrightarrow H^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)} \qquad \mathrm{NaOH\,(aq) \longrightarrow Na^+\,(aq) + OH^-\,(aq)}$$

$\mathrm{H^+}$ TIDAK PERNAH SENDIRIAN

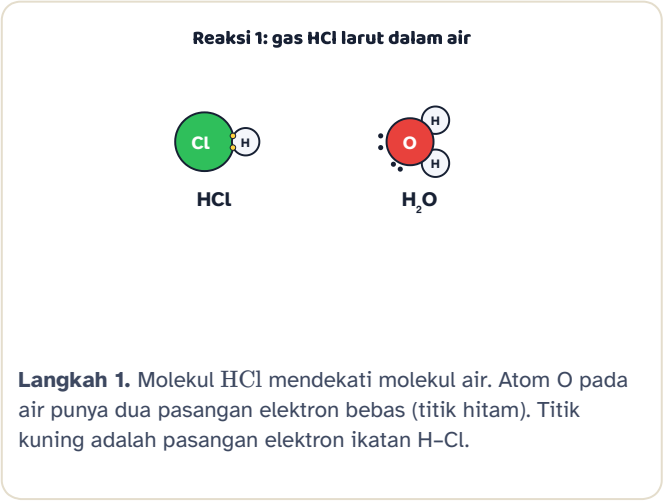
Proton telanjang terlalu kecil dan terlalu "lapar" elektron untuk berkeliaran sendiri. Di dalam air, ia langsung menempel pada pasangan elektron bebas atom O molekul air dan membentuk **ion hidronium**, $\mathrm{H_3O^+}$: $\mathrm{H^+ + H_2O \longrightarrow H_3O^+}$. Jadi $\mathrm{H^+\,(aq)}$ dan $\mathrm{H_3O^+\,(aq)}$ hanyalah dua cara menulis hal yang sama.

Teori Arrhenius punya kelemahan. Amonia, $\mathrm{NH_3}$, jelas bersifat basa (membirukan lakmus), padahal tidak punya gugus OH. Selain itu, gas HCl dan gas $\mathrm{NH_3}$ bereaksi membentuk asap putih $\mathrm{NH_4Cl}$ **tanpa air sama sekali**. Kita butuh definisi yang lebih luas.

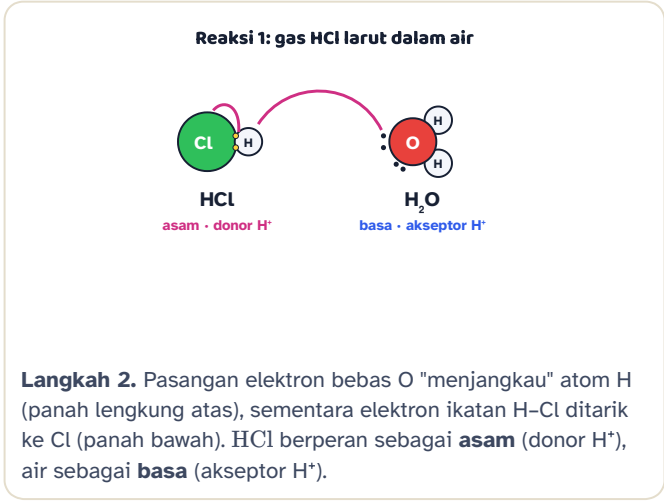
DEFINISI · TEORI BRØNSTED–LOWRY (1923)

Asam adalah **donor proton** (pemberi $\mathrm{H^+}$). **Basa** adalah **akseptor proton** (penerima $\mathrm{H^+}$). Setelah asam memberikan $\mathrm{H^+}$, sisanya menjadi **basa konjugat**. Setelah basa menerima $\mathrm{H^+}$, ia menjadi **asam konjugat**. Dua spesi yang hanya berbeda satu $\mathrm{H^+}$ disebut **pasangan asam-basa konjugat**.

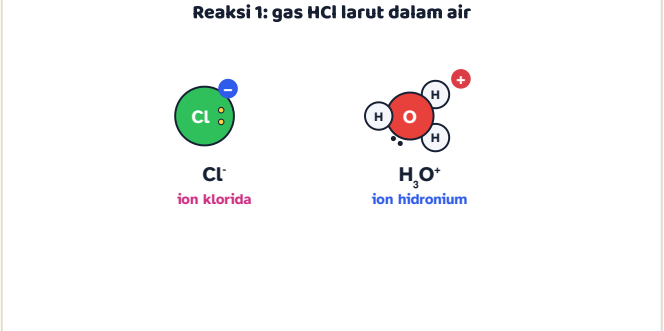
Ikuti perjalanan satu proton dalam animasi ini. Perhatikan panah lengkung: panah selalu berangkat dari **pasangan elektron** menuju tempat ikatan baru terbentuk.



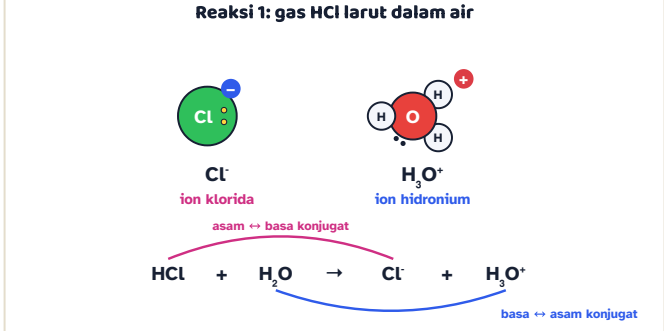
Langkah 1. Molekul HCl mendekati molekul air. Atom O pada air punya dua pasangan elektron bebas (titik hitam). Titik kuning adalah pasangan elektron ikatan H–Cl.



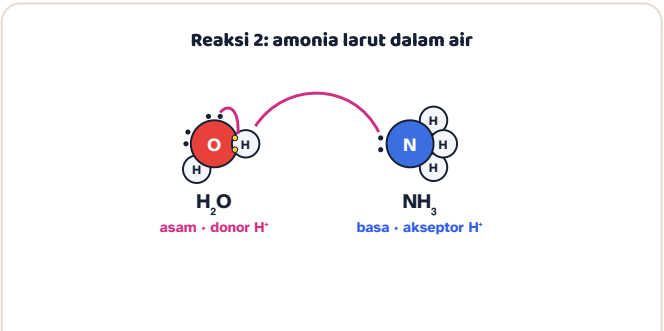
Langkah 2. Pasangan elektron bebas O "menjangkau" atom H (panah lengkung atas), sementara elektron ikatan H–Cl ditarik ke Cl (panah bawah). HCl berperan sebagai **asam** (donor $\mathrm{H^+}$), air sebagai **basa** (akseptor $\mathrm{H^+}$).



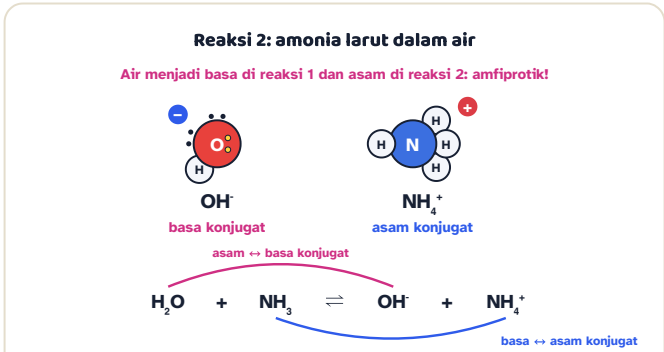
Langkah 3. Proton pindah! Yang berpindah hanya intinya, $\mathrm{H^+}$. Kedua elektron ikatan tertinggal pada Cl, sehingga terbentuk ion klorida $\mathrm{Cl^-}$ dan ion hidronium $\mathrm{H_3O^+}$.



Langkah 4. Pasangan konjugat: $\mathrm{HCl/Cl^-}$ dan $\mathrm{H_3O^+/H_2O}$. Setiap pasangan hanya berbeda **satu** $\mathrm{H^+}$.



Langkah 5. Sekarang air bertemu amonia. Pasangan elektron bebas N menarik satu H dari air. Kali ini air menjadi **asam**, amonia menjadi **basa**.



Langkah 6. Hasilnya $\mathrm{OH^-}$ dan $\mathrm{NH_4^+}$. Reaksinya setimbang ( ) karena amonia basa lemah. Air bisa memberi atau menerima proton: air bersifat **amfiprotik**.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Pasangan konjugat **bukan** asam dan basa yang saling bereaksi. Pada $\mathrm{HCl + H_2O \longrightarrow Cl^- + H_3O^+}$, pasangan $\mathrm{HCl/H_2O}$ **bukan** pasangan konjugat. Pasangan yang benar adalah $\mathrm{HCl/Cl^-}$ dan $\mathrm{H_3O^+/H_2O}$: rumusnya hampir sama, hanya berbeda satu $\mathrm{H^+}$.

Selain air, spesi seperti $\mathrm{HCO_3^-}$ (ion hidrogen karbonat dalam darah dan soda kue) dan $\mathrm{H_2PO_4^-}$ juga **amfiprotik**. Ion $\mathrm{HCO_3^-}$ dapat memberi $\mathrm{H^+}$ (menjadi $\mathrm{CO_3^{2-}}$) atau menerima $\mathrm{H^+}$ (menjadi $\mathrm{H_2CO_3}$). Sifat inilah yang nanti membuatnya menjadi "penjaga pH" darah.

CONTOH **Menemukan pasangan konjugat**

Tentukan asam, basa, dan kedua pasangan konjugat pada reaksi $\mathrm{HCO_3^- + OH^- \longrightarrow CO_3^{2-} + H_2O}$.

1. Lacak proton: $\mathrm{HCO_3^-}$ kehilangan satu H menjadi $\mathrm{CO_3^{2-}}$. Jadi $\mathrm{HCO_3^-}$ adalah **asam** (donor H^+).
2. $\mathrm{OH^-}$ menerima H menjadi $\mathrm{H_2O}$. Jadi $\mathrm{OH^-}$ adalah **basa** (akseptor H^+).
3. Pasangan konjugat: $\mathrm{HCO_3^-/CO_3^{2-}}$ dan $\mathrm{H_2O/OH^-}$.

Asam: $\mathrm{HCO_3^-}$; basa: $\mathrm{OH^-}$. Pasangan konjugat: $\mathrm{HCO_3^-/CO_3^{2-}}$ dan $\mathrm{H_2O/OH^-}$. Perhatikan: muatan juga ikut berubah satu satuan setiap kali satu H^+ berpindah.

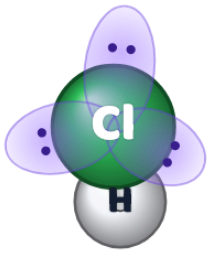
Pada tahun yang sama (1923), **Gilbert N. Lewis** memandang reaksi asam-basa dari sudut **elektron**, bukan proton. Ingat: basa Brønsted menerima H^+ dengan memakai pasangan elektron bebasnya. Lewis bertanya, "Bagaimana kalau yang menerima pasangan elektron itu bukan H^+?"

DEFINISI · TEORI LEWIS

Asam Lewis adalah **akseptor pasangan elektron**; **basa Lewis** adalah **donor pasangan elektron**. Keduanya membentuk ikatan kovalen koordinasi. Contoh: $\mathrm{BF_3 + NH_3 \longrightarrow F_3B{-}NH_3}$. Atom B pada $\mathrm{BF_3}$ hanya dikelilingi 6 elektron, sehingga "haus" pasangan elektron dari N.

Teori	Asam	Basa	Contoh khas	Cakupan
Arrhenius	menghasilkan H^+ dalam air	menghasilkan OH^- dalam air	HCl, NaOH	hanya larutan dalam air
Brønsted–Lowry	donor H^+	akseptor H^+	$\mathrm{NH_3 + H_2O}$, $\mathrm{HCl + NH_3}$ (gas)	semua reaksi pindah proton
Lewis	akseptor pasangan elektron	donor pasangan elektron	$\mathrm{BF_3 + NH_3}$, $\mathrm{Cu^{2+} + 4\,NH_3}$	paling luas, termasuk ion logam

MOLEKUL 3D **Para pemain teori asam-basa**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Hidrogen klorida ClH

Mr ≈ 36,46 | PubChem ↗

Larutannya adalah asam klorida; asam lambung kita mengandung HCl.

Nyalakan pasangan elektron bebas. Bandingkan $\mathrm{NH_3}$ (satu pasangan bebas, sudut ±107°) dengan $\mathrm{NH_4^+}$ (tanpa pasangan bebas, 109,5°): ke mana perginya pasangan bebas itu? Lalu lihat $\mathrm{BF_3}$ yang datar. Di mana tempat kosong yang menunggu pasangan elektron?

TAMU DARI MASA LALU

Svante Arrhenius dari Swedia mengajukan gagasan bahwa zat elektrolit pecah menjadi ion di dalam air dalam disertasinya (1884). Para pengujinya meragukannya dan memberinya nilai pas-pasan, tetapi gagasan itu kemudian mengantarnya meraih Nobel Kimia 1903. Pada 1923, **Johannes Brønsted** (Denmark) dan **Thomas Lowry** (Inggris) secara terpisah merumuskan teori donor-akseptor proton, dan pada tahun yang sama **G. N. Lewis** (Amerika Serikat) memperluasnya menjadi teori pasangan elektron.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ION LOGAM YANG BERSIFAT ASAM

Mengapa larutan tawas atau besi(III) klorida terasa asam, padahal tidak mengandung atom H yang "asam"? Ion logam bermuatan tinggi adalah asam Lewis: ia diselimuti molekul air melalui ikatan koordinasi. Muatan +3 yang kecil dan padat menarik elektron ikatan O–H, sehingga salah satu $\mathrm{H^+}$ mudah lepas:

$$[\mathrm{Al(H_2O)_6}]^{3+} + \mathrm{H_2O} \rightleftharpoons [\mathrm{Al(H_2O)_5(OH)}]^{2+} + \mathrm{H_3O^+} \qquad \mathrm{p}K_a \approx 5$$

Untuk $[\mathrm{Fe(H_2O)_6}]^{3+}$, $\mathrm{p}K_a \approx 2{,}2$: seasam asam fosfat! Itu sebabnya pengolahan air yang memakai tawas (Bab 25) dapat menurunkan pH, sehingga instalasi air sering menambahkan kapur untuk mengembalikannya.

26.3 pH, pOH, dan tetapan air

Air murni ternyata tidak "diam". Setiap saat, segelintir molekul air saling melempar proton: satu molekul berperan sebagai asam, yang lain sebagai basa. Peristiwa ini disebut **swaionisasi air** (autoionisasi):

$$\mathrm{H_2O\,(l) + H_2O\,(l) \rightleftharpoons H_3O^+\,(aq) + OH^-\,(aq)}$$

ATURAN · TETAPAN KESETIMBANGAN AIR, K_W

Pada 25 °C, hasil kali konsentrasi ion hidronium dan ion hidroksida dalam larutan berair **selalu tetap**:

$$K_w = [\mathrm{H_3O^+}][\mathrm{OH^-}] = 1{,}0 \times 10^{-14}$$

Dalam air murni, $[\mathrm{H_3O^+}] = [\mathrm{OH^-}] = 1{,}0 \times 10^{-7}$ M. Larutan **asam** bila $[\mathrm{H_3O^+}] > [\mathrm{OH^-}]$, **basa** bila $[\mathrm{H_3O^+}] < [\mathrm{OH^-}]$, dan **netral** bila keduanya sama.

FAKTA UNIK DARI KIMO

Satu liter air berisi ±55,5 mol molekul air, tetapi hanya $1{,}0 \times 10^{-7}$ mol yang terionisasi. Artinya kira-kira **2 dari setiap 1 miliar** molekul air sedang menjadi ion. Sedikit sekali, tetapi cukup untuk membuat air murni sedikit menghantarkan listrik.

Konsentrasi $\mathrm{H^+}$ dalam larutan sehari-hari berkisar dari sekitar 1 M sampai 10^{-14} M. Menulis angka sekecil itu merepotkan, jadi kimiawan memakai logaritma:

DEFINISI · PH DAN POH

$$\mathrm{pH} = -\log[\mathrm{H^+}] \qquad \mathrm{pOH} = -\log[\mathrm{OH^-}] \qquad \mathrm{pH} + \mathrm{pOH} = \mathrm{p}K_w = 14{,}00\ (25\ ^\circ\mathrm{C})$$

Jadi $[\mathrm{H^+}] = 10^{-\mathrm{pH}}$. Makin kecil pH, makin asam larutannya. Larutan netral pada 25 °C mempunyai pH 7.

Tebak Dulu!

Air jeruk nipis ber-pH 2, sedangkan air gambut ber-pH 4. Berapa kali lebih besar $[\mathrm{H}^+]$ dalam air jeruk nipis?

2 kali, karena 4 dibagi 2 sama dengan 2.

Air gambut yang lebih asam, karena angka pH-nya lebih besar.

100 kali.

20 kali.

Jawabannya: 100 kali. pH adalah skala logaritma: setiap turun 1 angka pH, $[\mathrm{H}^+]$ naik 10 kali. Dari pH 4 ke pH 2 ada dua langkah, jadi $10 \times 10 = 100$ kali. Secara langsung: $10^{-2} \div 10^{-4} = 10^{2}$.

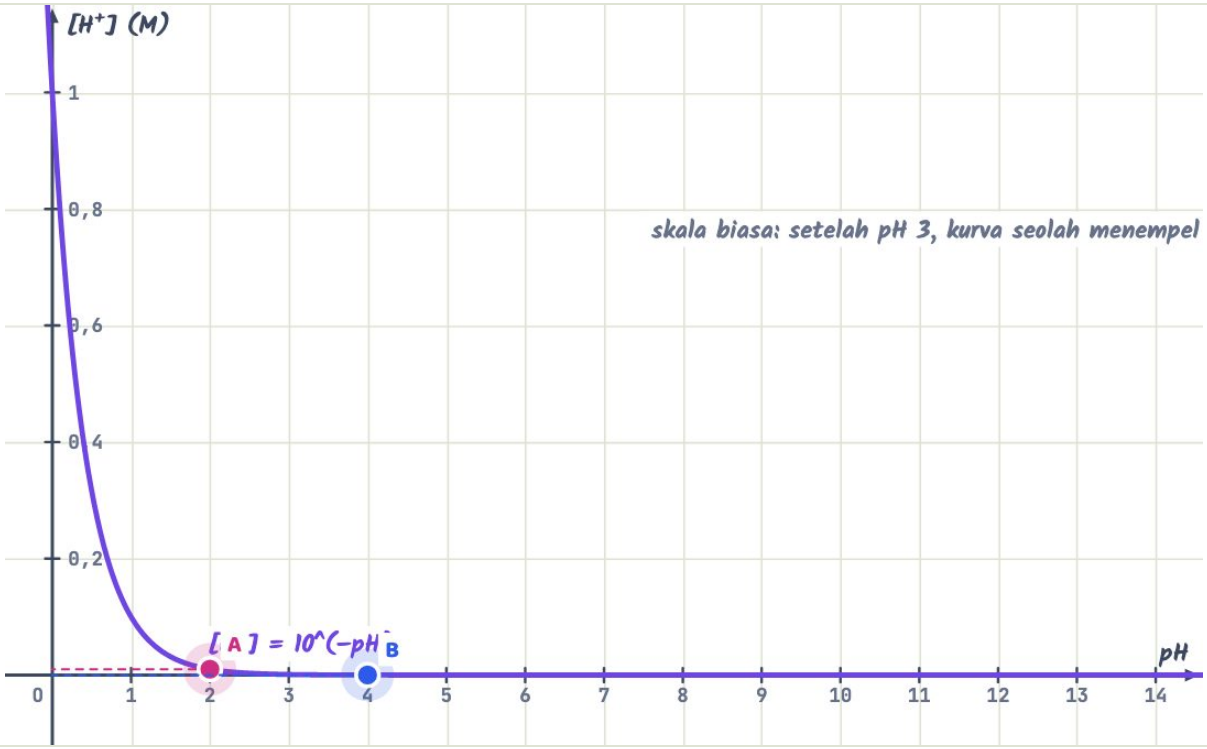
GRAFIK HIDUP

Tangga sepuluh kali: [H⁺] terhadap pH

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26

$$[\mathrm{H^+}] = 10^{-\mathrm{pH}}$$

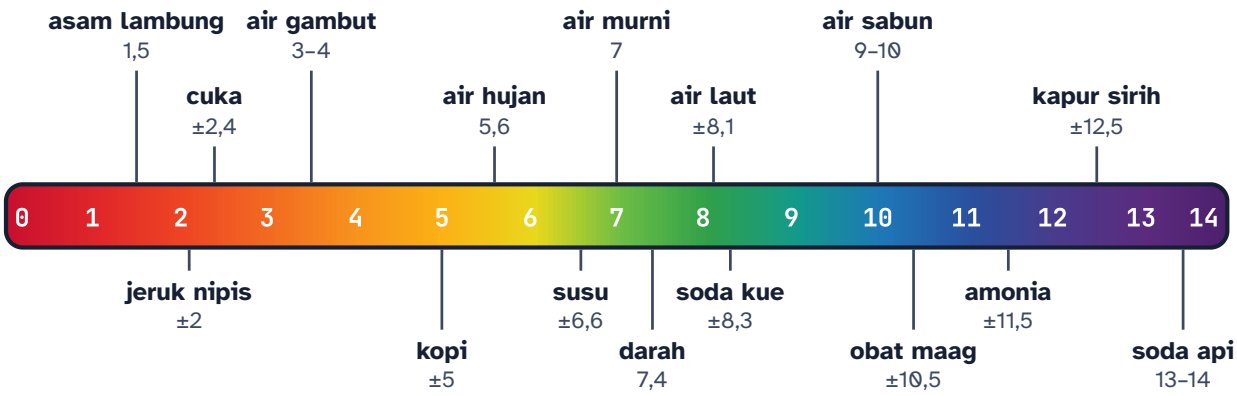
$$\mathrm{pH}_A = 2:\ [\mathrm{H^+}]_A = 0{,}01\ \mathrm{M} \qquad \mathrm{pH}_B = 4:\ [\mathrm{H^+}]_B = 1 \times 10^{-4}\ \mathrm{M}$$



selisih 2 pH = 100 kali lipat

[H⁺] di A	[H⁺] di B	[H⁺] A ÷ [H⁺] B
0,01 M	1 × 10⁻⁴ M	100 kali

Seret titik A dan B. Pada skala biasa, perhatikan bahwa larutan ber-pH 4 dan ber-pH 12 sama-sama tampak "nol". Ganti ke skala logaritma (geser penggeser ke 1): sekarang setiap langkah 1 pH berjarak sama, padahal artinya 10 kali lipat. Itulah alasan Sørensen menciptakan pH.



Pelangi pH di sekitar kita (nilai kira-kira pada 25 °C). Darah dijaga ketat di pH 7,35–7,45; air hujan normal sedikit asam karena melarutkan CO_2 dari udara.

RUMUS HIDUP **pH + pOH = 14**

$$\mathrm{pH} = 14 - \mathrm{pOH} = 14 + \log\left[\mathrm{OH}^-\right]$$

H^+ dan OH^- seperti dua ujung jungkat-jungkit: hasil kali keduanya selalu 10^{-14} pada 25 °C. Kalau OH^- naik, H^+ turun, dan pH naik.

$[OH^-]$ Konsentrasi ion hidroksida `mol/L`

pH pH larutan

PH LARUTAN

11

basa: OH^- lebih banyak daripada H^+

pOH = **3**, pH = **11**, dan [H^+] = Kw ÷ [OH^-] = **1 × 10^{-11}** M.

Cek satuan: pH + pOH = pKw = 14,00 (25 °C)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PH-POH

⚠ **AWAS JEBAKAN**

pH 7 berarti netral **hanya pada 25 °C**. Netral artinya $[H^+] = [OH^-]$. Swaionisasi air bersifat endoterm, jadi K_w membesar bila suhu naik. Pada suhu tubuh (37 °C), air murni ber-pH 6,8, dan pada 100 °C ber-pH 6,1, tetapi tetap **netral**.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

K_W BERGANTUNG PADA SUHU

Suhu	K_w	$\mathrm{p}K_w$	pH air murni (netral)
0 °C	$1{,}1 \times 10^{-15}$	14,94	7,47
25 °C	$1{,}0 \times 10^{-14}$	14,00	7,00
37 °C	$2{,}4 \times 10^{-14}$	13,62	6,81
50 °C	$5{,}5 \times 10^{-14}$	13,26	6,63
100 °C	$5{,}1 \times 10^{-13}$	12,29	6,15

Karena K_w naik ketika dipanaskan, kesetimbangan $2\,\mathrm{H_2O} \rightleftharpoons \mathrm{H_3O^+} + \mathrm{OH^-}$ bergeser ke kanan pada suhu tinggi. Menurut asas Le Chatelier (Bab 22), reaksi ke kanan itu **endoterm** ($\Delta H \approx +56$ kJ/mol, kebalikan dari kalor netralisasi).

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1909, **Søren Sørensen**, kepala bagian kimia Laboratorium Carlsberg di Kopenhagen, sedang meneliti enzim dan protein yang sangat peka terhadap keasaman. Ia lelah menulis angka seperti 0,0000001, lalu mengusulkan "eksponen ion hidrogen" yang ditulis p_{H}. Arti huruf "p" masih diperdebatkan; banyak buku menyebutnya "potensi" atau "pangkat" hidrogen.

TRIK KAK TIRTA · PH TANPA KALKULATOR

Tulis $[\mathrm{H^+}]$ dalam bentuk $k \times 10^{-n}$. Maka $\mathrm{pH} = n - \log k$. Hafalkan tiga angka sakti: $\log 2 \approx 0{,}30$, $\log 3 \approx 0{,}48$, $\log 5 \approx 0{,}70$. Contoh: $[\mathrm{H^+}] = 2 \times 10^{-3}$ → pH $= 3 - 0{,}30 = 2{,}70$. Cek kewajaran: 2×10^{-3} sedikit lebih besar daripada 10^{-3}, jadi pH-nya sedikit di bawah 3. ✔

26.4 Kuat atau lemah? Ka, Kb, dan derajat ionisasi

Tebak Dulu!

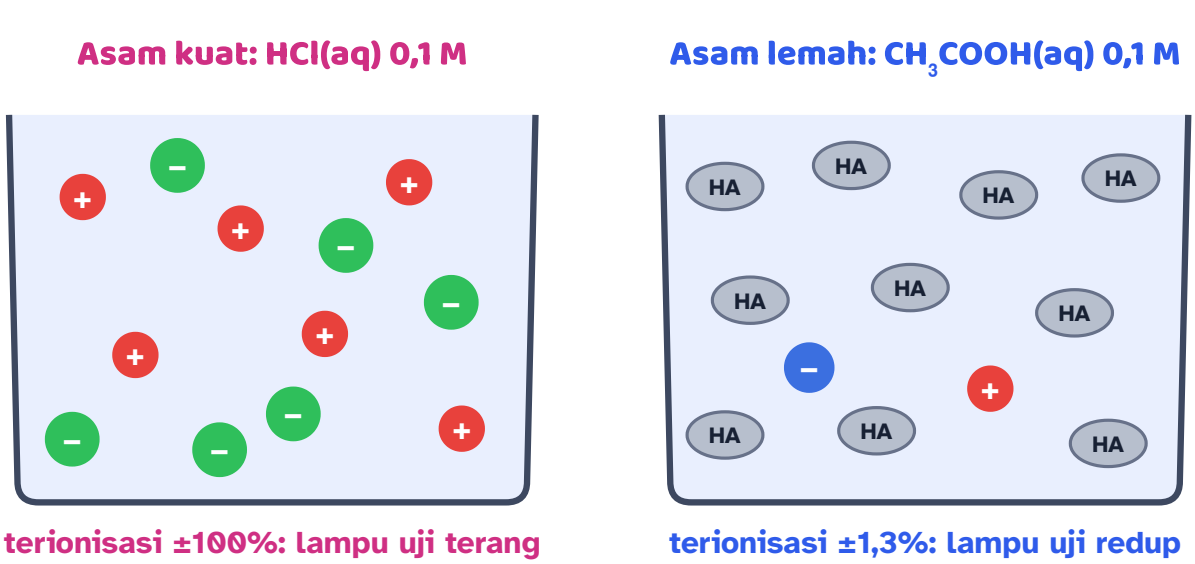
Cuka dapur 5% (asam asetat ±0,83 M, asam lemah) dibandingkan dengan asam klorida 0,001 M (asam kuat). Mana yang pH-nya lebih rendah?

- Asam klorida, karena asam kuat selalu lebih asam daripada asam lemah.
- Cuka dapur, karena jauh lebih pekat.
- Sama saja, karena keduanya asam.
- Cuka dapur pH-nya 7, karena cuka aman dimakan.

Jawabannya: cuka dapur. Asam klorida 0,001 M terionisasi sempurna, tetapi $[\mathrm{H}^+]$-nya hanya 0,001 M (pH 3). Cuka hanya melepas ±0,5% molekulnya, tetapi molekulnya 830 kali lebih banyak, sehingga $[\mathrm{H}^+] \approx 0{,}0039$ M (pH ±2,4). "Kuat" dan "pekat" adalah dua hal yang berbeda!

Asam disebut **asam kuat** bila **terionisasi sempurna** di dalam air: hampir tidak ada molekul utuh yang tersisa. Asam disebut **asam lemah** bila hanya **sebagian kecil** molekulnya terionisasi, sehingga terjadi kesetimbangan (perhatikan panah dua arah):

$$\mathrm{HCl\,(aq)} \longrightarrow \mathrm{H^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)} \qquad \mathrm{CH_3COOH}$$



Merah ⊕ = H_3O^+, hijau ⊖ = Cl^-, biru ⊖ = CH_3COO^-, abu-abu "HA" = molekul CH_3COOH yang utuh. Gambar tidak berskala: sebenarnya hanya ±1 dari 75 molekul asam asetat yang terionisasi.

Asam kuat yang perlu kamu kenal: HCl, HBr, HI, HNO_3, H_2SO_4 (untuk H^+ pertama), dan $HClO_4$. Hampir semua asam lain, terutama asam organik bergugus $-COOH$, H_2CO_3, HF, dan HCN, adalah **asam lemah**. **Basa kuat**: hidroksida golongan 1 ($LiOH$, $NaOH$, KOH) serta $Ca(OH)_2$, $Sr(OH)_2$, dan $Ba(OH)_2$ (bagian yang larut terionisasi sempurna). **Basa lemah**: amonia dan amina.

ATURAN · TETAPAN IONISASI DAN DERAJAT IONISASI

Untuk asam lemah $HA \rightleftharpoons H^+ + A^-$ dan basa lemah $B + H_2O \rightleftharpoons BH^+ + OH^-$:

$$K_a = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]} \qquad K_b = \frac{[BH^+][OH^-]}{[B]} \qquad \alpha = \frac{\text{mol zat yang terionisasi}}{\text{mol zat mula-mula}} \approx \sqrt{\frac{K_a}{C_a}}$$

Makin besar K_a (makin kecil $pK_a = -\log K_a$), makin kuat asamnya. Derajat ionisasi α asam kuat = 1 (100%); asam lemah $0 < \alpha < 1$.

Zat	Rumus	K_a atau K_b (25 °C)	pK	Ada di
Asam klorida	HCl	sangat besar (kuat)	≈ −6	cairan lambung
Asam fosfat (H^+ pertama)	H_3PO_4	$7{,}1 \times 10^{-3}$	2,15	minuman bersoda, pupuk
Asam sitrat (H^+ pertama)	$C_6H_8O_7$	$7{,}4 \times 10^{-4}$	3,13	jeruk nipis, belimbing wuluh
Asam format	$HCOOH$	$1{,}8 \times 10^{-4}$	3,75	sengatan semut rangrang

Asam laktat	$CH_3CH(OH)COOH$	$1{,}4 \times 10^{-4}$	3,86	yoghurt, acar, otot yang lelah
Asam asetat	CH_3COOH	$1{,}8 \times 10^{-5}$	4,74	cuka dapur, cuka aren
Asam karbonat (H^+ pertama)	H_2CO_3	$4{,}3 \times 10^{-7}$	6,37	air hujan, minuman bersoda
Asam sianida	HCN	$4{,}9 \times 10^{-10}$	9,31	terlepas dari singkong pahit mentah
Amonia (basa)	NH_3	$K_b = 1{,}8 \times 10^{-5}$	pK_b 4,74	pembersih kaca, pupuk
Metilamina (basa)	CH_3NH_2	$K_b = 4{,}4 \times 10^{-4}$	pK_b 3,36	bau amis ikan (golongan amina)

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Asam kuat **tidak sama** dengan asam pekat. **Kuat/lemah** menyatakan berapa bagian molekul yang terionisasi; **pekat/encer** menyatakan berapa banyak zat per liter larutan. Keempat kombinasinya ada:

	Pekat	Encer
Kuat	HCl 37% di botol laboratorium (sangat berbahaya)	HCl 0,001 M (pH 3)
Lemah	cuka biang 25% (tetap korosif bagi kulit dan mata!)	cuka 0,01 M (pH ±3,4)

MITOS

"Asam kuat pasti lebih berbahaya daripada asam lemah."

FAKTA

Bahaya juga bergantung pada konsentrasi. Cuka biang 25% (asam lemah) dapat melukai kulit dan mata, sedangkan HCl 0,0001 M (asam kuat) hampir tak berbeda dari air hujan asam (pH 4).

MITOS

"Basa itu aman karena bukan asam."

FAKTA

Basa kuat seperti soda api justru sangat berbahaya bagi mata: ia memecah lemak dan protein jaringan. Tumpahan basa di mata harus dibilas air mengalir selama 15 menit dan segera dibawa ke dokter.

MITOS

"Semua garam bersifat netral."

FAKTA

Larutan soda kue ($\mathrm{NaHCO_3}$) sedikit basa (pH ±8,3), sedangkan larutan amonium klorida sedikit asam. Rahasianya adalah hidrolisis garam, yang akan kamu pelajari di Bab 27.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUBUNGAN K_A, K_B, DAN HUKUM PENGENCERAN OSTWALD

Untuk satu pasangan konjugat, misalnya $\mathrm{CH_3COOH/CH_3COO^-}$, hasil kali tetapannya sama dengan K_w:

$$K_a \times K_b = K_w \qquad \Longleftrightarrow \qquad \mathrm{p}K_a + \mathrm{p}K_b = 14{,}00\ (25\ ^\circ\mathrm{C})$$

Jadi makin kuat suatu asam, makin lemah basa konjugatnya. $\mathrm{Cl^-}$ dari asam kuat HCl praktis tidak punya sifat basa, sedangkan $\mathrm{CH_3COO^-}$ adalah basa lemah dengan $K_b = 10^{-14}/1{,}8 \times 10^{-5} = 5{,}6 \times 10^{-10}$.

Dari $K_a = \dfrac{C\alpha^2}{1-\alpha}$, Wilhelm Ostwald menyimpulkan bahwa α **membesar** bila larutan diencerkan. Asam asetat 0,1 M terionisasi 1,3%, tetapi pada 0,001 M menjadi ±12,5%. Encerkan terus, dan asam lemah pun hampir terionisasi sempurna!

26.5 Menghitung pH asam dan basa

Kini kita gabungkan semuanya. Kunci pertama: tentukan dulu jenis zatnya. Asam/basa kuat dihitung langsung dari konsentrasinya; asam/basa lemah membutuhkan K_a atau K_b.

Jenis larutan	Rumus konsentrasi ion	Lalu
Asam kuat, valensi a	$[\mathrm{H^+}] = a \cdot C_a$	$\mathrm{pH} = -\log[\mathrm{H^+}]$
Basa kuat, valensi b	$[\mathrm{OH^-}] = b \cdot C_b$	$\mathrm{pOH} = -\log[\mathrm{OH^-}]$, $\mathrm{pH} = 14 - \mathrm{pOH}$
Asam lemah	$[\mathrm{H^+}] \approx \sqrt{K_a \cdot C_a}$	$\mathrm{pH} = -\log[\mathrm{H^+}]$
Basa lemah	$[\mathrm{OH^-}] \approx \sqrt{K_b \cdot C_b}$	$\mathrm{pH} = 14 - \mathrm{pOH}$

RUMUS HIDUP

pH asam kuat

$$\mathrm{pH} = -\log\left(a \times C_a\right)$$

Asam kuat melepas semua H⁺-nya. Kalikan konsentrasi asam dengan jumlah H⁺ per molekul, lalu ambil minus logaritmanya.

C_a Konsentrasi asam `mol/L` | a Valensi asam (H⁺ per molekul) | pH pH



kira-kira seasam air jeruk nipis | pH tepat 2

[H⁺] = **0,01** M, jadi pH = **2**. Larutan ini **100.000** kali lebih asam daripada air murni.

Cek satuan: pH tak bersatuan; yang di-log adalah angka [H⁺] dalam mol/L

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PH-ASAM-KUAT

CONTOH

pH cairan lambung

Cairan lambung mengandung HCl kira-kira 0,03 M. Berapa pH-nya?

1. HCl asam kuat bervalensi 1, jadi $[\mathrm{H}^+] = 1 \times 0{,}03 = 3 \times 10^{-2}$ M.
2. $\mathrm{pH} = -\log(3 \times 10^{-2}) = 2 - \log 3 = 2 - 0{,}48 = 1{,}52$.

pH ≈ 1,5. Sangat asam, cukup untuk membunuh sebagian besar kuman dalam makanan. Dinding lambung melindungi dirinya dengan lapisan lendir.

RUMUS HIDUP

pH asam lemah

$$[\mathrm{H}^+] \approx \sqrt{K_a \cdot C_a}$$

Asam lemah hanya melepas sebagian kecil H⁺. Konsentrasi H⁺ kira-kira akar dari Ka dikali konsentrasi asam.

- K_a Tetapan ionisasi asam
- C_a Konsentrasi asam `mol/L`
- pH pH (rumus akar)

PH (RUMUS AKAR)

2,87

Ka asam asetat (cuka)

[H⁺] ≈ **0,001** M, pH ≈ **2,87**. Hitungan persis (rumus kuadrat): pH = **2,875**, dengan derajat ionisasi α = **1,333**%.

Cek satuan: √(Ka × mol/L) → [H⁺] dalam mol/L (Ka dipakai tanpa satuan)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PH-ASAM-LEMAH

KERJAKAN BERSAMA

pH cuka encer

Hitung pH dan derajat ionisasi larutan asam asetat 0,10 M ($K_a = 1{,}8 \times 10^{-5}$). Bandingkan dengan HCl 0,10 M.

1. Asam lemah: $[\mathrm{H}^+] \approx \sqrt{K_a C} = \sqrt{1{,}8 \times 10^{-5} \times 0{,}10} = \sqrt{1{,}8 \times 10^{-6}} = 1{,}34 \times 10^{-3}$ M.
2. $\mathrm{pH} = -\log(1{,}34 \times 10^{-3}) = 3 - \log 1{,}34 = 3 - 0{,}13 = 2{,}87$.
3. $\alpha = \dfrac{1{,}34 \times 10^{-3}}{0{,}10} = 0{,}0134 = 1{,}34\%$. Karena $\alpha < 5\%$, pendekatan akar dapat dipercaya.
4. HCl 0,10 M: $[\mathrm{H}^+] = 0{,}10$ M, pH = 1,00.

Asam asetat 0,10 M: pH 2,87, α = 1,34%. Pada konsentrasi sama, HCl ber-pH 1,00: $[\mathrm{H}^+]$-nya ±75 kali lebih besar.

RUMUS HIDUP

pH basa lemah

$$[\mathrm{OH^-}] \approx \sqrt{K_b \cdot C_b}, \qquad \mathrm{pH} = 14 + \log[\mathrm{OH^-}]$$

Basa lemah hanya menarik sedikit H⁺ dari air. Hitung dulu OH⁻ dengan akar Kb kali konsentrasi, lalu ubah ke pH lewat pOH.

- K_b Tetapan ionisasi basa
- C_b Konsentrasi basa `mol/L`
- pH pH

PH

11,13

Kb amonia

basa cukup kuat: jauhkan dari mata

[OH⁻] ≈ **0,001** M, pOH ≈ **2,872**, jadi pH ≈ **11,13**. Hanya **1,342**% molekul basa yang menarik H⁺.

Cek satuan: pH = 14 − pOH (25 °C)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PH-BASA-LEMAH

KERJAKAN BERSAMA

Air kapur sirih

Air kapur sirih jenuh kira-kira mengandung 0,020 M $\mathrm{Ca(OH)_2}$ yang larut. Hitung pH-nya pada 25 °C.

1. $\mathrm{Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2\,OH^-}$: basa kuat bervalensi 2, jadi $[\mathrm{OH^-}] = 2 \times 0{,}020 = 0{,}040$ M.
2. $\mathrm{pOH} = -\log 0{,}040 = 2 - \log 4 = 2 - 0{,}60 = 1{,}40.$
3. $\mathrm{pH} = 14 - 1{,}40 = 12{,}60.$

pH ≈ 12,6. Itulah sebabnya kunyit langsung merah di air kapur sirih, dan mengapa kapur sirih tidak boleh terkena mata.

⏱ ADU CEPAT **Adu Cepat: pH asam kuat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Bila $[H^+] = k \times 10^{-n}$, maka pH = n − log k. Ingat log 2 ≈ 0,30; log 4 ≈ 0,60; log 5 ≈ 0,70.

⏱ ADU CEPAT **Adu Cepat: pH basa kuat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Hitung pOH dulu: pOH = n − log k. Lalu pH = 14 − pOH.

Apa yang terjadi bila asam terus diencerkan? Grafik berikut membandingkan asam kuat dan asam lemah dari 1 M sampai 10^{-7} M.

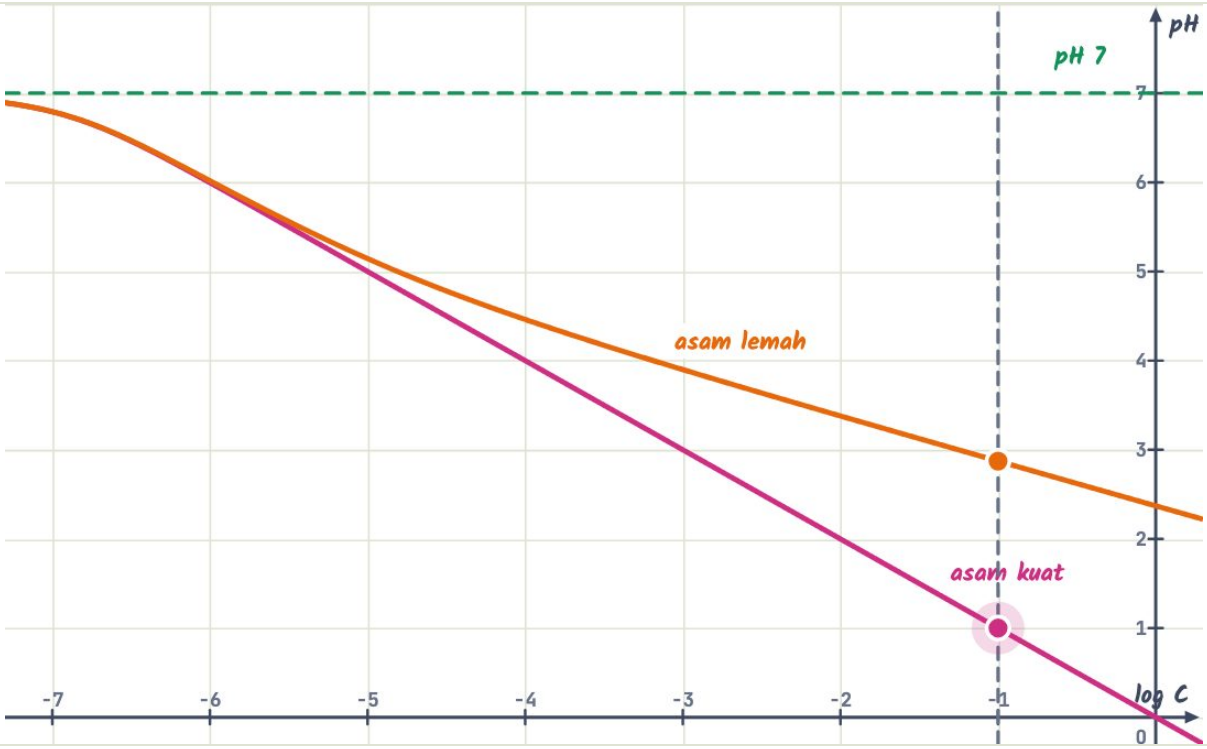
GRAFIK HIDUP

Encerkan terus: asam kuat vs asam lemah

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26

$$\mathrm{pH} = f(\log C)$$

$$C = 0{,}1\ \mathrm{M}: \quad \mathrm{pH}_{\text{kuat}} = 1, \quad \mathrm{pH}_{\text{lemah}} = 2{,}87$$



encerkan 10× → pH asam kuat naik 1, asam lemah hanya ±0,5

pKa asam asetat

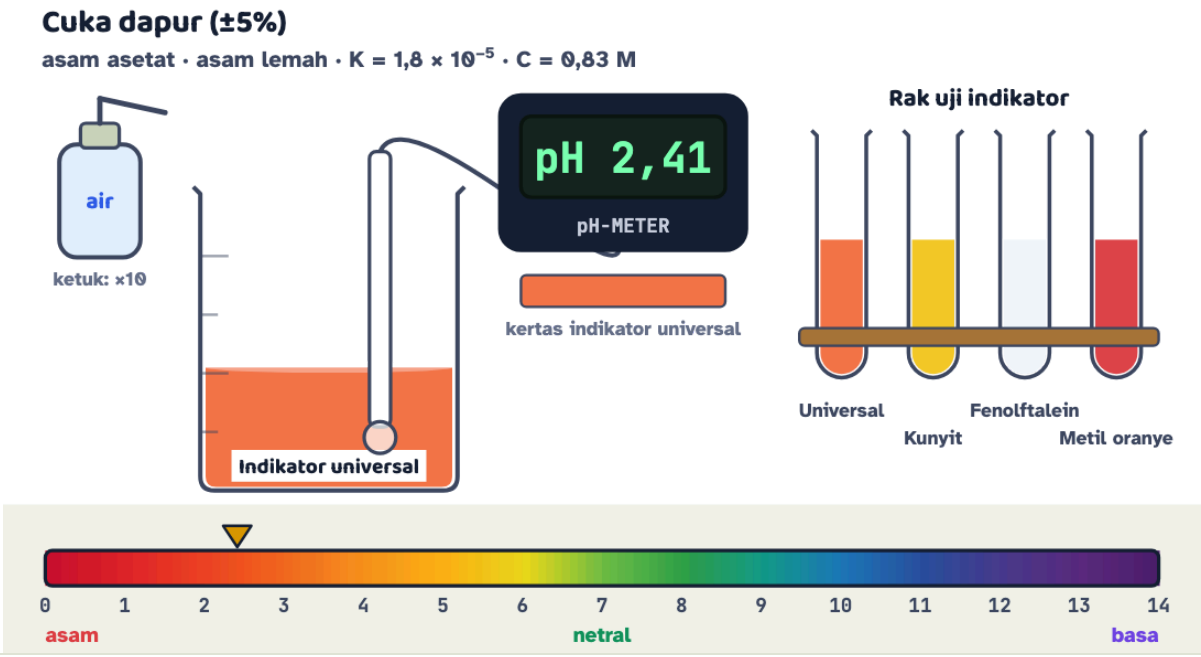
C	pH asam kuat	pH asam lemah	α asam lemah
0,1 M	1	2,87	1,3 %

Seret titik merah muda ke kiri (makin encer). Kemiringan garis asam kuat −1, sedangkan asam lemah hanya −½ (selama α kecil). Lalu ubah pKa: asam dengan pKa 2 nyaris sekuat HCl saat encer, sedangkan asam dengan pKa 9 hampir tidak mengubah pH air.

LAB MINI

Pengukur pH Dapur: pilih, encerkan, amati warnanya

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26



konsentrasi	[H⁺] (M)	pH	pOH	terionisasi
0,83 M	3,86 × 10⁻³	2,41	11,59	0,46%

sifat: asam (asam lemah)

Pilih larutan rumah tangga, lalu ketuk botol semprot (atau tombol 💧) untuk mengencerkannya 10 kali. Perhatikan angka pH-meter, warna kertas indikator universal, dan rak tabung indikator. Coba: mengapa cuka yang diencerkan sejuta kali tetap tidak menjadi basa? Kapan kunyit mulai memerah?

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Mengencerkan asam **tidak pernah** membuat pH-nya melewati 7. HCl 10^{-8} M tidak ber-pH 8! Pada larutan sangat encer, ion H^+ dari air sendiri (10^{-7} M) tidak boleh diabaikan, sehingga pH-nya ±6,98: tetap sedikit asam.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KAPAN RUMUS AKAR BOLEH DIPAKAI?

Rumus $[\mathrm{H^+}] = \sqrt{K_a C}$ berasal dari $K_a = \dfrac{x^2}{C - x}$ dengan anggapan $C - x \approx C$. Anggapan ini aman bila $\alpha < 5\%$, kira-kira saat $C/K_a > 400$. Bila tidak, selesaikan persamaan kuadratnya:

$$x^2 + K_a x - K_a C = 0 \quad \Rightarrow \quad x = [\mathrm{H^+}] = \frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4K_a C}}{2}$$

Untuk asam kuat yang **sangat encer** ($C \lesssim 10^{-6}$ M), gunakan neraca muatan $[\mathrm{H^+}] = C + [\mathrm{OH^-}] = C + K_w/[\mathrm{H^+}]$, sehingga

$$[\mathrm{H^+}] = \frac{C + \sqrt{C^2 + 4K_w}}{2}$$

Contoh: HCl $1{,}0 \times 10^{-7}$ M memberi $[\mathrm{H^+}] = 1{,}62 \times 10^{-7}$ M, pH 6,79, bukan 7,00.

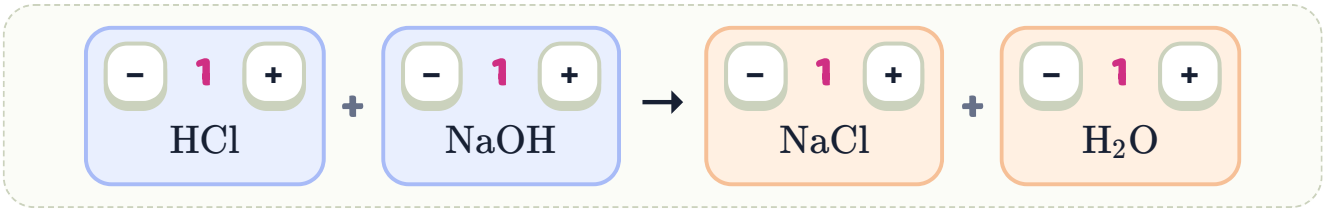
26.6 Netralisasi dan pembuatan garam

Ketika asam bertemu basa, $\mathrm{H^+}$ dan $\mathrm{OH^-}$ bergabung membentuk air. Reaksi ini disebut **netralisasi**. Ion-ion lain (misalnya $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$) hanya "menonton" sebagai **ion penonton**, lalu menjadi **garam** bila airnya diuapkan.

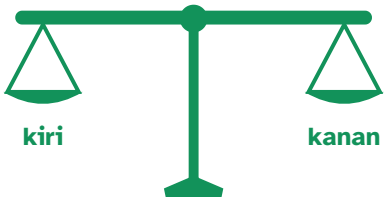
$$\underbrace{\mathrm{HCl\,(aq) + NaOH\,(aq) \longrightarrow NaCl\,(aq) + H_2O\,(l)}}_{\text{persamaan lengkap}} \qquad \underbrace{\mathrm{H}}$$

Netralisasi asam kuat oleh basa kuat selalu melepas kalor sekitar **57 kJ per mol air** yang terbentuk, apa pun asam dan basanya, karena reaksi intinya sama: $\mathrm{H^+ + OH^- \longrightarrow H_2O}$. Coba setarakan beberapa reaksi netralisasi di bawah ini, termasuk reaksi obat maag dan pengapuran.

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi netralisasi**



Unsur	Kiri	Kanan	
H	2 ○○	2 ○○	✓
Cl	1 ●	1 ●	✓
Na	1 ●	1 ●	✓
O	1 ●	1 ●	✓



✅ **Setara!** $\mathrm{HCl + NaOH \longrightarrow NaCl + H_2O}$

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 8

✓ pernah kamu setarakan

Petunjuk: hitung dulu jumlah H^+ dari asam dan OH^- dari basa. Jumlah keduanya harus sama, dan jumlah H_2O yang terbentuk sama dengan jumlah H^+ yang dinetralkan. Reaksi ke-4 adalah obat maag menetralkan asam lambung; reaksi ke-7 adalah kapur menetralkan tanah masam.

Asam bereaksi dengan…	Hasil	Contoh setara
basa (hidroksida)	garam + air	$\mathrm{H_2SO_4 + 2\,NaOH \longrightarrow Na_2SO_4 + 2\,H_2O}$
oksida logam (oksida basa)	garam + air	$\mathrm{CuO + H_2SO_4 \longrightarrow CuSO_4 + H_2O}$
karbonat atau hidrogen karbonat	garam + air + CO_2	$\mathrm{CaCO_3 + 2\,HCl \longrightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2}$
logam aktif	garam + H_2	$\mathrm{Zn + 2\,HCl \longrightarrow ZnCl_2 + H_2}$
amonia	garam amonium	$\mathrm{NH_3 + HNO_3 \longrightarrow NH_4NO_3}$ (pupuk)

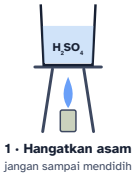
Nama garam diambil dari logam (atau amonium) dan sisa asamnya: asam klorida → **klorida**, asam sulfat → **sulfat**, asam nitrat → **nitrat**, asam asetat → **asetat** (etanoat), asam fosfat → **fosfat**.

Membuat garam di laboratorium (gaya IGCSE)

Cara membuat garam bergantung pada dua pertanyaan: apakah garamnya **larut** dalam air, dan apakah bahan basanya **larut**? Ingat aturan kelarutan: semua garam natrium, kalium, amonium, dan nitrat larut; klorida larut kecuali $AgCl$ dan $PbCl_2$; sulfat larut kecuali $BaSO_4$, $PbSO_4$ (dan $CaSO_4$ yang sedikit larut); karbonat tidak larut kecuali milik natrium, kalium, dan amonium.

Garam yang dibuat	Metode	Contoh
Larut, dari basa/karbonat/logam yang **tidak larut**	Tambahkan padatan **berlebih** ke asam → saring sisa padatan → kristalkan filtrat	$\mathrm{CuO} + \mathrm{H_2SO_4} \longrightarrow \mathrm{CuSO_4} + \mathrm{H_2O}$
Larut, dari **alkali** (garam Na, K, amonium)	**Titrasi** dengan indikator → ulangi tanpa indikator memakai volume yang sama → kristalkan	$\mathrm{NaOH} + \mathrm{HCl} \longrightarrow \mathrm{NaCl} + \mathrm{H_2O}$
Tidak larut	**Pengendapan**: campur dua larutan → saring endapan → cuci dengan air suling → keringkan	$\mathrm{BaCl_2} + \mathrm{Na_2SO_4} \longrightarrow \mathrm{BaSO_4}\downarrow + 2\,\mathrm{NaCl}$

$$CuO(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow CuSO_4(aq) + H_2O(l)$$



Langkah 1. Tuang ±25 mL asam sulfat encer ke gelas kimia, lalu hangatkan perlahan agar reaksi berikutnya lebih cepat. Pakai kacamata pelindung.

$$CuO(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow CuSO_4(aq) + H_2O(l)$$



Langkah 2. Tambahkan serbuk tembaga(II) oksida yang hitam sedikit demi sedikit sambil diaduk. Larutan menjadi biru. Terus tambahkan sampai ada serbuk hitam yang **tidak mau larut lagi**: tandanya semua asam sudah habis bereaksi.

$$CuO(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow CuSO_4(aq) + H_2O(l)$$



Langkah 3. Saring campuran. Kelebihan CuO tertahan di kertas saring, sedangkan larutan biru $\mathrm{CuSO_4}$ (filtrat) yang murni tertampung di bawah. Memakai CuO berlebih memastikan tidak ada asam yang tersisa.

$$CuO(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow CuSO_4(aq) + H_2O(l)$$



Langkah 4. Panaskan filtrat di cawan penguap sampai sebagian air menguap. Uji dengan meneteskan larutan ke batang pengaduk yang dingin: bila langsung muncul kristal, hentikan pemanasan. **Jangan diuapkan sampai kering.**

$$CuO(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow CuSO_4(aq) + H_2O(l)$$



Langkah 5. Biarkan dingin perlahan. Kristal biru tembaga(II) sulfat pentahidrat, $\mathrm{CuSO_4 \cdot 5\,H_2O}$, tumbuh. Saring, bilas dengan sedikit air dingin, lalu keringkan di antara kertas saring.

KESELAMATAN

Saat mengencerkan asam pekat, **selalu tuang asam ke dalam air** sedikit demi sedikit sambil diaduk, jangan sebaliknya. Pelarutannya sangat eksoterm: air yang dituang ke asam pekat bisa mendidih seketika dan memercikkan asam. Pemanasan cawan penguap dilakukan dengan kacamata pelindung, dan serbuk CuO jangan dihirup.

KIMIA NUSANTARA · TANAH MASAM DAN AIR GAMBUT

Sebagian besar lahan di Kalimantan, Sumatra, dan Papua bertanah masam, terutama lahan gambut yang airnya berwarna seperti teh dengan pH 3–4 akibat asam humat dan asam fulvat dari sisa tumbuhan. Petani menaburkan **kapur pertanian** (kalsit, $\mathrm{CaCO_3}$) atau **dolomit** ($\mathrm{CaMg(CO_3)_2}$) untuk menaikkan pH tanah, sebuah reaksi netralisasi raksasa di sawah: $\mathrm{CaCO_3 + 2\,H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + H_2O + CO_2}$. Di dalam tubuh, obat maag bekerja dengan cara yang sama: $\mathrm{Mg(OH)_2}$ atau $\mathrm{Al(OH)_3}$ menetralkan kelebihan asam lambung.

COBA SENDIRI **Menetralkan air gambut**

Air sebuah kanal gambut di Kalimantan Tengah ber-pH 3,6. (a) Berapa $[\mathrm{H^+}]$-nya? (b) Berapa gram kapur, $\mathrm{CaCO_3}$ ($M_r = 100$), yang secara teori cukup untuk menetralkan semua $\mathrm{H^+}$ bebas dalam 1 m³ air itu? (c) Di lapangan ternyata dibutuhkan kapur jauh lebih banyak. Jelaskan mengapa.

1. (a) $[\mathrm{H^+}] = 10^{-3{,}6} = 2{,}5 \times 10^{-4}$ M.
2. (b) 1 m³ = 1.000 L, jadi mol $\mathrm{H^+} = 2{,}5 \times 10^{-4} \times 1.000 = 0{,}25$ mol.
3. Dari $\mathrm{CaCO_3 + 2\,H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + H_2O + CO_2}$: mol $\mathrm{CaCO_3} = \frac{1}{2} \times 0{,}25 = 0{,}126$ mol, massanya $0{,}126 \times 100 = 12{,}6$ g.
4. (c) Asam humat adalah asam **lemah**. Sebagian besar H⁺-nya masih "tersimpan" dalam molekul yang belum terionisasi. Begitu H⁺ bebas dinetralkan, kesetimbangan $\mathrm{HA \rightleftharpoons H^+ + A^-}$ bergeser ke kanan dan molekul asam melepas H⁺ baru. Keasaman tersembunyi ini disebut **keasaman cadangan**.

(a) $2{,}5 \times 10^{-4}$ M; (b) ±12,6 g kapur, hanya sesendok makan! (c) Karena asam lemah terus melepas H⁺ cadangannya, kebutuhan kapur nyata bisa ratusan kali lebih besar. pH saja tidak menggambarkan "jumlah total asam".

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ASAM POLIPROTIK, PKA, DAN KEKUATAN ASAM MENURUT STRUKTUR

Asam poliprotik melepas H^+ bertahap, dan setiap tahap selalu lebih sulit daripada tahap sebelumnya karena H^+ harus lepas dari ion yang makin negatif. Untuk asam fosfat:

$$H_3PO_4 \rightleftharpoons H^+ + H_2PO_4^- \ (pK_{a1} = 2{,}15) \quad H_2PO_4^- \rightleftharpoons H^+ + HPO_4^{2-} \ (pK_{a2} = 7{,}20) \quad HPO_4^{2-}$$

Asam sulfat kuat untuk H^+ pertama, tetapi HSO_4^- hanya asam sedang ($K_{a2} = 1{,}2 \times 10^{-2}$). Asam karbonat: $pK_{a1} = 6{,}35$, $pK_{a2} = 10{,}33$.

Kekuatan asam dan struktur. (1) Asam halida: HF (pK_a 3,2) jauh lebih lemah daripada HCl, HBr, dan HI, karena ikatan H–F sangat kuat; ke bawah golongan, ikatan H–X makin panjang dan lemah sehingga asam makin kuat. (2) Asam okso klorin: $HClO$ (7,5) < $HClO_2$ (2,0) < $HClO_3$ (≈ –1) < $HClO_4$ (≈ –10). Setiap atom O tambahan menarik elektron dan menyebarkan muatan negatif anion, sehingga anion lebih stabil. (3) Efek induksi: CH_3COOH (4,76) < $ClCH_2COOH$ (2,86) < $Cl_2CHCOOH$ (1,29) < Cl_3CCOOH (0,65) dalam hal kekuatan asam: atom Cl yang elektronegatif menstabilkan ion karboksilat.

Kimia di sekitarmu

Obat maag

Antasida berisi $Mg(OH)_2$ atau $Al(OH)_3$, basa yang tidak larut sehingga lembut bagi mulut, tetapi menetralkan kelebihan HCl di lambung.

Pengapuran sawah

Tanah masam membuat unsur hara sulit diserap. Kapur pertanian dan dolomit menaikkan pH tanah sehingga padi dan jagung tumbuh lebih baik.

Gigi berlubang

Bakteri plak mengubah gula menjadi asam. Di bawah pH ±5,5, email gigi mulai larut. Pasta gigi yang sedikit basa dan berfluorida membantu melindunginya.

Acar dan asinan

Cuka menurunkan pH acar hingga di bawah 4,6, sehingga banyak bakteri pembusuk dan penghasil racun tidak dapat tumbuh. Itulah pengawet alami.

Gigitan semut rangrang

Semut rangrang menyemprotkan asam format ke luka gigitannya. Rasa perihnya berasal dari H^+ yang merangsang ujung saraf.

Kolam renang

Petugas menjaga pH air kolam di 7,2–7,8. Terlalu asam membuat mata perih dan logam berkarat; terlalu basa membuat kaporit kurang ampuh.

Cek Cepat

Larutan HCl ber-pH 3 diencerkan dengan air sampai volumenya 10 kali semula. Berapa pH-nya sekarang?

2

3

4

7

Manakah pasangan asam-basa konjugat yang benar?

NH_4^+ dan NH_3

H_3O^+ dan OH^-

HCl dan $NaOH$

H_2SO_4 dan SO_4^{2-}

Indikator manakah yang tidak berwarna di dalam asam dan menjadi merah muda keunguan di dalam basa?

Metil oranye

Kunyit

Lakmus merah

Fenolftalein

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: pelangi pH dari dapur dan kamar mandi

Bahan: ¼ buah kubis ungu, 1 ruas kunyit, air panas dari termos, saringan, 8 gelas bening kecil, sendok, label, dan 8 bahan uji: air jeruk nipis, cuka dapur, minuman bersoda, air, larutan gula, larutan soda kue, air sabun mandi, air kapur sirih (½ sendok teh kapur sirih dalam segelas air, ambil bagian jernihnya).

1. Bersama orang dewasa, iris kubis ungu, siram dengan air panas, tunggu 10 menit, lalu saring. Itulah larutan indikatormu (ungu).
2. Parut kunyit, peras dengan sedikit air, dan saring untuk mendapat air kunyit.
3. Isi 8 gelas dengan masing-masing bahan uji (±2 sendok makan), beri label.
4. Teteskan 1 sendok teh ekstrak kubis ungu ke setiap gelas. Catat warnanya, lalu urutkan gelas dari merah ke kuning.
5. Ulangi dengan air kunyit di gelas-gelas baru. Bahan mana saja yang membuat kunyit memerah?

Keselamatan: jangan mencicipi apa pun selama percobaan. Kapur sirih dan air sabun jangan sampai terkena mata (bila terkena, bilas dengan air mengalir). **Jangan memakai pemutih pakaian, pembersih kloset, atau pembersih saluran**, dan jangan pernah mencampur pembersih satu sama lain karena dapat melepaskan gas beracun. Air panas dituang oleh orang dewasa. Buang sisa larutan ke saluran dengan banyak air, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Indikator mana yang lebih "teliti", kubis ungu atau kunyit? Mengapa larutan gula tidak mengubah warna kubis ungu? Apa yang terjadi bila gelas berisi soda kue dan gelas berisi cuka (keduanya sudah diberi kubis ungu) dicampur?

RINGKASAN KILAT — Bab 26 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan sifat **asam** dan **basa**, lalu mengujinya dengan **indikator** alami (kunyit, kubis ungu, bunga sepatu) dan sintetis
- menjelaskan asam-basa menurut **Arrhenius**, **Brønsted–Lowry** (pasangan konjugat), dan **Lewis**
- menghitung **pH**, **pOH**, $[\mathrm{H}^+]$, dan $[\mathrm{OH}^-]$ dengan tetapan air K_w
- membedakan asam/basa **kuat** dan **lemah**, lalu memakai K_a, K_b, dan derajat ionisasi untuk menghitung pH
- menulis reaksi **netralisasi** yang setara dan memilih cara **membuat garam** di laboratorium

Istilah kunci

asam · basa · alkali · Indikator · trayek pH · ion hidrogen · ion hidronium · donor proton · akseptor proton · basa konjugat · asam konjugat · pasangan asam-basa konjugat · amfiprotik · akseptor pasangan elektron · donor pasangan elektron · swaionisasi air

Rumus penting

$$\mathrm{pH} = 14 - \mathrm{pOH} = 14 + \log\left[\mathrm{OH}^-\right]$$

pH + pOH = 14. H^+ dan OH^- seperti dua ujung jungkat-jungkit: hasil kali keduanya selalu 10^{-14} pada 25 °C. Kalau OH^- naik, H^+ turun, dan pH naik.

$$\mathrm{pH} = -\log\left(a \times C_a\right)$$

pH asam kuat. Asam kuat melepas semua H^+-nya. Kalikan konsentrasi asam dengan jumlah H^+ per molekul, lalu ambil minus logaritmanya.

$$\left[\mathrm{H}^+\right] \approx \sqrt{K_a \cdot C_a}$$

pH asam lemah. Asam lemah hanya melepas sebagian kecil H^+. Konsentrasi H^+ kira-kira akar dari Ka dikali konsentrasi asam.

$$\left[\mathrm{OH}^-\right] \approx \sqrt{K_b \cdot C_b}, \qquad \mathrm{pH} = 14 + \log\left[\mathrm{OH}^-\right]$$

pH basa lemah. Basa lemah hanya menarik sedikit H^+ dari air. Hitung dulu OH^- dengan akar Kb kali konsentrasi, lalu ubah ke pH lewat pOH.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Di laboratorium, jangan pernah mencicipi atau menyentuh zat untuk menebak sifatnya.
- Pasangan konjugat bukan asam dan basa yang saling bereaksi.
- pH 7 berarti netral hanya pada 25 °C.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=26

🧩 Teka-teki untuk Bab 27

Setiap hari darah kita kemasukan asam dari makanan dan dari otot yang bekerja keras: asam laktat, asam karbonat dari CO_2, dan banyak lagi. Anehnya, pH darah tetap bertahan di sekitar 7,4. Turun ke 7,0 saja sudah berbahaya. Siapa penjaga pH yang begitu setia di dalam tubuh kita?

▼ **Intip petunjuk**

Ingat ion HCO_3^- yang amfiprotik di subbab 26.2. Campuran asam lemah H_2CO_3 dan basa konjugatnya HCO_3^- dapat "menangkap" H^+ maupun OH^- yang datang. Campuran ajaib ini disebut **larutan penyangga** (buffer), bintang utama Bab 27 bersama titrasi dan hidrolisis garam.

27 Tetes demi Tetes: Titrasi, Penyangga & Hidrolisis

Satu tetes NaOH bisa mengubah larutan bening menjadi merah muda, dan satu tetes itu pula yang membedakan analis teliti dari yang ceroboh. Di bab ini kamu juga akan bertemu "satpam" tak terlihat yang menjaga pH darahmu tetap 7,4 walaupun kamu baru menghabiskan sepiring rujak.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan prinsip **titrasi asam–basa**, alat-alatnya, dan beda **titik ekuivalen** dengan **titik akhir**;
- menghitung konsentrasi dan kadar zat (cuka, asam sitrat jeruk nipis) dari data titrasi dengan $M_a V_a a = M_b V_b b$;
- membaca **kurva titrasi** kuat–kuat, lemah–kuat, dan kuat–lemah, lalu memilih **indikator** yang tepat;
- meramalkan sifat dan menghitung pH larutan **garam yang terhidrolisis**;
- menjelaskan cara kerja **larutan penyangga**, menghitung pH-nya dengan persamaan Henderson–Hasselbalch, dan mengaitkannya dengan darah, sel, kolam ikan, dan tanah.

SATU TETES YANG MENENTUKAN

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kamu meneteskan NaOH ke cuka tepat sampai semua asam asetatnya habis bereaksi (titik ekuivalen). Berapa kira-kira pH larutan saat itu?

- Tepat 7, karena asam dan basa sudah saling menetralkan.
- Sedikit di bawah 7, karena cuka bersifat asam.
- Di atas 7 (sekitar 8,7), karena garam natrium asetat yang terbentuk bersifat basa.
- Tidak bisa ditentukan tanpa indikator.

Jawabannya: sekitar 8,7. "Tepat menetralkan" artinya mol H^+ dan mol OH^- *setara*, bukan pH-nya 7. Hasil reaksinya, ion asetat CH_3COO^-, adalah basa lemah yang merebut H^+ dari air dan meninggalkan OH^-. Peristiwa ini disebut **hidrolisis** (subbab 27.4), dan inilah alasan analis memakai fenolftalein (berubah warna pada pH 8,2–10,0) untuk menitrasi cuka.

27.1 Titrasi: menghitung dengan tetesan

Bagaimana analis pangan tahu bahwa sebotol cuka benar berkadar 25%, atau sebotol sirup jeruk benar berisi asam sitrat sesuai label? Mereka tidak menebak dari rasa. Mereka mereaksikan sampel dengan larutan yang konsentrasinya sudah diketahui, tetes demi tetes, sampai reaksinya tepat tuntas. Dari volume yang terpakai, konsentrasi sampel bisa dihitung. Cara ini disebut **titrasi**.

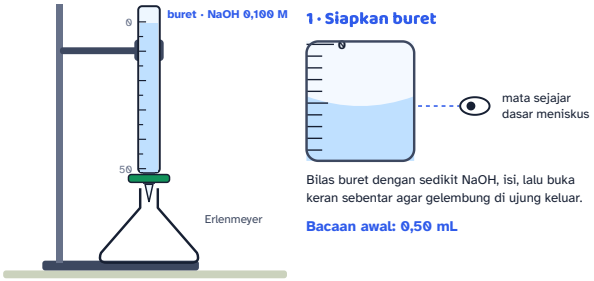
Bahasa sederhana · Bayangkan kamu menuang sirup ke segelas air sambil terus mencicipi, lalu berhenti tepat saat rasanya pas. Titrasi mirip begitu, tetapi tanpa dicicipi! Yang menjadi "lidah" adalah **indikator**, zat warna yang berubah warna begitu asam di dalam gelas habis. Lalu kita baca: berapa mililiter basa yang sudah dituang?

DEFINISI · BAHASA TITRASI

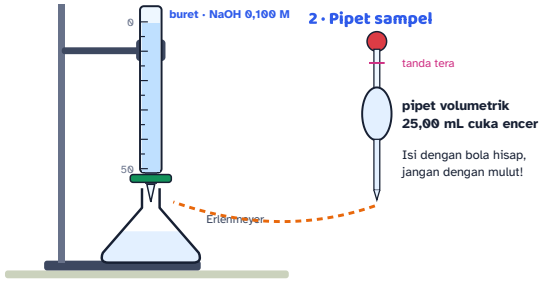
- **Titrasi asam–basa**: cara menentukan konsentrasi asam (atau basa) dengan mereaksikannya dengan basa (atau asam) yang konsentrasinya diketahui.
- **Titran**: larutan di dalam buret yang diteteskan, misalnya NaOH 0,100 M. Titran adalah **larutan baku** (konsentrasinya diketahui teliti).
- **Titrat** (analit): larutan di Erlenmeyer yang ingin diketahui konsentrasinya, misalnya cuka.
- **Titik ekuivalen**: saat jumlah mol H^+ dari asam tepat sama dengan jumlah mol OH^- dari basa. Ini titik *teoretis*; tidak terlihat oleh mata.
- **Titik akhir titrasi**: saat indikator berubah warna dan titrasi dihentikan. Ini yang kita *amati*. Indikator yang baik membuat titik akhir hampir berimpit dengan titik ekuivalen.

Alat	Fungsinya	Catatan penting
Buret 50 mL	meneteskan titran dan mengukur volumenya	skala 0,1 mL, dibaca sampai 0,05 mL (dua desimal); angka 0 ada di **atas**
Pipet volumetrik 25,00 mL	memindahkan sampel dengan sangat teliti	diisi dengan bola hisap (*pipette filler*), **tidak** dengan mulut
Labu Erlenmeyer	wadah titrat	lehernya sempit, jadi mudah digoyang tanpa tumpah
Labu ukur 100/250 mL	membuat larutan baku dan mengencerkan sampel	isi tepat sampai garis tanda
Statif & klem, corong kecil, botol semprot	penopang buret, alat mengisi buret, membilas dinding Erlenmeyer	angkat corong dari buret sebelum mulai menitrasi

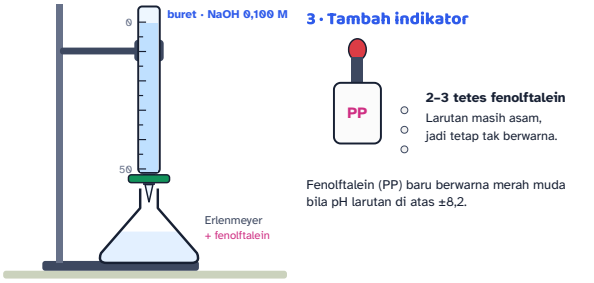
Ikuti prosedur titrasi cuka di bawah ini langkah demi langkah. Perhatikan betapa banyak kebiasaan kecil yang menentukan ketelitian.



Langkah 1. Bilas buret dengan sedikit larutan NaOH (bukan air!), isi, lalu keluarkan gelembung udara di ujungnya. Baca skala awal dengan mata sejajar dasar meniskus: **0,50 mL**.



Langkah 2. Pindahkan tepat 25,00 mL cuka yang sudah diencerkan ke Erlenmeyer memakai pipet volumetrik dan bola hisap.



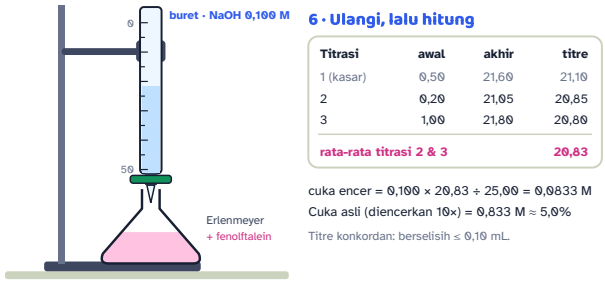
Langkah 3. Teteskan 2–3 tetes indikator fenolftalein. Larutan masih asam, jadi tetap tak berwarna.



Langkah 4. Buka keran dan goyang Erlenmeyer terus-menerus. Warna merah muda muncul sesaat di tempat tetesan jatuh, lalu hilang. Makin dekat titik akhir, makin lambat warnanya hilang: saatnya setetes demi setetes.



Langkah 5. Berhenti ketika warna **merah muda pucat** pertama bertahan sekitar 30 detik. Itulah **titik akhir**. Merah keunguan pekat berarti kebablasan.



Langkah 6. Ulangi sampai dua atau tiga titre berselisih ≤ 0,10 mL (*konkordan*). Titrasi pertama biasanya hanya "kasar" untuk mencari kisaran. Rata-ratakan titre konkordan, lalu hitung konsentrasinya.

⚠ **KESELAMATAN**

Larutan NaOH, bahkan yang encer, dapat merusak mata dan mengiritasi kulit. Selalu pakai kacamata pelindung dan jas lab. Isi buret dengan corong pada posisi di bawah tinggi mata (turunkan buret atau naik ke bangku yang kokoh), lalu angkat corongnya. Jangan memipet dengan mulut. Tumpahan dibilas dengan banyak air.



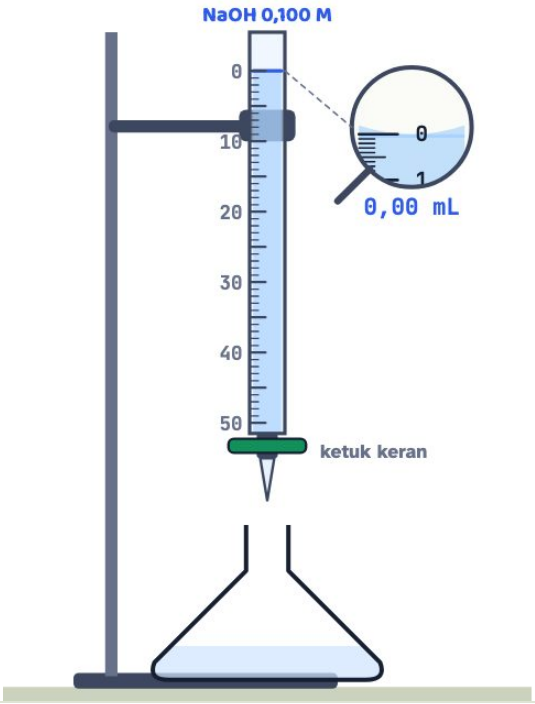
Korosif (NaOH pekat)



Iritan (asam asetat pekat)

LAB MINI **Titrasi Virtual: berapa kadar asam di cuka ini?**

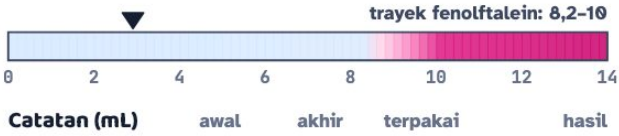
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-27



Cuka makan

25,00 mL cuka yang diencerkan 10×
+ 3 tetes fenolftalein · titran NaOH 0,100 M

Nyalakan pH-meter untuk melihat kurva titrasimu.
Analis sungguhan cukup mengandalkan warna indikator!



Catatan (mL) awal akhir terpakai hasil

Belum ada catatan. Teteskan sampai warna berubah, lalu tekan "Catat titik akhir".

Bacaan buret	NaOH terpakai	pH	Warna larutan
0,00 mL	0,00 mL	pH-meter mati	tak berwarna

Hasil catatan terakhir
belum dicatat

Ketuk keran buret (atau pilih bukaan keran) dan perhatikan warna di Erlenmeyer. Dekat titik akhir, pakai tombol **1 tetes**. Saat merah muda pucat bertahan, tekan **Catat titik akhir**, lalu **Percobaan baru** sampai kamu punya dua titre konkordan. Tantangan: titrasi cuka memakai **metil jingga**. Mengapa hasilnya jauh meleset? Nyalakan pH-meter untuk melihat jawabannya.

TAMU DARI MASA LALU

Pada awal abad ke-19, kimiawan Prancis **Joseph Louis Gay-Lussac** memperbaiki bentuk buret dan memopulerkan kata "buret" dan "pipet". Pada 1855, apoteker Jerman **Karl Friedrich Mohr** menulis buku teks titrasi yang sangat berpengaruh dan memasang klem penjepit pada selang di ujung buret, sehingga titran bisa diteteskan setetes demi setetes. Buret berkeran yang kamu pakai sekarang adalah "cucu" rancangan-rancangan itu.

27.2 Perhitungan titrasi: kadar cuka dan asam sitrat

Kunci semua perhitungan titrasi asam–basa adalah satu kalimat: **di titik ekuivalen, mol H^+ yang dilepas asam sama dengan mol OH^- yang dilepas basa**. Untuk HCl dan NaOH perbandingannya 1 : 1, tetapi asam sulfat melepas 2 H^+ dan asam sitrat dari jeruk nipis melepas 3 H^+ setiap molekul.

$$CH_3COOH + NaOH \longrightarrow CH_3COONa + H_2O \qquad H_3($$

ATURAN · RUMUS TITRASI

Di titik ekuivalen:

$$\underbrace{M_a \times V_a \times a}_{\text{mol H}^+} = \underbrace{M_b \times V_b \times b}_{\text{mol OH}^-}$$

M = molaritas, V = volume (mL atau L, asal sama di kedua sisi), a = jumlah H^+ yang dilepas per molekul asam (valensi asam), b = jumlah OH^- per satuan rumus basa (valensi basa). Bila memakai mL, hasil kalinya dalam milimol (mmol).

RUMUS HIDUP

Titrasi: mol H^+ = mol OH^-

$$M_a = \frac{M_b\, V_b\, b}{V_a\, a}$$

Di titik ekuivalen, jumlah H^+ dari asam tepat sama dengan jumlah OH^- dari basa. Volume basa yang terbaca di buret membuka rahasia konsentrasi asam.

- M_b Molaritas basa (titran) M
- V_b Volume basa terpakai mL
- b Valensi basa
- V_a Volume asam (dipipet) mL
- a Valensi asam
- M_a Molaritas asam M

MOLARITAS ASAM

0,0834

M

Mol OH^- = **0,1** × **20,85** × **1** = **2,085** mmol, sama dengan mol H^+. Jadi molaritas asam = **0,0834** M.

Cek satuan: (mol/L × mL) ÷ mL = mol/L ✔

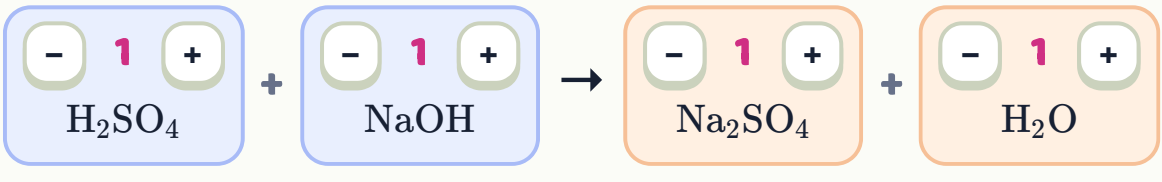
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-TITRASI-MAVAB

TRIK KAK TIRTA

"Hitung H^+ dan OH^-, bukan molekul." Sebelum memakai rumus, tanyakan dua hal: *satu molekul asam ini melepas berapa H^+?* dan *satu satuan basa ini melepas berapa OH^-?* Kalau ragu, setarakan dulu persamaan reaksinya: koefisiennya langsung memberi perbandingan mol.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi penetralan di laboratorium analisis



Unsur	Kiri	Kanan	
H	3 ○○○	2 ○○	✗
S	1 ●	1 ●	✓
O	5 ●●●●●	5 ●●●●●	✓
Na	1 ●	2 ●●	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Asam sitrat ditulis $C_6H_8O_7$. Setelah setara, bandingkan koefisien asam dan basanya: itulah a dan b pada rumus titrasi. Reaksi ketiga adalah titrasi cuka dengan soda kue yang bisa kamu coba di rumah.

CONTOH **Konsentrasi HCl**

Sebanyak 20,0 mL larutan HCl dititrasi dengan NaOH 0,150 M. Titik akhir tercapai setelah 16,0 mL NaOH. Berapa molaritas HCl?

1. HCl melepas 1 H^+ ($a = 1$), NaOH melepas 1 OH^- ($b = 1$).
2. $M_a \times 20{,}0 \times 1 = 0{,}150 \times 16{,}0 \times 1 = 2{,}40$ mmol.
3. $M_a = 2{,}40 / 20{,}0 = 0{,}120$ M.

Molaritas HCl = 0,120 M. Cek kewajaran: volume NaOH lebih kecil daripada volume asam, padahal valensinya sama, jadi NaOH-nya pasti lebih pekat. ✔

Cuka dapur terlalu pekat untuk langsung dititrasi: buretnya bisa habis sebelum titik akhir. Karena itu sampel diencerkan dulu dengan labu ukur. Jangan lupa mengalikan hasilnya dengan **faktor pengenceran**. Kadar cuka biasanya dinyatakan dalam persen massa per volume (% b/v), yaitu gram asam asetat dalam 100 mL cuka.

RUMUS HIDUP

Kadar asam asetat dalam cuka

$$\text{kadar} = \frac{M_b\, V_b}{V_a} \times f_p \times \frac{60}{10}\ \%$$

Molaritas cuka encer dikali faktor pengenceran memberi molaritas cuka asli. Dikali massa molar asam asetat (60 g/mol) lalu dibagi 10, kita dapat gram asam asetat per 100 mL.

- M_b Molaritas NaOH — M
- V_b Volume NaOH terpakai — mL
- V_a Volume cuka encer dipipet — mL
- f_p Faktor pengenceran — ×
- kadar Kadar asam asetat — % (b/v)

KADAR ASAM ASETAT

4,99

% (b/v)

🍽 **kadar khas cuka makan siap pakai**

Cuka asli = **0,832** M, berisi **4,99** g asam asetat per 100 mL atau **49,92** g per liter.

Cek satuan: M × 60 g/mol = g/L; ÷ 10 = g per 100 mL ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KADAR-CUKA

KERJAKAN BERSAMA

Asam sitrat dalam air jeruk nipis

Laras memeras jeruk nipis dan menyaring airnya. Sebanyak 10,0 mL air jeruk diencerkan menjadi 100,0 mL. Lalu 25,00 mL larutan encer itu dititrasi dengan NaOH 0,100 M dan indikator fenolftalein; titik akhir pada 21,90 mL. Anggap semua asamnya asam sitrat ($H_3C_6H_5O_7$, triprotik, $M_r = 192$). Hitung kadar asam sitrat dalam g per 100 mL air jeruk.

1. mol NaOH $= 0{,}100 \times 21{,}90 = 2{,}19$ mmol.
2. Asam sitrat melepas 3 H^+, jadi mol asam sitrat $= 2{,}19/3 = 0{,}730$ mmol dalam 25,00 mL larutan encer.
3. Dalam 100,0 mL larutan encer (berasal dari 10,0 mL air jeruk): $0{,}730 \times 4 = 2{,}92$ mmol.
4. Konsentrasi di air jeruk asli $= 2{,}92/10{,}0 = 0{,}292$ M, yaitu $0{,}292 \times 192 = 56{,}1$ g/L.

Kadar asam sitrat ≈ 5,6 g per 100 mL. Itulah sebabnya air jeruk nipis jauh lebih masam daripada jeruk manis. Jika lupa membagi 3, hasilmu tiga kali terlalu besar!

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Jangan lupa valensi dan faktor pengenceran. Dua kesalahan paling sering dalam soal titrasi adalah (1) memakai $a = 1$ untuk asam sulfat atau asam sitrat, dan (2) lupa bahwa yang dititrasi hanyalah sebagian kecil sampel yang sudah diencerkan. Tulis satuan di setiap baris: mmol, mL, M, g/L.

ID **KIMIA NUSANTARA · CUKA DI DAPUR KITA**

Di pasar Indonesia mudah dijumpai cuka dapur pekat berlabel 25% yang harus diencerkan sebelum dipakai untuk acar atau pempek, di samping cuka makan siap pakai yang kadarnya sekitar 4–5%. Di beberapa daerah, cuka juga dibuat dengan memfermentasi air kelapa atau nira aren dan nipah, sehingga kadarnya bervariasi. Asam sitrat juga dipakai sebagai pengasam pada sirup dan minuman serbuk. Untuk memastikan isi sesuai label, analis pangan memakai titrasi, persis seperti Lab Mini di subbab 27.1.

ADU CEPAT

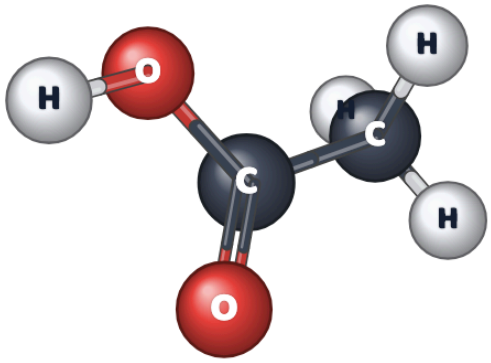
Titrasi kilat: berapa molaritas asamnya?

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-27

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Ma = Mb × Vb ÷ (Va × a). Contoh: 25 mL H_2SO_4 (a = 2) dinetralkan 20 mL NaOH 0,1 M → 0,04 M.

MOLEKUL 3D **Asam-asam yang sering dititrasi analis pangan**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam asetat $\mathrm{C_2H_4O_2}$ Mr ≈ 60,05 PubChem ↗

Asam pada cuka dapur (sekitar 4–25%).

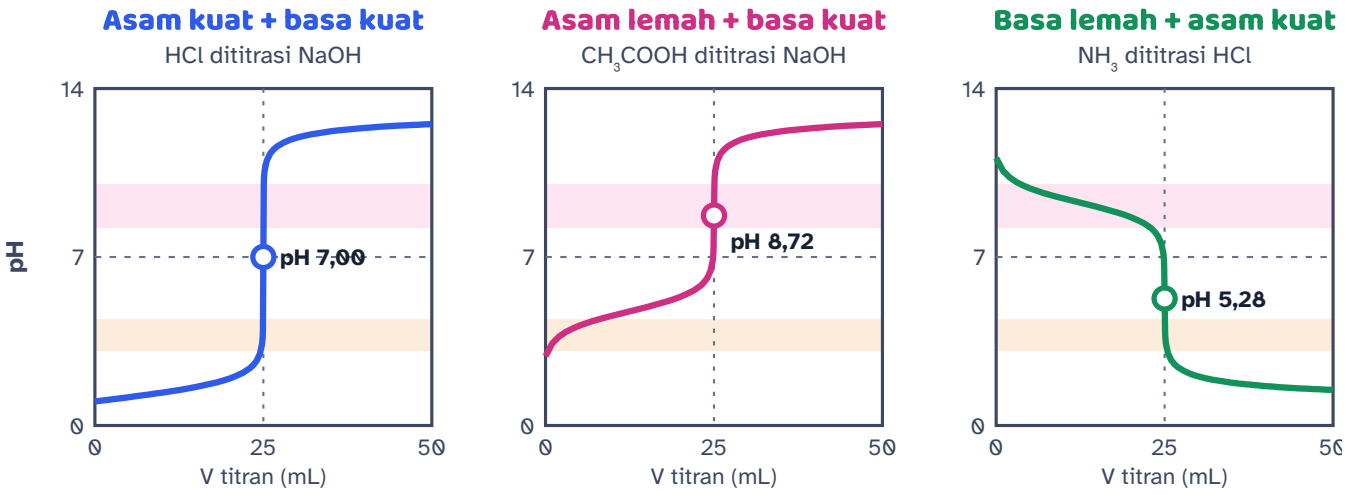
Cari atom H yang terikat pada O dalam gugus –COOH: hanya H itulah yang dilepas saat titrasi. Asam asetat punya 4 atom H tetapi hanya 1 yang asam ($a = 1$). Asam sitrat punya tiga gugus –COOH ($a = 3$); H pada gugus –OH alkoholnya tidak ikut dititrasi. Asam oksalat dihidrat dipakai sebagai **baku primer** untuk menetapkan konsentrasi NaOH karena padatannya murni dan stabil.

27.3 Kurva titrasi dan pemilihan indikator

Jika pH larutan di Erlenmeyer diukur setiap kali NaOH ditambahkan, lalu digambar terhadap volume NaOH, kita mendapat **kurva titrasi**. Bentuknya seperti huruf S yang miring: mula-mula pH naik perlahan, lalu di sekitar titik ekuivalen **melonjak tajam** beberapa satuan hanya karena satu-dua tetes, kemudian landai lagi. Lonjakan inilah yang membuat titrasi sangat teliti.

Kurva untuk asam lemah seperti asam asetat punya empat daerah yang bisa dibaca seperti peta:

1. **Titik awal**: hanya ada asam lemah, pH sekitar 2,9 (bukan 1 seperti HCl dengan konsentrasi sama).
2. **Daerah penyangga**: sebagian HA sudah menjadi A^-. Campuran HA dan A^- melawan perubahan pH, sehingga kurvanya landai. Tepat di **titik setengah ekuivalen**, $[\mathrm{HA}] = [\mathrm{A^-}]$ dan $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a$.
3. **Titik ekuivalen**: semua HA sudah menjadi A^-. Ion A^- terhidrolisis, jadi pH-nya di atas 7 (±8,7).
4. **Setelah ekuivalen**: NaOH berlebih menentukan pH; kurvanya menyatu dengan kurva HCl.



Tiga kurva titrasi (25 mL larutan 0,1 M dengan titran 0,1 M). Lingkaran = titik ekuivalen. Pita merah muda = trayek fenolftalein (8,2–10,0), pita jingga = trayek metil jingga (3,1–4,4). Indikator cocok bila pitanya dipotong bagian kurva yang tegak.

AWAS JEBAKAN

Titik ekuivalen tidak selalu pH 7. Hanya titrasi asam kuat dengan basa kuat yang berakhir di pH 7. Asam lemah dengan basa kuat berakhir di atas 7 karena anionnya basa; basa lemah dengan asam kuat berakhir di bawah 7 karena kationnya (misalnya NH_4^+) asam. "Netral" dalam titrasi berarti *mol setara*, bukan *pH 7*.

ATURAN · MEMILIH INDIKATOR

Indikator cocok bila **trayek perubahan warnanya terletak di bagian kurva yang tegak**. Di bagian itu, satu tetes titran sudah cukup untuk melewati seluruh trayek, sehingga titik akhir hampir berimpit dengan titik ekuivalen.

- Asam kuat + basa kuat (lonjakan ±pH 4–10): metil merah, bromtimol biru, atau fenolftalein.
- Asam lemah + basa kuat (lonjakan ±pH 7–11): **fenolftalein**.
- Basa lemah + asam kuat (lonjakan ±pH 3–7): **metil jingga** atau metil merah.
- Asam lemah + basa lemah: tidak ada lonjakan tajam, sehingga tidak dititrasi dengan indikator biasa.

Indikator	Trayek pH	Warna (asam → basa)	Cocok untuk titrasi
Metil jingga	3,1–4,4	merah → kuning	asam kuat + basa lemah (juga kuat–kuat)
Metil merah	4,4–6,2	merah → kuning	asam kuat + basa lemah, kuat–kuat
Bromtimol biru	6,0–7,6	kuning → biru	asam kuat + basa kuat

Fenolftalein (PP)	8,2–10,0	tak berwarna → merah muda	asam lemah + basa kuat, kuat–kuat
Ekstrak kubis ungu (antosianin)	bertahap, pH 2–13	merah → ungu → biru → hijau → kuning	uji kasar dan titrasi sederhana di rumah

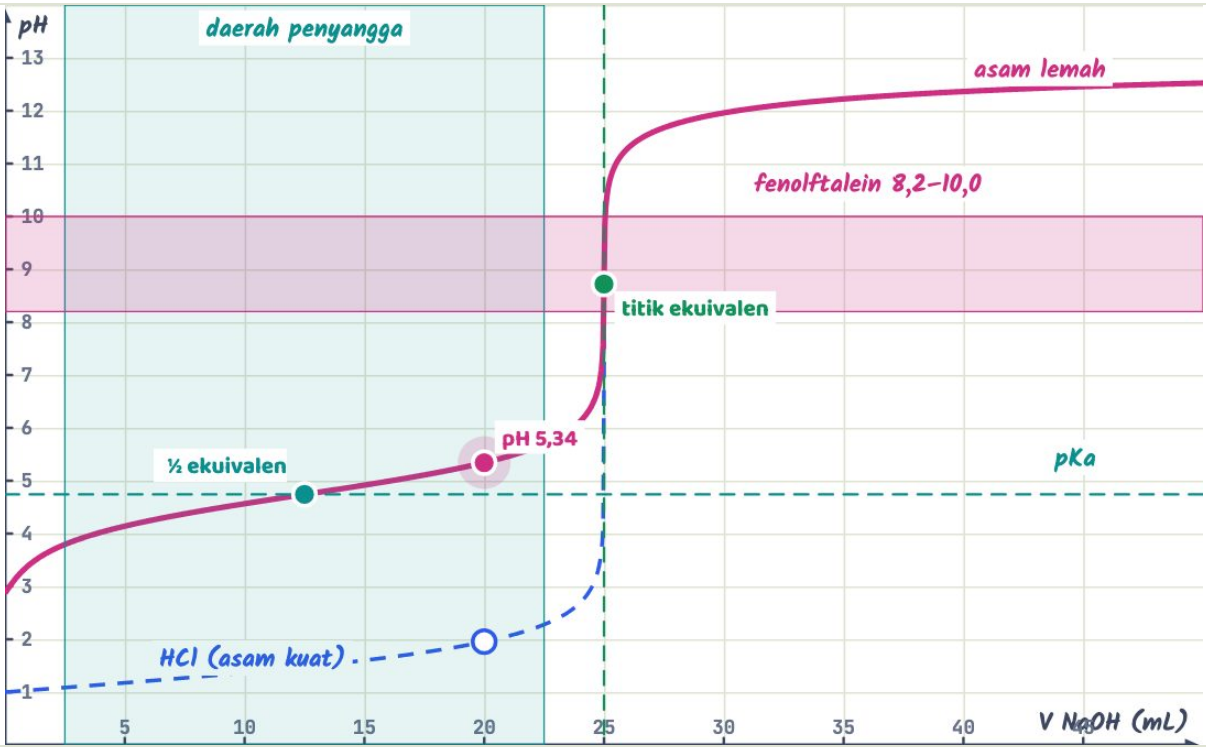
GRAFIK HIDUP

Kurva titrasi asam lemah vs asam kuat dengan NaOH

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-27

$$[H^+] + [Na^+] = [OH^-] + [A^-]$$

$$pH_{lemah} = 5{,}34, \quad pH_{HCl} = 1{,}95$$



✔ fenolftalein cocok untuk asam lemah: titik akhir meleset kurang dari 2 tetes

✔ fenolftalein cocok untuk HCl

pH asam lemah	pH HCl	pH titik ekuivalen (asam lemah)	pH di ½ ekuivalen
5,34	1,95	8,72	4,74

titik akhir – titik ekuivalen (asam lemah)	titik akhir – titik ekuivalen (HCl)
0,01 mL	0,01 mL

Seret titik magenta di sepanjang kurva asam lemah; titik biru berongga mengikuti kurva HCl. Geser pKa: makin besar pKa (asam makin lemah), makin tinggi pH titik ekuivalen dan makin pendek lonjakannya. Ganti indikator (0 tanpa, 1 metil jingga, 2 metil merah, 3 bromtimol biru, 4 fenolftalein) lalu baca tanda ✔/✘. Coba juga konsentrasi 0,001 M: indikator mana yang masih cocok?

MITOS

"Titik ekuivalen selalu pH 7."

FAKTA

Hanya untuk asam kuat + basa kuat. Cuka + NaOH berakhir di pH ±8,7, amonia + HCl di pH ±5,3, karena garam yang terbentuk terhidrolisis.

MITOS

"Titik akhir sama dengan titik ekuivalen."

FAKTA

Titik ekuivalen adalah saat mol asam dan basa setara (teoretis). Titik akhir adalah saat indikator berubah warna (pengamatan). Indikator yang tepat membuat selisihnya kurang dari satu tetes.

MITOS

"Makin banyak indikator, makin jelas hasilnya."

FAKTA

Indikator sendiri adalah asam lemah yang ikut bereaksi dengan titran. Cukup 2–3 tetes; terlalu banyak justru menggeser titik akhir.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TITRASI TANPA INDIKATOR: PH-METER DAN TURUNAN PERTAMA

Sampel berwarna gelap, misalnya cuka aren cokelat atau sari buah, membuat perubahan warna indikator sulit dilihat. Analis lalu memakai **titrasi potensiometri**: pH diukur dengan elektrode setelah setiap penambahan titran. Titik ekuivalen adalah titik tempat kurva paling curam, yaitu puncak grafik $\Delta\mathrm{pH}/\Delta V$ (turunan pertama).

Bonusnya, satu kurva asam lemah memberi dua informasi sekaligus: **konsentrasi** (dari volume ekuivalen) dan K_a (dari pH di setengah volume ekuivalen). Pendekatan $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a$ di titik setengah ekuivalen memerlukan $[\mathrm{H}^+]$ yang jauh lebih kecil daripada $[\mathrm{HA}]$ dan $[\mathrm{A}^-]$. Untuk asam yang agak kuat ($\mathrm{p}K_a \lesssim 3$) atau sangat encer, pendekatan ini meleset; geser pKa ke 2 di Grafik Hidup dan bandingkan pH di ½ ekuivalen dengan pKa.

27.4 Hidrolisis garam: garam pun bisa asam atau basa

Garam dapur yang dilarutkan dalam air memberi larutan netral. Tetapi coba teteskan kubis ungu ke larutan soda kue: warnanya biru kehijauan, tanda basa. Larutan pupuk ZA justru sedikit asam. Mengapa garam yang lahir dari reaksi "penetralan" bisa asam atau basa?

Bahasa sederhana · Ingat bahwa garam tersusun atas ion positif dan ion negatif. Sebagian ion itu "suka bermain" dengan air: ada yang mengambil H^+ dari air (sehingga tersisa OH^- dan larutan menjadi basa), ada yang memberikan H^+ ke air (sehingga larutan menjadi asam). Ion yang berasal dari asam kuat atau basa kuat bersikap cuek dan tidak bereaksi dengan air.

DEFINISI · HIDROLISIS GARAM

Hidrolisis garam adalah reaksi ion-ion garam dengan air yang menghasilkan ion OH^- atau H_3O^+, sehingga larutan garam bersifat basa atau asam. Yang terhidrolisis hanya ion yang berasal dari **asam lemah** (anion, misalnya CH_3COO^-, CO_3^{2-}, F^-) atau **basa lemah** (kation, misalnya NH_4^+).

Natrium asetat → larutan basa



Amonium klorida → larutan asam



Natrium klorida → larutan netral



Tingkat partikel hidrolisis. Ion asetat mengambil H^+ dari molekul air dan meninggalkan OH^-; ion amonium memberikan H^+ kepada air sehingga terbentuk H_3O^+; ion Na^+ dan Cl^- hanya terhidrasi tanpa mengubah pH.

$$CH_3COO^- + H_2O \rightleftharpoons CH_3COOH + OH^- \qquad NH_4^+$$

Garam dari	Contoh	Ion yang terhidrolisis	Sifat larutan (25 °C)	Rumus pendekatan
asam kuat + basa kuat	NaCl, KNO_3, Na_2SO_4	tidak ada	netral, pH = 7	—
asam lemah + basa kuat	CH_3COONa, NaF, Na_2CO_3 (soda abu), K_2CO_3 (air abu)	anion	basa, pH > 7	$[OH^-] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a}[\text{anion}]}$
asam kuat + basa lemah	NH_4Cl, $(NH_4)_2SO_4$ (pupuk ZA), tawas*	kation	asam, pH < 7	$[H^+] = \sqrt{\frac{K_w}{K_b}[\text{kation}]}$
asam lemah + basa lemah	CH_3COONH_4, NH_4CN	kation dan anion	bergantung pada K_a dan K_b	$[H^+] = \sqrt{\frac{K_w K_a}{K_b}}$

* Tawas mengandung ion Al^{3+} yang terhidrasi. Muatannya besar sehingga molekul air di sekitarnya mudah melepas H^+: $[Al(H_2O)_6]^{3+} + H_2O \rightleftharpoons [Al(OH)(H_2O)_5]^{2+} + H_3O^+$. Itulah sebabnya larutan tawas bersifat asam.

ATURAN · TETAPAN HIDROLISIS

Untuk anion dari asam lemah HA, tetapan kesetimbangan hidrolisisnya adalah

$$K_h = K_b(\mathrm{A^-}) = \frac{K_w}{K_a} \qquad \Rightarrow \qquad [\mathrm{OH^-}] = \sqrt{K_h\,[\mathrm{A^-}]} = \sqrt{\frac{K_w}{K_a}\,[\mathrm{A^-}]}$$

Untuk kation dari basa lemah B: $K_h = K_a(\mathrm{BH^+}) = K_w/K_b$ dan $[\mathrm{H^+}] = \sqrt{\frac{K_w}{K_b}[\mathrm{BH^+}]}$. Makin lemah asam (atau basa) induknya, makin besar K_h, makin kuat hidrolisisnya.

Mengapa begitu? Menurunkan rumus pH garam basa

Reaksi hidrolisis $\mathrm{A^- + H_2O \rightleftharpoons HA + OH^-}$ memiliki $K_h = \dfrac{[\mathrm{HA}][\mathrm{OH^-}]}{[\mathrm{A^-}]}$. Kalikan pembilang dan penyebut dengan $[\mathrm{H^+}]$:

$$K_h = \frac{[\mathrm{HA}]}{[\mathrm{H^+}][\mathrm{A^-}]} \times [\mathrm{H^+}][\mathrm{OH^-}] = \frac{1}{K_a} \times K_w$$

Karena setiap A^- yang terhidrolisis menghasilkan satu HA dan satu OH^-, $[\mathrm{HA}] = [\mathrm{OH^-}] = x$. Bila hidrolisisnya sedikit ($x \ll [\mathrm{A^-}]$), $K_h \approx x^2/[\mathrm{A^-}]$, sehingga $x = \sqrt{K_h[\mathrm{A^-}]}$.

RUMUS HIDUP

pH garam dari asam lemah + basa kuat

$$[\mathrm{OH^-}] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a}\,C_g} \qquad \mathrm{pH} = 14 + \log[\mathrm{OH^-}]$$

Anion dari asam lemah merebut H^+ dari air dan meninggalkan OH^-. Makin lemah asam induknya (pKa besar), makin basa garamnya.

- pK_a pKa asam induk
- C_g Konsentrasi anion M
- pH pH larutan garam

PH LARUTAN GARAM

8,87

natrium asetat (larutan di titik ekuivalen titrasi cuka)

Kh = Kw/Ka = **5,495 × 10⁻¹⁰**, [OH⁻] = **7,413 × 10⁻⁶** M, jadi pH = **8,87**.

Cek satuan: √((tanpa satuan) × M) = M; pH tanpa satuan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PH-GARAM-HIDROLISIS

KERJAKAN BERSAMA

pH larutan pupuk ZA

Hitung pH larutan amonium sulfat, $(NH_4)_2SO_4$, 0,050 M. ($K_b\,NH_3 = 1{,}8 \times 10^{-5}$, $K_w = 10^{-14}$)

1. Satu satuan $(NH_4)_2SO_4$ melepas **dua** ion NH_4^+: $[NH_4^+] = 2 \times 0{,}050 = 0{,}10$ M. Ion SO_4^{2-} praktis tidak terhidrolisis.
2. $K_h = K_w/K_b = 10^{-14}/1{,}8 \times 10^{-5} = 5{,}6 \times 10^{-10}$.
3. $[H^+] = \sqrt{5{,}6 \times 10^{-10} \times 0{,}10} = 7{,}5 \times 10^{-6}$ M.
4. $\mathrm{pH} = -\log(7{,}5 \times 10^{-6}) = 5{,}13$.

pH ≈ 5,1: sedikit asam. Pemakaian pupuk ZA terus-menerus ikut mengasamkan tanah sawah (terutama lewat perubahan amonium menjadi nitrat oleh bakteri tanah), sehingga petani kadang perlu menebar kapur.

⚠️

AWAS JEBAKAN

Pakai konsentrasi ion yang terhidrolisis, bukan konsentrasi garamnya. $(NH_4)_2SO_4$ 0,05 M berisi 0,10 M NH_4^+; $(CH_3COO)_2Ca$ 0,1 M berisi 0,2 M CH_3COO^-. Ingat juga: rumus akar kuadrat hanya berlaku bila hidrolisisnya kecil (kurang dari ±5%).

✏️

TRIK KAK TIRTA

"Yang kuat menentukan rasa." Lihat asal-usul garamnya: kalau induk basanya lebih kuat (NaOH + asam lemah), garamnya basa. Kalau induk asamnya lebih kuat (HCl + basa lemah), garamnya asam. Kalau dua-duanya kuat, netral. Kalau dua-duanya lemah, bandingkan K_a dan K_b.

ID

KIMIA NUSANTARA · AIR ABU, TAWAS, DAN PUPUK ZA

Pembuat mi kuning dan beberapa kue tradisional memakai **air abu** (air ki), larutan kalium karbonat yang dahulu dibuat dari abu tumbuhan. Ion CO_3^{2-} terhidrolisis sehingga larutannya basa; suasana basa ini membuat mi lebih kenyal dan kekuningan. Sebaliknya, **tawas** yang dipakai PDAM untuk menjernihkan air dan **pupuk ZA** di sawah memberi larutan asam karena kationnya terhidrolisis.

🚀

LANJUT · IB & OLIMPIADE

GARAM AMFIPROTIK DAN GARAM DARI DUA INDUK LEMAH

Ion HCO_3^- dalam soda kue bisa melepas H⁺ ($K_{a2} = 4{,}7 \times 10^{-11}$) atau menerima H⁺ ($K_b = K_w/K_{a1} = 2{,}2 \times 10^{-8}$). Karena $K_b > K_{a2}$, larutannya sedikit basa. Analisis lengkap memberi

$$\text{pH} \approx \tfrac{1}{2}\,(\text{p}K_{a1} + \text{p}K_{a2}) = \tfrac{1}{2}(6{,}35 + 10{,}33) = 8{,}34$$

yang hampir tidak bergantung pada konsentrasi. Dengan cara yang sama, larutan NaH_2PO_4 ber-pH ≈ ½(2,15 + 7,20) ≈ 4,7. Untuk garam dari asam lemah dan basa lemah seperti CH_3COONH_4: $\text{pH} = 7 + \tfrac{1}{2}(\text{p}K_a - \text{p}K_b) = 7 + \tfrac{1}{2}(4{,}74 - 4{,}74) = 7{,}0$, meskipun kedua ionnya sama-sama terhidrolisis.

27.5 Larutan penyangga: satpam pH

Tebak Dulu!

Larutan penyangga asetat (CH_3COOH 0,1 M + CH_3COONa 0,1 M) ber-pH 4,74. Kamu mengencerkannya 10 kali dengan air. pH-nya menjadi...

- 5,74, karena makin encer berarti makin kurang asam.
- 3,74, karena ion-ionnya makin jarang.
- tetap sekitar 4,74.
- 7, karena air menetralkan asamnya.

Jawabannya: tetap sekitar 4,74. pH penyangga bergantung pada *perbandingan* $[A^-]/[HA]$. Pengenceran memperkecil keduanya dengan faktor yang sama, jadi rasionya tidak berubah. Yang berkurang adalah **kapasitasnya**: penyangga encer lebih cepat kewalahan. (Kalau diencerkan ekstrem, sampai sekitar 10^{-4} M, pH-nya mulai bergeser.)

Coba teteskan 1 mL HCl 1 M ke 100 mL air murni: pH anjlok dari 7 ke 2, artinya keasamannya naik 100.000 kali! Teteskan jumlah HCl yang sama ke 100 mL campuran asam asetat dan natrium asetat (masing-masing 0,1 M): pH hanya bergeser dari 4,74 ke 4,66. Campuran kedua itu adalah **larutan penyangga** (bufer).

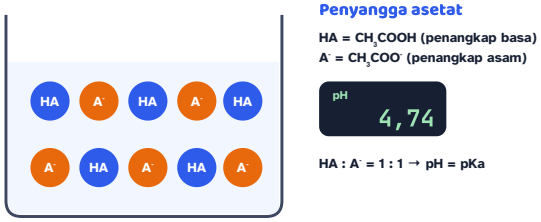
Bahasa sederhana · Bayangkan penyangga sebagai satpam yang membawa dua alat: "penangkap asam" dan "penangkap basa". Setiap kali ada asam masuk, penangkap asam bekerja; setiap kali ada basa masuk, penangkap basa bekerja. Selama kedua alatnya masih ada, keadaan di dalam tetap tenang. Tetapi satpam pun bisa kewalahan kalau tamunya datang terlalu banyak.

DEFINISI · LARUTAN PENYANGGA

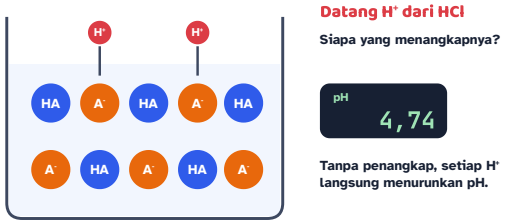
Larutan penyangga adalah larutan yang pH-nya hampir tidak berubah bila ditambah sedikit asam, sedikit basa, atau diencerkan. Isinya pasangan asam–basa konjugat dalam jumlah yang sebanding:

- **Penyangga asam** (pH < 7): asam lemah + basa konjugatnya, misalnya CH_3COOH + CH_3COONa, atau $H_2PO_4^-$ + HPO_4^{2-}.
- **Penyangga basa** (pH > 7): basa lemah + asam konjugatnya, misalnya NH_3 + NH_4Cl.

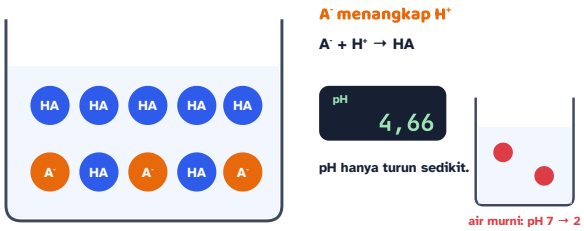
Penyangga dapat dibuat **langsung** (mencampur asam lemah dengan garamnya) atau **tidak langsung** (asam lemah berlebih dinetralkan sebagian oleh basa kuat; misalnya 2 mol CH_3COOH + 1 mol NaOH menghasilkan 1 mol CH_3COOH + 1 mol CH_3COO^-).



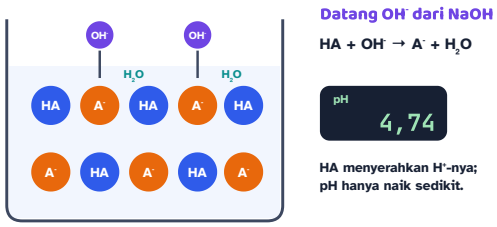
Langkah 1. Penyangga asetat berisi asam lemah HA ($\mathrm{CH_3COOH}$) dan basa konjugatnya $\mathrm{A^-}$ ($\mathrm{CH_3COO^-}$) dalam jumlah sebanding. Setiap bola mewakili triliunan partikel.



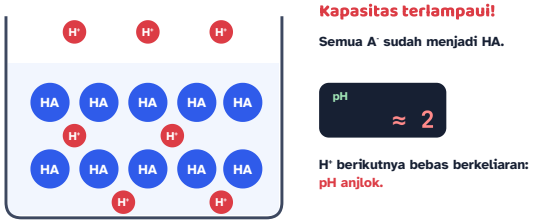
Langkah 2. Asam kuat (HCl) menambahkan ion $\mathrm{H^+}$. Di air murni, $\mathrm{H^+}$ ini langsung menaikkan keasaman.



Langkah 3. Di penyangga, ion $\mathrm{A^-}$ menangkap $\mathrm{H^+}$ menjadi HA: $\mathrm{CH_3COO^- + H^+ \quad CH_3COOH}$. Contoh nyata: 100 mL penyangga 0,1 M + 1 mmol HCl hanya turun dari 4,74 ke 4,66, sedangkan 100 mL air murni anjlok dari 7 ke 2.



Langkah 4. Basa kuat (NaOH) menambahkan $\mathrm{OH^-}$. Kali ini HA yang bekerja: $\mathrm{CH_3COOH + OH^- \quad CH_3COO^- + H_2O}$. pH hanya naik sedikit.



Langkah 5. Bila asam yang masuk melebihi jumlah $\mathrm{A^-}$, tidak ada lagi penangkap. $\mathrm{H^+}$ sisanya bebas dan pH anjlok: **kapasitas penyangga** terlampaui.

HUKUM · PERSAMAAN HENDERSON–HASSELBALCH

Untuk penyangga asam lemah HA dan basa konjugatnya $\mathrm{A^-}$:

$$\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a + \log \frac{[\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]} = \mathrm{p}K_a + \log \frac{n_{\mathrm{A^-}}}{n_{\mathrm{HA}}}$$

Karena volumenya sama, perbandingan konsentrasi boleh diganti perbandingan mol. Untuk penyangga basa (B dan $\mathrm{BH^+}$): $\mathrm{pOH} = \mathrm{p}K_b + \log \frac{[\mathrm{BH^+}]}{[\mathrm{B}]}$, atau langsung pakai $\mathrm{p}K_a(\mathrm{BH^+}) = 14 - \mathrm{p}K_b$.

Mengapa begitu? Dari Ka ke Henderson–Hasselbalch

Mulai dari $K_a = \frac{[\mathrm{H^+}][\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]}$, lalu susun ulang: $[\mathrm{H^+}] = K_a \frac{[\mathrm{HA}]}{[\mathrm{A^-}]}$. Ambil $-\log$ kedua ruas:

$$-\log[\mathrm{H^+}] = -\log K_a - \log\frac{[\mathrm{HA}]}{[\mathrm{A^-}]} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a + \log\frac{[\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]}$$

Dalam penyangga, HA hampir tidak terionisasi (ion A^- yang banyak menekan ionisasinya) dan A^- hampir tidak terhidrolisis. Jadi $[\mathrm{HA}]$ dan $[\mathrm{A^-}]$ cukup diambil dari jumlah yang dicampurkan.

RUMUS HIDUP

Henderson–Hasselbalch: pH larutan penyangga

$$\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a + \log\frac{[\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]}$$

pH penyangga ditentukan oleh pKa asamnya dan perbandingan basa konjugat terhadap asam, bukan oleh banyaknya air.

- $\mathrm{p}K_a$ pKa asam lemah
- $[\mathrm{A^-}]$ Basa konjugat M
- $[\mathrm{HA}]$ Asam lemah M
- pH pH penyangga

PH PENYANGGA

4,74

✔ rasio 0,1–10: penyangga bekerja baik (pH = pKa ± 1)

rasio 1 : 1 → pH = pKa, kapasitas terbesar

Rasio $[A^-]/[HA]$ = **1**. Setiap kali rasio dikali 10, pH naik tepat 1 satuan.

Cek satuan: M ÷ M → tanpa satuan; log dan pH tanpa satuan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-HENDERSON-HASSELBALCH

TRIK KAK TIRTA

"Satu banding satu, pH sama dengan pKa; tiap ×10, naik satu." Rasio 10 : 1 memberi pKa + 1, rasio 1 : 10 memberi pKa – 1. Karena itu, untuk membuat penyangga pH 5, pilih asam yang pKa-nya dekat 5 (asam asetat, 4,74). Untuk pH 7 pilih fosfat (7,21), untuk pH 9 pilih amonia (9,25).

COBA SENDIRI **Penyangga diuji dengan HCl**

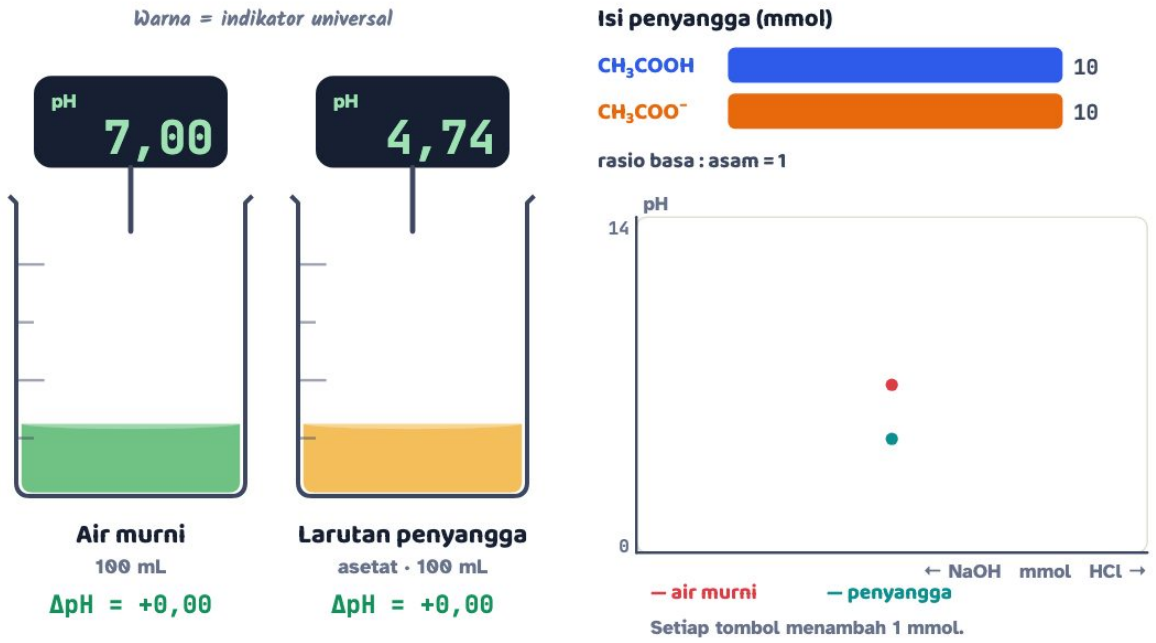
Kak Tirta mencampur 100 mL CH_3COOH 0,20 M dengan 50 mL NaOH 0,20 M. (a) Hitung pH campuran. (b) Ke dalamnya ditambahkan 1,0 mL HCl 1,0 M. Hitung pH baru dan bandingkan dengan air murni 151 mL yang diberi HCl sebanyak itu. ($K_a = 1{,}8 \times 10^{-5}$)

1. Mol awal: CH_3COOH = 20 mmol, NaOH = 10 mmol. Reaksi $CH_3COOH + OH^- \longrightarrow CH_3COO^- + H_2O$ menyisakan 10 mmol CH_3COOH dan menghasilkan 10 mmol CH_3COO^-: penyangga cara tidak langsung.
2. (a) $\text{pH} = 4{,}74 + \log(10/10) = 4{,}74$.
3. (b) HCl 1,0 mmol bereaksi dengan A^-: CH_3COO^- menjadi 9,0 mmol, CH_3COOH menjadi 11,0 mmol.
4. $\text{pH} = 4{,}74 + \log(9{,}0/11{,}0) = 4{,}74 - 0{,}09 = 4{,}66$.
5. Air murni: $[H^+] = 1{,}0/152 = 6{,}6 \times 10^{-3}$ M, pH = 2,18 (turun 4,8 satuan!).

pH penyangga hanya turun 0,09, dari 4,74 menjadi 4,66; air murni turun hampir 5 satuan. Penyangga bekerja karena ion asetat "menelan" H^+ yang datang.

LAB MINI Uji Penyangga: air murni vs larutan penyangga

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-27



pH air murni	pH penyangga	ΔpH air	ΔpH penyangga	HCl – NaOH masuk
7	4,74	0	0	0 mmol

Tekan tombol HCl berkali-kali dan bandingkan ΔpH kedua gelas. Perhatikan batang biru dan jingga: setiap H^+ yang masuk mengubah A^- menjadi HA. Teruskan sampai muncul peringatan kapasitas. Lalu turunkan konsentrasi penyangga ke 0,01 M: berapa tetes HCl yang kini cukup untuk membuatnya kewalahan? Coba juga tombol pengenceran: pH air murni dan penyangga hampir tidak berubah, tetapi kapasitasnya?

Kapasitas penyangga adalah banyaknya asam atau basa kuat yang dapat ditampung penyangga sebelum pH-nya berubah drastis (biasanya dianggap 1 satuan). Kapasitas makin besar bila konsentrasi kedua komponen makin besar, dan paling besar bila perbandingannya 1 : 1, yaitu saat $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a$. Secara praktis, penyangga efektif pada rentang $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a \pm 1$.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Penyangga bukan pelindung tak terbatas: pH-nya tetap berubah, hanya sedikit, dan bila asam atau basa yang masuk melebihi kapasitasnya, pH berubah drastis. Ingat juga bahwa campuran asam kuat dengan garamnya (misalnya HCl + NaCl) **bukan** penyangga, karena Cl^- tidak mampu menangkap H^+.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1908, ahli biokimia Amerika **Lawrence J. Henderson** meneliti bagaimana darah bisa mempertahankan keasamannya walau tubuh terus menghasilkan asam. Ia menuliskan hubungan $[\mathrm{H}^+] = K_a[\mathrm{HA}]/[\mathrm{A}^-]$ untuk asam karbonat dan bikarbonat. Pada 1916, dokter Denmark **Karl Albert Hasselbalch** menulis ulang persamaan itu dalam bentuk logaritma, memakai skala pH yang diperkenalkan S.P.L. Sørensen pada 1909, dan memakainya untuk menghitung pH darah dari kadar CO_2. Lahirlah persamaan yang kini dihafal semua mahasiswa kedokteran.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KAPASITAS PENYANGGA DAN BATAS HENDERSON–HASSELBALCH

Kapasitas penyangga dapat dinyatakan sebagai $\beta = \dfrac{dC_{\text{basa}}}{d\,\text{pH}}$, yaitu mol basa kuat per liter yang diperlukan untuk menaikkan pH satu satuan. Untuk penyangga HA/A⁻ dengan konsentrasi total C:

$$\beta = 2{,}303\left([\text{H}^+] + [\text{OH}^-] + \frac{C\,K_a[\text{H}^+]}{(K_a + [\text{H}^+])^2}\right)$$

Suku terakhir maksimum saat $[\text{H}^+] = K_a$ (pH = pKa) dan bernilai $2{,}303\,C/4 \approx 0{,}58\,C$. Persamaan Henderson–Hasselbalch sendiri gagal bila penyangga sangat encer atau K_a besar, karena ionisasi HA tidak lagi bisa diabaikan. Contoh: CH_3COOH dan CH_3COONa masing-masing $1{,}0 \times 10^{-4}$ M. Keseimbangan muatan $[\text{H}^+] + [\text{Na}^+] = [\text{CH}_3\text{COO}^-] + [\text{OH}^-]$ yang diselesaikan secara numerik memberi pH 4,86, bukan 4,74.

27.6 Penyangga di tubuh, alam, dan industri

Enzim, protein yang menjalankan hampir semua reaksi di tubuh, hanya bekerja baik pada pH tertentu. Karena itu tubuhmu dipenuhi penyangga. Penyangga utama di **darah** adalah pasangan asam karbonat–bikarbonat, yang terhubung dengan CO_2 dari napas:

$$\text{CO}_2\,(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}\,(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3\,(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{H}^+\,(\text{aq}) + \text{HC}$$

Bahasa sederhana · Darah yang sehat ber-pH sekitar 7,4, sedikit basa. Bila pH darah turun di bawah 7,35 (asidosis) atau naik di atas 7,45 (alkalosis), tubuh menjadi lemas, pusing, bahkan bisa pingsan. Paru-paru dan ginjal bekerja sama menjaganya: paru-paru mengatur banyaknya CO_2 yang dibuang lewat napas, ginjal mengatur banyaknya ion bikarbonat.

Di dalam darah (37 °C), pKa efektif pasangan ini sekitar 6,1. Supaya pH 7,4, perbandingan $[\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3]$ harus sekitar 20 : 1. Sekilas aneh: penyangga ini jauh dari rasio ideal 1 : 1. Rahasianya, sistem ini **terbuka**. Asam yang masuk mengubah HCO_3^- menjadi H_2CO_3, lalu menjadi CO_2 yang segera dihembuskan paru-paru, sehingga H_2CO_3 tidak menumpuk. Di dalam sel, penyangga **fosfat** ($\text{H}_2\text{PO}_4^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HPO}_4^{2-}$, pKa ≈ 7,2; di lingkungan sel sekitar 6,8) dan protein seperti hemoglobin ikut menjaga pH.

COBA SENDIRI

Darah pendaki gunung

pKa efektif H_2CO_3 di darah = 6,1. (a) Berapa perbandingan $[HCO_3^-]/[H_2CO_3]$ pada pH 7,40? (b) Seorang pendaki di ketinggian bernapas cepat sehingga $[H_2CO_3]$ turun dari 1,2 mM menjadi 0,90 mM, sementara $[HCO_3^-]$ tetap 24 mM. Berapa pH darahnya, dan apa namanya?

1. (a) $7{,}40 = 6{,}1 + \log r \rightarrow \log r = 1{,}30 \rightarrow r = 10^{1{,}30} \approx 20$.
2. (b) $\mathrm{pH} = 6{,}1 + \log(24/0{,}90) = 6{,}1 + 1{,}43 = 7{,}53$.
3. pH di atas 7,45: **alkalosis respiratorik**, karena terlalu banyak CO_2 terbuang lewat napas.

Rasio normal ≈ 20 : 1; pH pendaki ≈ 7,53. Dalam beberapa hari, ginjal membuang lebih banyak HCO_3^- sehingga rasionya kembali mendekati 20 : 1. Itulah bagian dari aklimatisasi.

ID

KIMIA NUSANTARA · DARI RINJANI SAMPAI PUNCAK JAYA

Pendaki Rinjani (3.726 m), Semeru (3.676 m), dan Puncak Jaya (4.884 m) menghirup udara yang tekanan oksigennya jauh lebih rendah. Tubuh menanggapinya dengan bernapas lebih cepat dan dalam, sehingga CO_2 ikut terbuang dan pH darah naik. Karena itu pendaki dianjurkan naik bertahap dan beristirahat di ketinggian menengah: memberi waktu bagi ginjal untuk menyetel ulang penyangga bikarbonat. Di dataran rendah, kolam lele dan tanah gambut punya cerita penyangganya sendiri (lihat kartu di bawah).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TITRASI ASAM POLIPROTIK

Asam fosfat melepas tiga H^+ secara bertahap (pKa 2,15; 7,20; 12,35). Setiap tahap punya titik ekuivalen dan daerah penyangganya sendiri. Lonjakan pH yang jelas hanya muncul bila dua pKa berurutan berselisih kira-kira 4 satuan atau lebih. Pada titik ekuivalen pertama larutan berisi $H_2PO_4^-$ yang amfiprotik, dengan $\mathrm{pH} \approx \frac{1}{2}(\mathrm{p}K_{a1} + \mathrm{p}K_{a2}) \approx 4{,}7$ (cocok dengan metil jingga atau metil merah); di titik ekuivalen kedua $\mathrm{pH} \approx \frac{1}{2}(\mathrm{p}K_{a2} + \mathrm{p}K_{a3}) \approx 9{,}8$ (fenolftalein). Di 1,5 ekuivalen, $[H_2PO_4^-] = [HPO_4^{2-}]$ sehingga pH = pK_{a2}: titik setengah ekuivalen versi kedua.

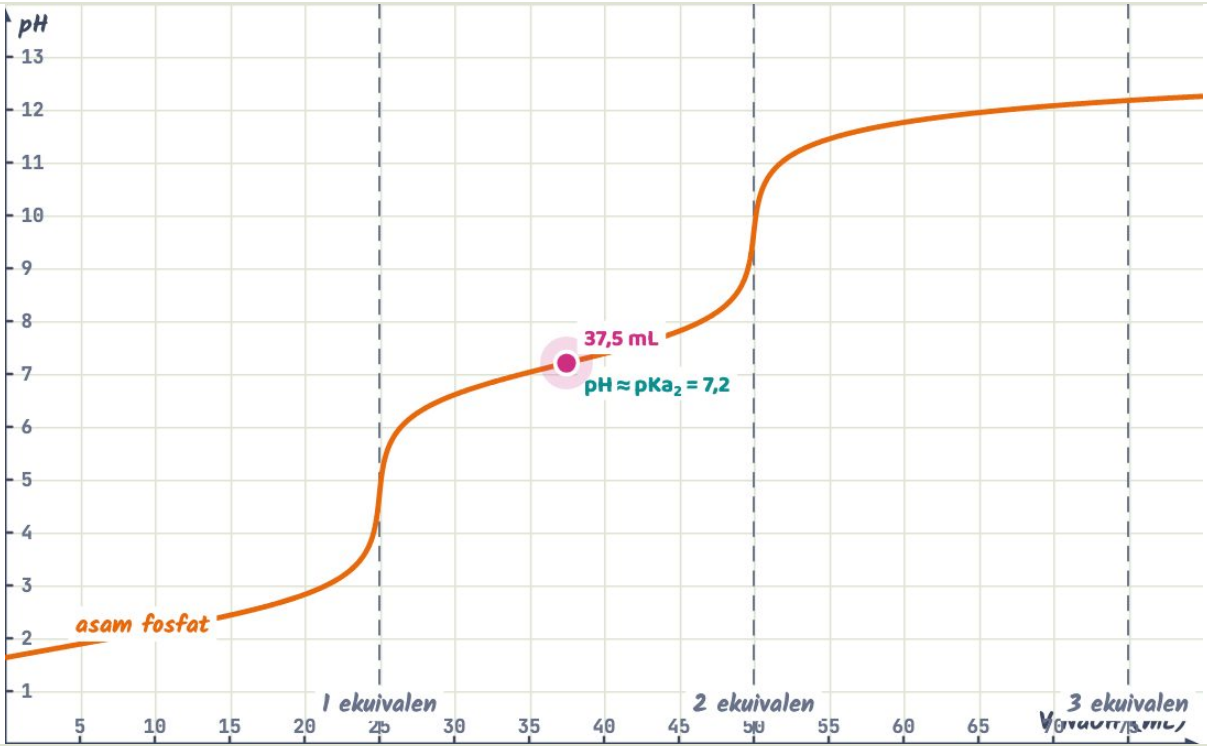
Bandingkan dengan asam sitrat: ketiga pKa-nya berdekatan, sehingga ketiga H^+ dititrasi hampir bersamaan dan hanya satu lonjakan yang tampak di 3 ekuivalen. Itulah alasan kadar asam sitrat jeruk nipis cukup dihitung dengan $a = 3$ dan fenolftalein.

GRAFIK HIDUP **Titrasi asam poliprotik 0,1 M (25 mL) dengan NaOH 0,1 M**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-27

$$[\mathrm{H^+}] + [\mathrm{Na^+}] = [\mathrm{OH^-}] + [\mathrm{H_2A^-}] + 2[\mathrm{HA^{2-}}] + 3[\mathrm{A^{3-}}]$$

$$V = 37{,}5\ \mathrm{mL}: \quad n_{\mathrm{NaOH}} : n_{\mathrm{asam}} = 1{,}5 : 1$$



H_3PO_4: pKa 2,15 · 7,20 · 12,35 berjauhan → dua lonjakan jelas (25 dan 50 mL); lonjakan ketiga hilang karena pKa_3 terlalu dekat dengan pH larutan NaOH

pH	mol NaOH ÷ mol asam
7,21	1,5

Geser pilihan asam (0, 1, 2) dan hitung berapa lonjakan yang terlihat. Seret titik magenta ke 37,5 mL pada asam fosfat: pH-nya sama dengan pKa_2. Mengapa lonjakan di 75 mL hilang untuk asam fosfat, tetapi justru satu-satunya lonjakan untuk asam sitrat?

Kimia di sekitarmu

Laboratorium uji pangan

Analis memeriksa kadar asam asetat pada cuka dan asam sitrat pada sirup atau minuman serbuk dengan titrasi, lalu membandingkannya dengan label kemasan.

Darah para pendaki

Napas cepat di ketinggian membuang CO_2 sehingga pH darah naik. Ginjal perlahan membuang ion bikarbonat untuk memulihkannya: itulah aklimatisasi.

Kolam lele

Lele tumbuh baik pada pH air sekitar 6,5–8,5. Kapur pertanian menambah bikarbonat yang menyangga pH ketika fotosintesis siang dan respirasi malam menggoyang kadar CO_2 air.

Tanah gambut

Gambut di Sumatra, Kalimantan, dan Papua ber-pH 3–4. Asam-asam humusnya membentuk penyangga yang kuat, sehingga dibutuhkan banyak kapur dolomit untuk menaikkan pH-nya.

Obat tetes mata

Obat tetes mata dan banyak obat suntik diberi penyangga, misalnya fosfat atau sitrat, agar pH-nya stabil dan cocok dengan tubuh sehingga tidak perih.

Air abu untuk mi kuning

Air abu berisi kalium karbonat. Ion karbonatnya terhidrolisis sehingga larutannya basa, membuat adonan mi lebih kenyal dan kekuningan.

Cek Cepat

Indikator yang paling cocok untuk menitrasi larutan amonia dengan HCl adalah …

- fenolftalein (8,2–10,0)
- metil merah (4,4–6,2)
- tidak perlu indikator
- kubis ungu yang belum disaring

Campuran manakah yang membentuk larutan penyangga?

- HCl + NaCl
- NaOH + NaCl
- NH_3 + NH_4Cl
- HNO_3 + KNO_3

Larutan soda abu, Na_2CO_3, dalam air bersifat ...

- basa, karena ion CO_3^{2-} terhidrolisis menghasilkan OH^-
- asam, karena mengandung CO_2
- netral, karena merupakan garam
- asam, karena ion Na^+ terhidrolisis

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: titrasi cuka dengan soda kue dan kubis ungu

Bahan: cuka makan siap pakai (±5%), 1 sendok teh soda kue, air minum, ekstrak kubis ungu (irisan kubis direndam air panas 10 menit lalu disaring), 2 gelas bening, sedotan atau pipet tetes, sendok makan, kertas putih sebagai alas.

1. Larutkan 1 sendok teh rata soda kue dalam satu gelas (±200 mL) air. Inilah "titran"-mu.
2. Di gelas kedua, campur 1 sendok makan cuka, 3 sendok makan air, dan 1 sendok makan ekstrak kubis ungu. Warnanya merah muda.
3. Ambil larutan soda kue dengan sedotan (tutup ujung atasnya dengan jari, lepaskan untuk meneteskan) atau pipet tetes. Teteskan ke gelas cuka sambil menghitung tetesnya dan mengaduk.
4. Perhatikan buih gas CO_2 dan perubahan warna merah muda → ungu → biru. Berhenti saat warna biru bertahan setelah diaduk dan buihnya hilang. Catat jumlah tetes.
5. Ulangi dua kali, lalu ganti sampel dengan air jeruk nipis yang diencerkan. Bandingkan jumlah tetesnya.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Jika di rumah hanya ada cuka pekat 25%, minta orang dewasa mengencerkannya dulu (1 bagian cuka + 4 bagian air) dan pakai kacamata, karena cuka pekat perih di mata dan kulit. Jangan mencicipi campuran, jangan menghirup uap cuka dari dekat, dan pakai gelas yang cukup besar karena buihnya bisa meluap. Buang sisa campuran ke wastafel sambil dialiri air, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Sampel mana yang membutuhkan tetes soda kue paling banyak, dan apa artinya bagi kadar asamnya? Mengapa campuran harus diaduk sampai buihnya hilang sebelum kamu menilai warnanya? Tuliskan persamaan reaksi cuka dengan soda kue.

RINGKASAN KILAT

Bab 27 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan prinsip **titrasi asam–basa**, alat-alatnya, dan beda **titik ekuivalen** dengan **titik akhir**
- menghitung konsentrasi dan kadar zat (cuka, asam sitrat jeruk nipis) dari data titrasi dengan $M_a V_a a = M_b V_b b$
- membaca **kurva titrasi** kuat–kuat, lemah–kuat, dan kuat–lemah, lalu memilih **indikator** yang tepat
- meramalkan sifat dan menghitung pH larutan **garam yang terhidrolisis**
- menjelaskan cara kerja **larutan penyangga**, menghitung pH-nya dengan persamaan Henderson–Hasselbalch, dan mengaitkannya dengan darah, sel, kolam ikan, dan tanah

Istilah kunci

titrasi · Titrasi asam–basa · Titran · larutan baku · Titrat · Titik ekuivalen · Titik akhir titrasi · faktor pengenceran · kurva titrasi · Hidrolisis garam · larutan penyangga · Larutan penyangga · Kapasitas penyangga

Rumus penting

$$M_a = \frac{M_b\, V_b\, b}{V_a\, a}$$

Titrasi: mol H⁺ = mol OH⁻. Di titik ekuivalen, jumlah H^+ dari asam tepat sama dengan jumlah OH^- dari basa. Volume basa yang terbaca di buret membuka rahasia konsentrasi asam.

$$\text{kadar} = \frac{M_b\, V_b}{V_a} \times f_p \times \frac{60}{10}\ \%$$

Kadar asam asetat dalam cuka. Molaritas cuka encer dikali faktor pengenceran memberi molaritas cuka asli. Dikali massa molar asam asetat (60 g/mol) lalu dibagi 10, kita dapat gram asam asetat per 100 mL.

$$[\mathrm{OH^-}] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a}\, C_g} \qquad \mathrm{pH} = 14 + \log[\mathrm{OH^-}]$$

pH garam dari asam lemah + basa kuat. Anion dari asam lemah merebut H^+ dari air dan meninggalkan OH^-. Makin lemah asam induknya (pKa besar), makin basa garamnya.

$$\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a + \log\frac{[\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]}$$

Henderson–Hasselbalch: pH larutan penyangga. pH penyangga ditentukan oleh pKa asamnya dan perbandingan basa konjugat terhadap asam, bukan oleh banyaknya air.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Larutan NaOH, bahkan yang encer, dapat merusak mata dan mengiritasi kulit.
- Jangan lupa valensi dan faktor pengenceran.
- Titik ekuivalen tidak selalu pH 7.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=27

🧩 Teka-teki untuk Bab 28

Stalaktit di Gua Gong, Pacitan, tumbuh sangat lambat, sering kurang dari satu sentimeter per abad. Air yang menetes dari langit-langit gua tampak bening, tetapi meninggalkan "batu" setetes demi setetes. Zat apa yang keluar dari air di sana, dan apa hubungannya dengan CO_2, pasangan penyangga darah kita?

▼ **Intip petunjuk**

Air hujan yang mengandung CO_2 (asam karbonat) melarutkan batu kapur menjadi $\mathrm{Ca(HCO_3)_2}$. Saat tetesan air tiba di udara gua, sebagian CO_2 lepas, kesetimbangan bergeser, dan $\mathrm{CaCO_3}$ yang sukar larut mengendap. Seberapa "sukar larut"? Di Bab 28 kamu akan mengukurnya dengan **hasil kali kelarutan**, K_{sp}.

BAB 28 · LARUTAN & ASAM-BASA

28 Kelarutan & Ksp: Saat Air Angkat Tangan

Air sanggup melarutkan banyak zat, tetapi kesabarannya ada batasnya. Lewat sedikit saja dari batas itu, zat terlarut "keluar" lagi sebagai padatan: kerak di teko nenek, batu ginjal, sampai stalaktit raksasa di Gua Gong.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **kelarutan** serta larutan tak jenuh, jenuh, dan lewat jenuh pada tingkat partikel;
- menulis ungkapan **hasil kali kelarutan (K_{sp})** dan menghitung kelarutan s dari K_{sp} untuk garam AB, AB_2, A_2B, AB_3, dan A_2B_3;
- memprediksi **terbentuknya endapan** dengan membandingkan Q_{sp} dan K_{sp}, lalu menulis persamaan ion bersihnya;
- menjelaskan pengaruh **ion senama** dan **pH** terhadap kelarutan, dari gigi berlubang sampai stalaktit;
- merancang **pengendapan selektif** dan menjelaskan larutnya endapan karena pembentukan **ion kompleks**.

BATU DI DALAM TEKO NENEK

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Sesendok serbuk kapur ($\mathrm{CaCO_3}$) diaduk dalam segelas air. Hampir semua serbuk tetap mengendap di dasar. Apa yang sebenarnya terjadi di tingkat partikel?

Tidak ada satu ion pun yang larut. Kapur benar-benar tidak larut dalam air.

Sedikit sekali yang larut (beberapa miligram per liter), lalu larutan menjadi jenuh: ion terus lepas dari kristal dan menempel kembali dengan laju yang sama.

Semua kapur sebenarnya larut, hanya saja larutannya tampak seperti endapan.

Kapur bereaksi dengan air dan berubah menjadi gas, sisanya kotoran.

Jawabannya: sedikit sekali yang larut. Tidak ada garam yang "sama sekali tidak larut". Satu liter air hanya sanggup menampung beberapa miligram $\mathrm{CaCO_3}$, lalu larutan menjadi *jenuh*. Di dalamnya terjadi tarik-ulur tanpa henti: ion $\mathrm{Ca^{2+}}$ dan $\mathrm{CO_3^{2-}}$ lepas dari kristal, sementara ion lain menempel kembali. Bab ini mengajarkan cara menghitung "beberapa miligram" itu dengan tepat.

28.1 Kelarutan dan larutan jenuh

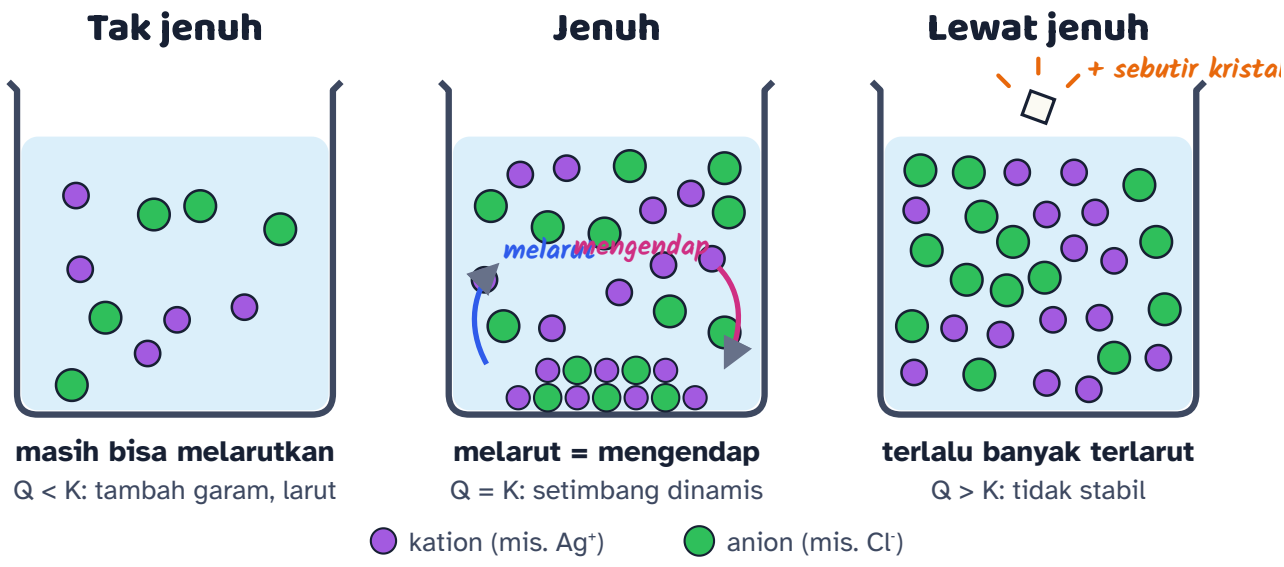
Masukkan garam dapur sesendok demi sesendok ke dalam segelas air (250 mL) sambil diaduk. Sampai sekitar 90 gram, semuanya lenyap. Setelah itu, butiran garam mulai bertahan di dasar gelas: air sudah "angkat tangan". Gula pasir jauh lebih rakus larut (lebih dari 500 gram per gelas!), sedangkan kapur hanya beberapa miligram.

Bahasa sederhana · Bayangkan air sebagai angkot yang kursinya terbatas. Penumpang (partikel garam) boleh naik sampai kursi penuh. Kalau sudah penuh, penumpang baru hanya bisa naik jika ada yang turun. Angkot yang penuh itu kita sebut **larutan jenuh**. Garam yang "sukar larut" seperti kapur ibarat angkot yang kursinya hanya satu atau dua.

DEFINISI · KELARUTAN

Kelarutan (s, dari *solubility*) adalah jumlah **maksimum** zat yang dapat larut dalam sejumlah pelarut pada suhu tertentu. Satuannya bisa g per 100 g air, g/L, atau mol/L (**kelarutan molar**).

- **Larutan tak jenuh**: zat terlarut masih di bawah batas, masih bisa melarutkan lagi.
- **Larutan jenuh**: tepat di batas; padatan yang ditambahkan tidak larut lagi.
- **Larutan lewat jenuh**: zat terlarut melebihi batas (biasanya dibuat dengan mendinginkan larutan panas perlahan); tidak stabil dan mudah mengkristal.



Larutan jenuh adalah **kesetimbangan dinamis**: setiap detik ion lepas dari kristal (melarut) dan ion lain menempel kembali (mengendap) dengan laju sama. Larutan lewat jenuh langsung mengkristal begitu diberi "biji" kristal, seperti pada pembuatan permen gula batu.

Untuk garam ionik yang sukar larut, kesetimbangan itu ditulis antara padatan dan ion-ionnya dalam larutan. Contohnya perak klorida:

$$\mathrm{AgCl\,(s)} \rightleftharpoons \mathrm{Ag^{+}\,(aq)} + \mathrm{Cl^{-}\,(aq)}$$

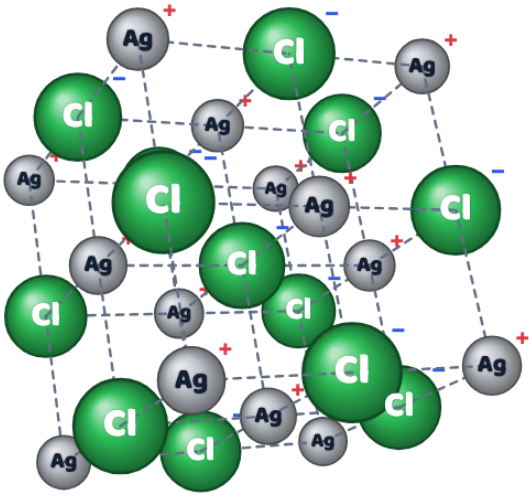
Apakah suatu garam mudah atau sukar larut? Kimiawan sudah merangkumnya menjadi **aturan kelarutan**. Hafalkan pola besarnya, bukan setiap baris.

Ion dalam garam	Umumnya	Pengecualian penting

Na^+, K^+, NH_4^+ (golongan 1 dan amonium)	**larut**	hampir tidak ada
nitrat NO_3^-, asetat CH_3COO^-	**larut**	hampir tidak ada
klorida Cl^-, bromida Br^-, iodida I^-	**larut**	sukar larut dengan Ag^+, Pb^{2+}, Hg_2^{2+}
sulfat SO_4^{2-}	**larut**	$BaSO_4$, $PbSO_4$, $SrSO_4$ sukar larut; $CaSO_4$ sedikit larut
karbonat CO_3^{2-}, fosfat PO_4^{3-}	**sukar larut**	larut bila kationnya golongan 1 atau NH_4^+
hidroksida OH^-	**sukar larut**	golongan 1 dan $Ba(OH)_2$ larut; $Ca(OH)_2$ sedikit larut

MOLEKUL 3D

Kisi yang harus dibongkar air



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Kisi perak klorida (AgCl) $AgCl$

AgCl berkisi persis seperti garam dapur: setiap Ag^+ dikelilingi 6 Cl^-. Namun NaCl larut ±360 g per liter, sedangkan AgCl hanya ±2 mg per liter! Ag^+ menarik awan elektron Cl^- sehingga ikatannya agak kovalen dan kisinya sulit dibongkar air.

Bandingkan kisi AgCl dan NaCl: bentuknya kembar, tetapi NaCl larut ±360 g per liter sedangkan AgCl hanya ±2 mg per liter! Lalu pilih CaF_2: hitung berapa ion F^- di sekitar satu ion Ca^{2+} (ketuk ion untuk mengukur jarak). Mengapa rumusnya CaF_2, bukan CaF?

Mengapa garam yang kisinya kembar bisa berbeda kelarutan begitu jauh? Melarut adalah adu kuat antara dua tarikan: **energi kisi** (ion saling menahan dalam kristal) melawan **energi hidrasi** (molekul air merangkul ion). Ion $\mathrm{Ag^+}$ menarik awan elektron $\mathrm{Cl^-}$ sehingga ikatannya agak kovalen dan kisinya "lengket"; air kalah tarik. Pada $\mathrm{Na^+}$, air yang menang.



SUHU MENGUBAH KELARUTAN

Kebanyakan garam lebih mudah larut dalam air panas (gula batu dan kristal garam dibuat dengan cara ini). Namun ada pengecualian yang penting di bab ini: $\mathrm{CaCO_3}$ dan $\mathrm{Ca(OH)_2}$ justru **lebih sukar larut saat air panas**. Itu salah satu sebab kerak lebih cepat menumpuk di teko dan ketel daripada di gelas air dingin.

28.2 Hasil kali kelarutan (K_{sp}) dan hubungannya dengan s

Di Bab 22 kamu bertemu tetapan kesetimbangan K_c. Larutan jenuh adalah sebuah kesetimbangan, jadi ia juga punya tetapan. Karena padatan murni tidak dimasukkan ke dalam ungkapan K (konsentrasinya tetap), yang tersisa hanyalah **hasil kali konsentrasi ion-ionnya**.



DEFINISI · HASIL KALI KELARUTAN

Untuk garam sukar larut $\mathrm{A_xB_y}$ yang jenuh dalam air:

$$\mathrm{A_xB_y}(s) \rightleftharpoons x\,\mathrm{A}^{y+}(aq) + y\,\mathrm{B}^{x-}(aq) \qquad K_{sp} = [\mathrm{A}^{y+}]^x\,[\mathrm{B}^{x-}]^y$$

K_{sp} (*solubility product*) adalah **hasil kali kelarutan**: hasil kali konsentrasi ion dalam larutan **jenuh**, masing-masing dipangkatkan koefisiennya. Nilainya hanya bergantung pada **suhu** (data buku biasanya pada 25 °C).

Contoh ungkapan K_{sp}:

- $\mathrm{AgCl\,(s)} \rightleftharpoons \mathrm{Ag^+ + Cl^-} \rightarrow K_{sp} = [\mathrm{Ag^+}][\mathrm{Cl^-}]$
- $\mathrm{CaF_2\,(s)} \rightleftharpoons \mathrm{Ca^{2+} + 2\,F^-} \rightarrow K_{sp} = [\mathrm{Ca^{2+}}][\mathrm{F^-}]^2$
- $\mathrm{Ag_2CrO_4\,(s)} \rightleftharpoons \mathrm{2\,Ag^+ + CrO_4^{2-}} \rightarrow K_{sp} = [\mathrm{Ag^+}]^2[\mathrm{CrO_4^{2-}}]$
- $\mathrm{Ca_3(PO_4)_2\,(s)} \rightleftharpoons \mathrm{3\,Ca^{2+} + 2\,PO_4^{3-}} \rightarrow K_{sp} = [\mathrm{Ca^{2+}}]^3[\mathrm{PO_4^{3-}}]^2$

Sekarang hubungkan dengan kelarutan molar s. Jika s mol $\mathrm{CaF_2}$ larut per liter, terbentuk s mol/L $\mathrm{Ca^{2+}}$ dan $2s$ mol/L $\mathrm{F^-}$. Maka

$$K_{sp} = (s)(2s)^2 = 4s^3$$

Mengapa begitu? Penurunan umum untuk $\mathrm{A_xB_y}$

Setiap satuan rumus $\mathrm{A_xB_y}$ yang larut melepas x kation dan y anion. Bila kelarutannya s mol/L, maka $[\mathrm{A}^{y+}] = xs$ dan $[\mathrm{B}^{x-}] = ys$. Substitusikan:

$$K_{sp} = (xs)^x (ys)^y = x^x\, y^y\, s^{\,x+y} \qquad \Longrightarrow \qquad s = \sqrt[x+y]{\frac{K_{sp}}{x^x\, y^y}}$$

Untuk $\mathrm{Ca_3(PO_4)_2}$: $x = 3$, $y = 2$, jadi $K_{sp} = 3^3 \cdot 2^2 \cdot s^5 = 108\, s^5$. Perhatikan bahwa tipe $\mathrm{A_2B_3}$ juga menghasilkan $2^2 \cdot 3^3 = 108$. Rumus ini hanya berlaku bila ion-ion itu berasal dari garamnya saja (air murni) dan tidak bereaksi lebih lanjut dengan air.

Tipe garam	Contoh	Ion yang dilepas	K_{sp} dalam s	s dari K_{sp}
AB	AgCl, $\mathrm{BaSO_4}$, $\mathrm{CaCO_3}$	s, s	s^2	$\sqrt{K_{sp}}$
$\mathrm{AB_2}$ / $\mathrm{A_2B}$	$\mathrm{CaF_2}$, $\mathrm{Mg(OH)_2}$, $\mathrm{PbI_2}$, $\mathrm{Ag_2CrO_4}$	s, $2s$	$4s^3$	$\sqrt[3]{K_{sp}/4}$
$\mathrm{AB_3}$ / $\mathrm{A_3B}$	$\mathrm{Fe(OH)_3}$, $\mathrm{Al(OH)_3}$, $\mathrm{Ag_3PO_4}$	s, $3s$	$27s^4$	$\sqrt[4]{K_{sp}/27}$
$\mathrm{A_2B_3}$ / $\mathrm{A_3B_2}$	$\mathrm{Bi_2S_3}$, $\mathrm{Ca_3(PO_4)_2}$	$2s$, $3s$	$108s^5$	$\sqrt[5]{K_{sp}/108}$

RUMUS HIDUP

Ksp dari kelarutan (garam A_xB_y)

$$K_{sp} = x^{\,x}\; y^{\,y}\; s^{\,x+y}$$

Setiap mol garam yang larut melepas x mol kation dan y mol anion. Kalikan konsentrasi keduanya, masing-masing dipangkatkan koefisiennya.

- x — Kation per rumus
- y — Anion per rumus
- s — Kelarutan molar `mol/L`
- K_{sp} — Hasil kali kelarutan

HASIL KALI KELARUTAN

$3{,}92 \times 10^{-11}$

tipe AB_2 / A_2B: $K_{sp} = 4s^3$

mirip CaF_2 (fluorit): $K_{sp} \approx 3{,}9 \times 10^{-11}$

Konsentrasi kation = **$2{,}14 \times 10^{-4}$** M, konsentrasi anion = **$4{,}28 \times 10^{-4}$** M, jadi Ksp = **$3{,}92 \times 10^{-11}$**.

Cek satuan: (mol/L) pangkat (x + y): satuan Ksp bergantung tipe garam, maka biasanya ditulis tanpa satuan

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KSP-AXBY

TRIK KAK TIRTA

"Setiap koefisien dipangkatkan dengan **dirinya sendiri**." AB_2: $1^1 \cdot 2^2 = 4$, jadi $4s^3$. A_2B_3: $2^2 \cdot 3^3 = 4 \cdot 27 = 108$, jadi $108s^5$. Pangkat s selalu = jumlah ion dalam satu rumus. Cek cepat: $\mathrm{Fe(OH)_3}$ punya 4 ion, jadi $27s^4$.

Tebak Dulu!

K_{sp} AgCl = $1{,}8 \times 10^{-10}$, sedangkan K_{sp} Ag_2CrO_4 = $1{,}1 \times 10^{-12}$. Mana yang kelarutan molarnya (mol/L) lebih besar?

- AgCl, karena K_{sp}-nya ±160 kali lebih besar.
- Ag_2CrO_4, walaupun K_{sp}-nya lebih kecil.
- Sama besar, karena keduanya garam perak.
- Tidak bisa dihitung tanpa percobaan.

Jawabannya: Ag_2CrO_4. AgCl (tipe AB): $s = \sqrt{1{,}8 \times 10^{-10}} = 1{,}3 \times 10^{-5}$ M. Ag_2CrO_4 (tipe A_2B): $s = \sqrt[3]{1{,}1 \times 10^{-12}/4} = 6{,}5 \times 10^{-5}$ M, lima kali lebih larut! Pangkatnya berbeda, jadi K_{sp} tidak bisa langsung dibandingkan.

AWAS JEBAKAN

Membandingkan K_{sp} untuk menentukan mana yang lebih larut **hanya sah bila tipe rumusnya sama** (AB dengan AB, AB_2 dengan AB_2). Untuk tipe berbeda, hitung s masing-masing dulu. Jebakan kedua: untuk $Mg(OH)_2$, $[OH^-] = 2s$, lalu dikuadratkan menjadi $(2s)^2 = 4s^2$, **bukan** $2s^2$.

Berikut nilai K_{sp} beberapa garam pada 25 °C. Nilai K_{sp} di buku yang berbeda bisa sedikit berbeda (misalnya $CaCO_3$ ditulis antara $2{,}8 \times 10^{-9}$ dan $4{,}8 \times 10^{-9}$) karena cara pengukuran dan bentuk kristalnya berbeda. Ikuti nilai yang diberikan soal.

Garam	Tipe	K_{sp} (25 °C)	s (mol/L)	s (mg/L)	Di mana kamu menemuinya
$AgCl$	AB	$1{,}8 \times 10^{-10}$	$1{,}3 \times 10^{-5}$	1,9	uji ion klorida
$AgBr$	AB	$5{,}0 \times 10^{-13}$	$7{,}1 \times 10^{-7}$	0,13	film foto lama
AgI	AB	$8{,}5 \times 10^{-17}$	$9{,}2 \times 10^{-9}$	0,002	uji ion iodida
$BaSO_4$	AB	$1{,}1 \times 10^{-10}$	$1{,}0 \times 10^{-5}$	2,4	"bubur barium" rontgen
$CaCO_3$ (kalsit)	AB	$\pm 3{,}3 \times 10^{-9}$	$5{,}7 \times 10^{-5}$	5,7*	kapur, kerak, stalaktit
CaC_2O_4	AB	$\pm 2{,}3 \times 10^{-9}$	$4{,}8 \times 10^{-5}$	6,1	batu ginjal
CaF_2	AB_2	$3{,}9 \times 10^{-11}$	$2{,}1 \times 10^{-4}$	17	mineral fluorit

$Mg(OH)_2$	AB_2	$5{,}6 \times 10^{-12}$	$1{,}1 \times 10^{-4}$	6,5	obat maag (antasida)
PbI_2	AB_2	$9{,}8 \times 10^{-9}$	$1{,}3 \times 10^{-3}$	620	percobaan "hujan emas"
Ag_2CrO_4	A_2B	$1{,}1 \times 10^{-12}$	$6{,}5 \times 10^{-5}$	22	titrasi Mohr
$Fe(OH)_3$	AB_3	$2{,}8 \times 10^{-39}$	$1{,}0 \times 10^{-10}$	0,00001	karat, air sumur kemerahan
$Ca_3(PO_4)_2$	A_3B_2	$2{,}1 \times 10^{-33}$	$1{,}1 \times 10^{-7}$	0,035	tulang, pupuk fosfat

*Kelarutan $CaCO_3$ yang terukur dalam air murni sedikit lebih besar (±13 mg/L) karena sebagian ion CO_3^{2-} bereaksi dengan air menjadi HCO_3^-. Inilah petunjuk pertama bahwa pH ikut menentukan kelarutan (subbab 28.5).

RUMUS HIDUP **Kelarutan garam AB_2 dari Ksp**

$$s = \sqrt[3]{\frac{K_{sp}}{4}}$$

Untuk garam yang melepas satu ion dan dua ion pasangannya, Ksp = s × (2s)² = 4s³. Bagi Ksp dengan 4, lalu tarik akar pangkat tiga.

K_{sp} Hasil kali kelarutan | M_r Massa molar garam g/mol | s Kelarutan molar mol/L

KELARUTAN MOLAR

1,119 × 10⁻⁴

mol/L

Mg(OH)₂, obat maag: larutan jenuhnya ber-pH ±10,35

Larut **1,119 × 10⁻⁴** mol/L, yaitu **6,488** mg per liter. Ion yang dua itu konsentrasinya 2s = **2,237 × 10⁻⁴** M.

Cek satuan: akar pangkat tiga dari (mol/L)³ = mol/L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KSP-AB2

CONTOH

Seberapa larut perak klorida?

K_{sp} AgCl pada 25 °C adalah $1{,}8 \times 10^{-10}$. Hitung kelarutannya dalam mol/L dan mg/L. (Mr AgCl = 143,5)

1. Tipe AB: $K_{sp} = s \cdot s = s^2$.
2. $s = \sqrt{1{,}8 \times 10^{-10}} = 1{,}34 \times 10^{-5}$ mol/L.
3. Dalam gram: $1{,}34 \times 10^{-5} \times 143{,}5 = 1{,}92 \times 10^{-3}$ g/L $= 1{,}9$ mg/L.

$s = 1{,}3 \times 10^{-5}$ mol/L ≈ 1,9 mg per liter, kira-kira sebutir kecil garam dalam satu botol air besar. Sukar larut, tetapi tidak nol.

KERJAKAN BERSAMA

pH susu magnesia

Obat maag cair "susu magnesia" berisi $Mg(OH)_2$ yang tersuspensi dalam larutan jenuhnya. K_{sp} $Mg(OH)_2 = 5{,}6 \times 10^{-12}$. Hitung kelarutan dan pH larutan jenuhnya.

1. $Mg(OH)_2\,(s) \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2\,OH^-$: $[Mg^{2+}] = s$, $[OH^-] = 2s$.
2. $K_{sp} = s(2s)^2 = 4s^3 = 5{,}6 \times 10^{-12}$ → $s^3 = 1{,}4 \times 10^{-12}$ → $s = 1{,}12 \times 10^{-4}$ M.
3. $[OH^-] = 2s = 2{,}24 \times 10^{-4}$ M → pOH $= -\log(2{,}24 \times 10^{-4}) = 3{,}65$.
4. pH $= 14 - 3{,}65 = 10{,}35$.

$s = 1{,}1 \times 10^{-4}$ M dan pH ≈ 10,35: cukup basa untuk menetralkan asam lambung, tetapi karena sukar larut, tidak cukup pekat untuk melukai mulut seperti soda api.

ADU CEPAT

Ksp → s (garam tipe AB)

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

s = √Ksp. Akar dari pangkat 10 genap: bagi pangkatnya dengan 2. Contoh: √(4 × 10⁻¹⁰) = 2 × 10⁻⁵. Boleh menulis 2e-5.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1864 dua ilmuwan Norwegia, **Cato Guldberg** dan **Peter Waage**, merumuskan hukum aksi massa yang menjadi dasar semua tetapan kesetimbangan. Dua dasawarsa kemudian, **Svante Arrhenius** mengusulkan bahwa garam dalam air terurai menjadi ion. Pada akhir 1880-an, **Walther Nernst** (kelak peraih Nobel Kimia 1920) memadukan keduanya untuk menjelaskan mengapa garam sukar larut makin sukar larut bila ditambah ion senama. Lahirlah gagasan "hasil kali kelarutan" yang sampai kini dipakai di laboratorium analisis di seluruh dunia.

MITOS

"Garam yang 'tidak larut' sama sekali tidak larut."

FAKTA

Semua garam larut walau sedikit. AgCl melarut ±1,9 mg per liter. Justru sedikit itulah yang membuat K_{sp} bisa diukur dan dihitung.

MITOS

"Ksp makin besar berarti garamnya pasti makin mudah larut."

FAKTA

Hanya benar untuk tipe rumus yang sama. Ag_2CrO_4 punya K_{sp} lebih kecil daripada AgCl, tetapi lima kali lebih larut.

MITOS

"Kalau diaduk lebih lama, garam di larutan jenuh akan larut lebih banyak."

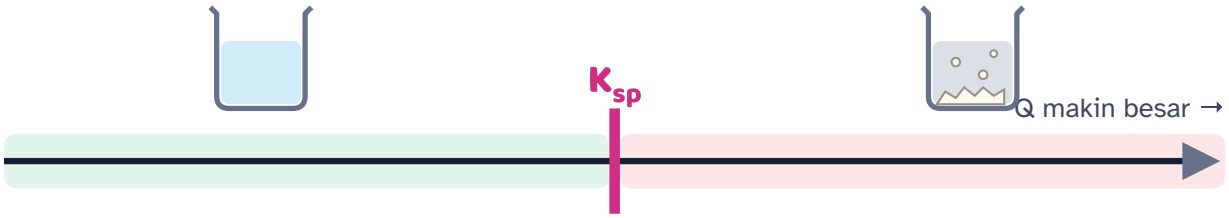
FAKTA

Mengaduk hanya mempercepat tercapainya jenuh. Pada suhu tetap, batasnya tetap. Untuk melarutkan lebih banyak, ubah suhunya atau "curi" salah satu ionnya.

28.3 Memprediksi pengendapan: Q_{sp} lawan K_{sp}

Saat dua larutan jernih dicampur, kadang muncul awan padatan dalam sekejap. Itulah **endapan**. Untuk memprediksinya, hitung hasil kali ion dengan konsentrasi **saat itu juga** (belum tentu setimbang). Nilai ini disebut **hasil kali ion**, Q_{sp}.

$$Q_{sp} = [\mathrm{A}^{y+}]^x\,[\mathrm{B}^{x-}]^y \quad \text{(konsentrasi sesaat)}$$



Q < K
belum jenuh, jernih
garam padat yang ditambahkan masih larut

Q = K
tepat jenuh
setimbang

Q > K
lewat jenuh: mengendap
endapan terbentuk sampai Q turun menjadi = K

Bandingkan Q_{sp} dengan K_{sp}. Di sebelah kanan garis, larutan "kelebihan muatan" ion sehingga sebagian ion bergandengan membentuk padatan sampai $Q_{sp} = K_{sp}$.

ATURAN · ENDAPAN ATAU TIDAK?

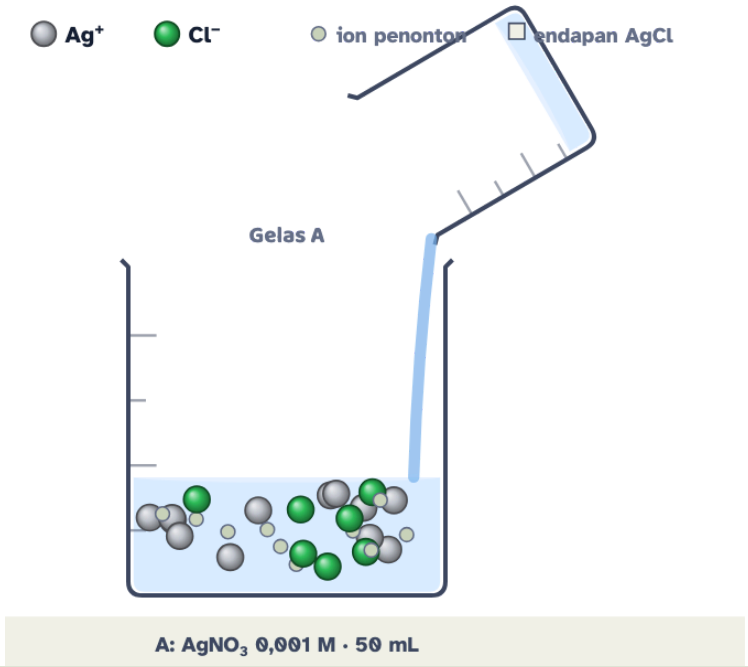
- $Q_{sp} < K_{sp}$: larutan **belum jenuh**; tidak ada endapan.
- $Q_{sp} = K_{sp}$: larutan **tepat jenuh**; endapan belum (atau tepat akan) terbentuk.
- $Q_{sp} > K_{sp}$: larutan **lewat jenuh**; endapan terbentuk sampai Q_{sp} turun menjadi K_{sp}.

AWAS JEBAKAN

Saat dua larutan dicampur, volumenya bertambah, jadi setiap ion **terencerkan**. Hitung dulu konsentrasi setelah dicampur, $c_{\text{baru}} = \dfrac{c \times V}{V_{\text{total}}}$, baru masukkan ke Q_{sp}. Mencampur volume yang sama berarti setiap konsentrasi menjadi setengahnya.

LAB MINI Campur & Lihat: endapan atau tetap jernih?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28



$Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl\downarrow$

Sebelum dicampur

A: $AgNO_3$ 0,001 M

B: NaCl 0,001 M

Volume total nanti 100 mL

Qsp = $[Ag^+][Cl^-]$

Ksp AgCl = $1{,}8 \times 10^{-10}$

Mengendap atau tidak?

Tebak dulu, lalu tekan ▶

(atau ketuk gelas B)

[kation] campuran	[anion] campuran	Qsp	Ksp
–	–	–	$1{,}8 \times 10^{-10}$

Hasil	Massa endapan
Tebak dulu, lalu tekan ▶ Jalankan	–

Pilih pasangan larutan, atur konsentrasi dan volume, lalu **tebak dulu** sebelum menekan ▶ Jalankan untuk menuang. Coba buat AgCl *hampir* mengendap tetapi tetap jernih. Lalu bandingkan: mengapa Ag_2CrO_4 dan PbI_2 lebih "peka" terhadap kenaikan konsentrasi ion yang dipangkatkan dua? Banyaknya bola hanyalah kesan (skala logaritma), bukan jumlah ion sebenarnya. Senyawa timbal beracun: di laboratorium nyata, "hujan emas" PbI_2 hanya dikerjakan guru.

RUMUS HIDUP

Qsp setelah dua larutan dicampur ($AgNO_3$ + NaCl)

$$Q_{sp} = \frac{c_1\, V_1}{V_1 + V_2} \times \frac{c_2\, V_2}{V_1 + V_2}$$

Encerkan dulu setiap ion dengan volume total, baru kalikan. Jika hasilnya melewati Ksp AgCl ($1{,}8 \times 10^{-10}$), endapan putih muncul.

- c_1 Konsentrasi $AgNO_3$ mol/L
- V_1 Volume $AgNO_3$ mL
- c_2 Konsentrasi NaCl mol/L
- V_2 Volume NaCl mL
- Q_{sp} Hasil kali ion

HASIL KALI ION

$2{,}5 \times 10^{-11}$

Qsp < Ksp → tetap jernih (belum jenuh)

Setelah dicampur: $[Ag^+]$ = **5×10^{-6}** M dan $[Cl^-]$ = **5×10^{-6}** M. Qsp/Ksp = **0,139**.

Cek satuan: (mol/L) × (mol/L); mL saling mencoret dalam pecahan pengenceran ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-QSP-CAMPUR

KERJAKAN BERSAMA **Hujan emas atau tetap jernih?**

Sebanyak 50 mL $Pb(NO_3)_2$ 0,010 M dicampur dengan 50 mL KI 0,010 M. Apakah PbI_2 mengendap? Bagaimana jika kedua larutan hanya 0,0010 M? (K_{sp} $PbI_2 = 9{,}8 \times 10^{-9}$)

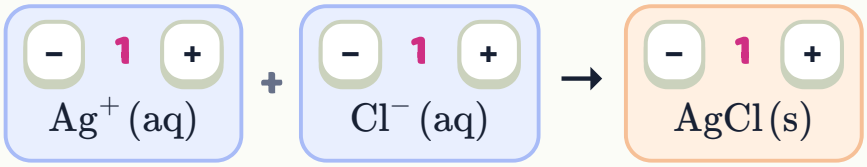
1. Volume total 100 mL, jadi setiap konsentrasi menjadi setengahnya: $[Pb^{2+}] = [I^-] = 0{,}0050$ M.
2. $Q_{sp} = [Pb^{2+}][I^-]^2 = (0{,}0050)(0{,}0050)^2 = 1{,}25 \times 10^{-7}$.
3. $1{,}25 \times 10^{-7} > 9{,}8 \times 10^{-9}$: **mengendap** kuning keemasan.
4. Pada 0,0010 M: $[Pb^{2+}] = [I^-] = 5{,}0 \times 10^{-4}$ M → $Q_{sp} = (5{,}0 \times 10^{-4})^3 = 1{,}25 \times 10^{-10} < K_{sp}$: **tetap jernih**.

Mengencerkan 10 kali menurunkan Q_{sp} 1.000 kali karena ada tiga ion dalam rumusnya (10^3). Itulah sebabnya garam tipe AB_2 sangat peka terhadap pengenceran.

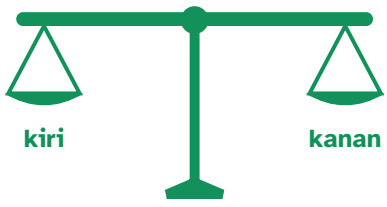
Saat endapan terbentuk, ion-ion yang tidak ikut mengendap (misalnya K^+ dan NO_3^-) hanya menonton. Kita menulis **persamaan ion bersih** tanpa **ion penonton** itu:

$$Pb(NO_3)_2\,(aq) + 2\,KI\,(aq) \longrightarrow PbI_2\,(s) + 2\,KNO_3\,(aq$$

PENYETARA REAKSI **Setarakan persamaan ion bersih pengendapan**



Unsur	Kiri	Kanan	
Ag	1	1	✓
Cl	1	1	✓
muatan	0	0	✓



✅ **Setara!** $Ag^+(aq) + Cl^-(aq) \longrightarrow AgCl(s)$

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 7

✓ pernah kamu setarakan

Perhatikan baris **muatan** di tabel: pada persamaan ion, muatan kiri dan kanan juga harus sama. Persamaan keenam adalah resep stalaktit, dan yang terakhir menunjukkan endapan AgCl yang larut kembali dalam amonia (subbab 28.6).

UJI ION GAYA IGCSE

Pengendapan dipakai untuk mengenali ion. **Halida:** asamkan dengan asam nitrat encer, tambah perak nitrat → endapan **putih** (Cl^-), **krem** (Br^-), atau **kuning** (I^-). **Sulfat:** asamkan dengan asam klorida encer, tambah barium klorida (atau barium nitrat) → endapan **putih** $BaSO_4$. Asam ditambahkan lebih dulu untuk menyingkirkan ion karbonat, yang juga membentuk endapan dan bisa menipu.

TRIK KAK TIRTA

"**Encerkan, pecah, pangkatkan, bandingkan.**" (1) Hitung konsentrasi setelah dicampur. (2) Pecah garam menjadi ion-ionnya. (3) Pangkatkan sesuai koefisien. (4) Bandingkan dengan K_{sp}. Seperti memasak sambal: takar, ulek, cicipi, putuskan!

ADU CEPAT — Qsp campuran bervolume sama

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Volume menjadi dua kali lipat, jadi setiap konsentrasi menjadi setengahnya. Qsp = [Ag⁺][Cl⁻]. Boleh menulis 2,5e-5.

KIMIA NUSANTARA · DARI GARAM KROSOK KE GARAM MEJA

Garam krosok dari tambak di Madura dan pesisir utara Jawa tidak hanya berisi NaCl. Ada juga ion Mg^{2+}, Ca^{2+}, dan SO_4^{2-} yang membuat garam terasa agak pahit dan mudah lembap. Di industri pemurnian, larutan garam dapat ditambah natrium karbonat dan natrium hidroksida sehingga Ca^{2+} mengendap sebagai $CaCO_3$ dan Mg^{2+} sebagai $Mg(OH)_2$. Endapan disaring, lalu larutannya dikristalkan kembali. NaCl yang sangat mudah larut tetap tinggal di larutan: pengendapan selektif dalam skala pabrik!

28.4 Efek ion senama

Tebak Dulu!

Ke dalam larutan jenuh AgCl (dengan sedikit endapan di dasar) ditambahkan sesendok garam dapur, NaCl. Apa yang terjadi?

- Lebih banyak AgCl larut, karena garam membantu melarutkan garam.
- Tidak ada perubahan, karena NaCl tidak bereaksi dengan AgCl.
- Endapan AgCl bertambah, dan kelarutan AgCl turun.
- K_{sp} AgCl turun karena ada zat lain.

Jawabannya: endapan bertambah. NaCl menambah $\mathrm{Cl^-}$, ion yang juga dimiliki AgCl. $Q_{sp} = [\mathrm{Ag^+}][\mathrm{Cl^-}]$ mendadak melebihi K_{sp}, jadi sebagian $\mathrm{Ag^+}$ "ditangkap" kembali menjadi AgCl padat. K_{sp} tidak berubah (suhu tetap); yang berubah adalah kelarutannya.

Inilah **efek ion senama**: kelarutan garam sukar larut **turun** bila larutan sudah mengandung salah satu ionnya. Menurut asas Le Chatelier (Bab 22), menambah $\mathrm{Cl^-}$ menggeser kesetimbangan $\mathrm{AgCl(s)} \rightleftharpoons \mathrm{Ag^+ + Cl^-}$ ke kiri.

ATURAN · KELARUTAN DENGAN ION SENAMA

Untuk garam AB dalam larutan yang sudah berisi ion senama c mol/L: $K_{sp} = s\,(s + c)$. Bila c jauh lebih besar daripada s, maka $s + c \approx c$, sehingga

$$s \approx \frac{K_{sp}}{c} \quad (\mathrm{AB}) \qquad\qquad s \approx \frac{K_{sp}}{c^2} \quad (\mathrm{AB_2}\text{ dengan ion senama B})$$

Contoh: dalam air murni AgCl larut $1{,}34 \times 10^{-5}$ M. Dalam NaCl 0,10 M, $s = 1{,}8 \times 10^{-10}/0{,}10 = 1{,}8 \times 10^{-9}$ M, sekitar **7.400 kali lebih kecil**. Kimiawan analisis memanfaatkan ini: endapan dicuci dengan larutan yang mengandung ion senama supaya endapannya tidak ikut larut.

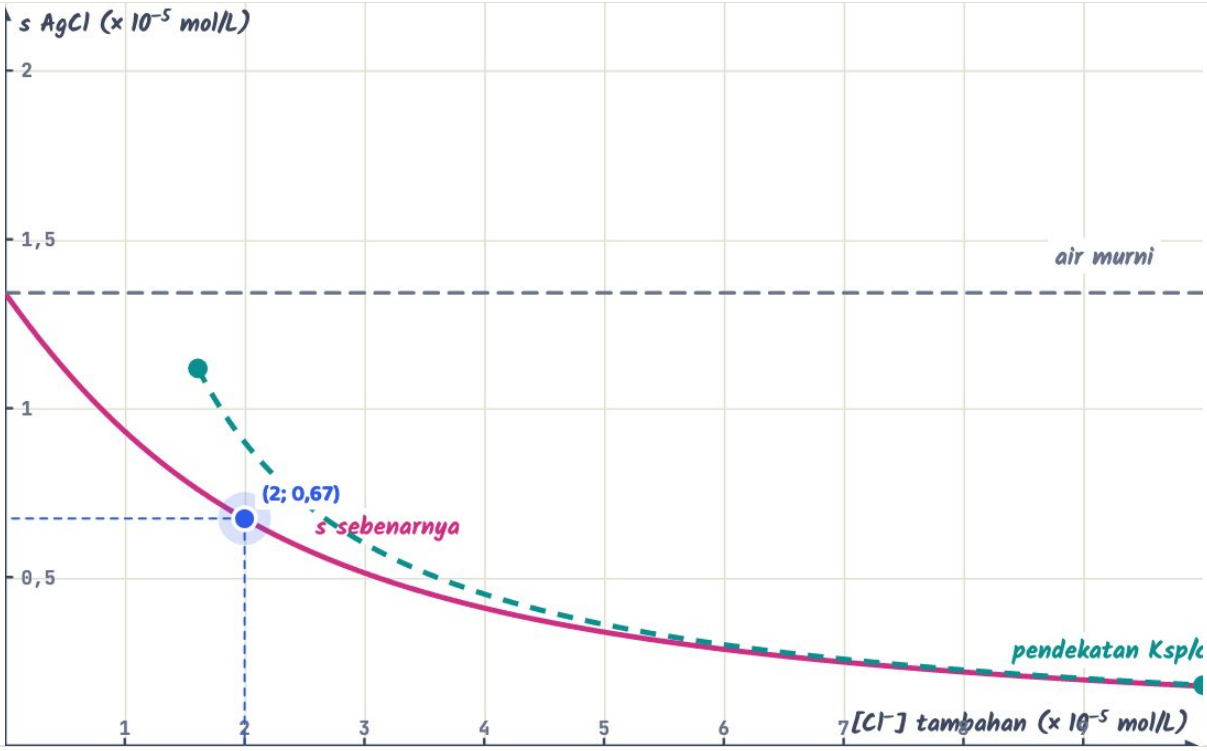
GRAFIK HIDUP

Ion senama menekan kelarutan AgCl

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28

$$s = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 4K_{sp}}}{2}$$

$$[\mathrm{Cl^-}]_{\text{tambahan}} = 2 \times 10^{-5}\ \mathrm{M} \Rightarrow s = 0{,}67 \times 10^{-5}\ \mathrm{M}$$



s (mol/L)	dibanding air murni	galat pendekatan Ksp/c
6,73 × 10⁻⁶	50,2 %	33,7 %

Seret titik biru ke kanan untuk menambah ion $\mathrm{Cl^-}$. Kurva magenta adalah kelarutan sebenarnya; garis putus-putus teal adalah pendekatan $s \approx K_{sp}/c$. Pada $[\mathrm{Cl^-}]$ berapa keduanya mulai berimpit? Ubah K_{sp}: apakah polanya sama?

RUMUS HIDUP

Kelarutan garam AB bila ada ion senama

$$s = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 4K_{sp}}}{2} \approx \frac{K_{sp}}{c}$$

Ion senama yang sudah ada membuat larutan cepat jenuh. Bila c jauh lebih besar daripada s, kelarutan cukup dihitung Ksp dibagi c.

- K_{sp} Hasil kali kelarutan
- c Konsentrasi ion senama mol/L
- s Kelarutan mol/L

KELARUTAN

$1{,}8 \times 10^{-9}$

mol/L

c jauh di atas √Ksp: pendekatan s ≈ Ksp/c sangat baik

AgCl dalam NaCl 0,1 M: s ≈ 1,8 × 10⁻⁹ M

Di air murni s = **1,342 × 10⁻⁵** M. Dengan ion senama **0,1** M, kelarutan menjadi **1,8 × 10⁻⁹** M, turun **7.453,56** kali.

Cek satuan: mol/L ✔ (rumus kuadrat diubah ke bentuk yang stabil secara numerik)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KSP-SENAMA

COBA SENDIRI **Ion senama mana yang lebih ampuh?**

Hitung kelarutan Ag_2CrO_4 ($K_{sp} = 1{,}1 \times 10^{-12}$) dalam (a) $AgNO_3$ 0,10 M dan (b) K_2CrO_4 0,10 M. Ion senama mana yang lebih menekan kelarutan? Mengapa?

1. (a) $[Ag^+] = 0{,}10 + 2s \approx 0{,}10$: $K_{sp} = (0{,}10)^2 \cdot s \rightarrow s = 1{,}1 \times 10^{-12}/0{,}010 = 1{,}1 \times 10^{-10}$ M.
2. (b) $[CrO_4^{2-}] = 0{,}10 + s \approx 0{,}10$: $K_{sp} = (2s)^2(0{,}10) \rightarrow 4s^2 = 1{,}1 \times 10^{-11} \rightarrow s = 1{,}7 \times 10^{-6}$ M.
3. Cek pendekatan: kedua nilai s jauh lebih kecil daripada 0,10, jadi sah.

Ion senama Ag^+ (a) menekan kelarutan ±15.000 kali lebih kuat daripada CrO_4^{2-} (b), karena $[Ag^+]$ dikuadratkan di ungkapan K_{sp}. Ion yang pangkatnya besar adalah "tuas" yang paling ampuh.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

EFEK GARAM: KETIKA ION ASING JUSTRU MENAMBAH KELARUTAN

Anehnya, menambahkan garam **tanpa** ion senama, misalnya KNO_3, sedikit *menaikkan* kelarutan AgCl. Ion-ion asing mengerumuni Ag^+ dan Cl^- dengan "awan" muatan lawan sehingga keduanya kurang leluasa bergandengan. Secara termodinamika, K_{sp} sebenarnya ditulis dengan **aktivitas**, $K_{sp} = a_{Ag^+}\, a_{Cl^-} = \gamma_{\pm}^2\, [Ag^+][Cl^-]$, dengan koefisien aktivitas $\gamma_{\pm} < 1$ dalam larutan berkekuatan ion tinggi. Untuk larutan encer (yang kita pakai di sekolah), $\gamma \approx 1$ sehingga konsentrasi cukup akurat.

Pada ion senama yang sangat pekat, kelarutan bisa *naik* lagi karena terbentuk ion kompleks seperti $[AgCl_2]^-$. Jadi kurva "s turun terus" hanya berlaku pada rentang konsentrasi sedang.

28.5 pH, CO_2, dan kelarutan: dari gigi sampai gua

Apa persamaan gigi, kapur, dan obat maag? Ketiganya garam yang **anionnya basa**: OH^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, atau F^-. Asam (ion H^+) "mencuri" anion itu dari larutan. Konsentrasinya turun, Q_{sp} turun di bawah K_{sp}, dan padatan terus larut untuk menggantikannya.

$$CaCO_3\,(s) \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-} \qquad CO_3^{2-} + 2\,H^+ \longrightarrow$$

ATURAN · PH DAN KELARUTAN

Garam dengan anion basa lemah atau kuat (OH^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, F^-, S^{2-}, oksalat) **lebih larut dalam asam**. Garam dengan anion yang hampir tidak bersifat basa (Cl^-, Br^-, I^-, SO_4^{2-}, NO_3^-) kelarutannya **hampir tidak dipengaruhi pH**.

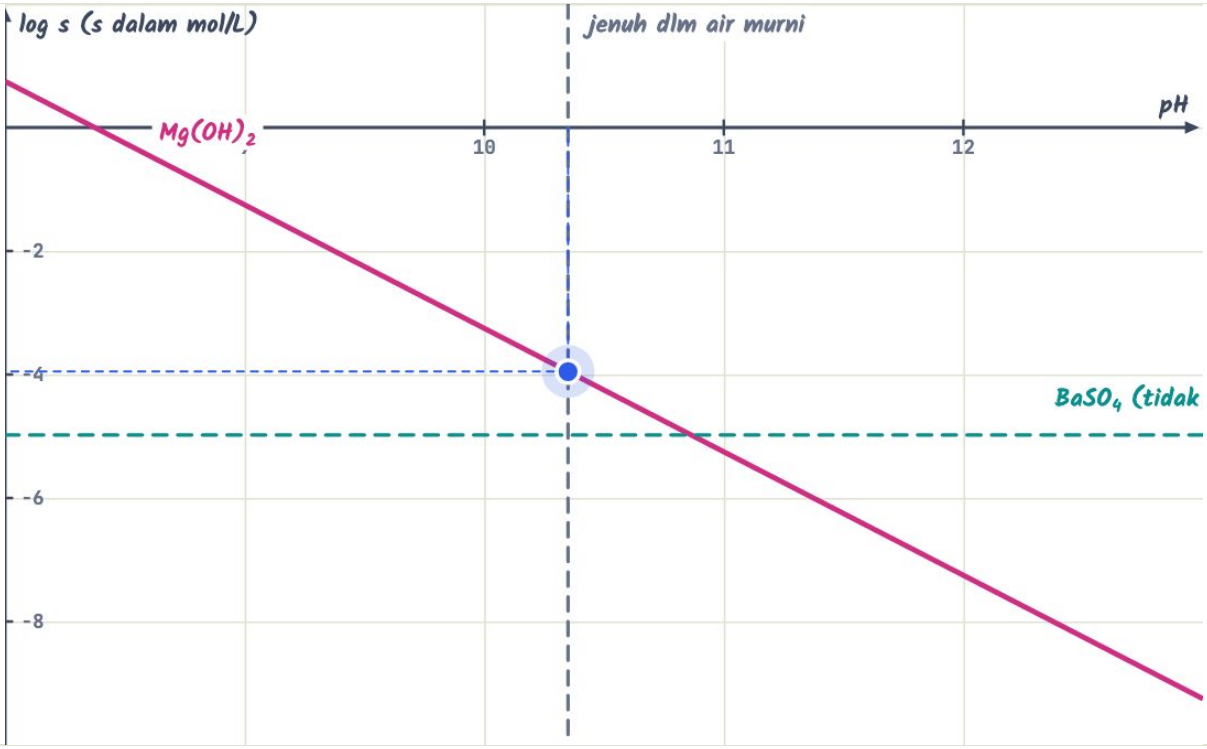
Contoh penting: $\mathrm{BaSO_4}$ dipakai sebagai "bubur barium" untuk foto rontgen saluran cerna. Ion $\mathrm{Ba^{2+}}$ beracun, tetapi $\mathrm{BaSO_4}$ begitu sukar larut dan tidak terpengaruh asam lambung, sehingga aman. Sebaliknya $\mathrm{BaCO_3}$ **berbahaya** diminum: asam lambung melarutkannya dan melepaskan $\mathrm{Ba^{2+}}$.

GRAFIK HIDUP **pH menentukan nasib $\mathrm{Mg(OH)_2}$ (dan tidak peduli pada $\mathrm{BaSO_4}$)**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28

$$\log s = \log K_{sp} + 28 - 2\,\mathrm{pH}$$

$$\mathrm{pH} = 10{,}35 \Rightarrow s_{\mathrm{Mg(OH)_2}} = 10^{-3{,}95}\ \mathrm{M}$$



s $\mathrm{Mg(OH)_2}$	$[\mathrm{OH^-}]$	$\mathrm{Mg(OH)_2}$ larut
$1{,}12 \times 10^{-4}$ mol/L	$2{,}24 \times 10^{-4}$ mol/L	0,01 g/L

Turunkan pH satu satuan: kelarutan $\mathrm{Mg(OH)_2}$ naik 100 kali (karena $[\mathrm{OH^-}]$ dikuadratkan). Bandingkan dengan garis $\mathrm{BaSO_4}$ yang datar. Di lambung (pH ±2), $\mathrm{Mg(OH)_2}$ larut habis sambil menetralkan asam.

Gigi: perang asam dan fluorida

Email gigi tersusun atas **hidroksiapatit**, $\mathrm{Ca_5(PO_4)_3OH}$, garam yang sangat sukar larut. Setelah kita makan gula, bakteri di plak mengubahnya menjadi asam. Bila pH di permukaan gigi turun di bawah ±5,5, ion $\mathrm{OH^-}$ dan $\mathrm{PO_4^{3-}}$ "dicuri" oleh $\mathrm{H^+}$ dan email perlahan larut (demineralisasi):

$$\mathrm{Ca_5(PO_4)_3OH\,(s) + 4\,H^+\,(aq) \longrightarrow 5\,Ca^{2+}\,(aq) + 3\,HP}$$

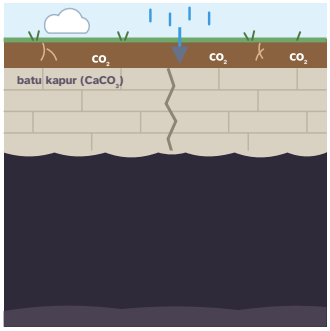
Ion fluorida dari pasta gigi menggantikan $\mathrm{OH^-}$ dan membentuk **fluorapatit**, yang lebih sukar larut dan anionnya ($\mathrm{F^-}$) jauh lebih lemah sifat basanya. Fluorapatit baru mulai larut pada pH sekitar 4,5.

$$\mathrm{Ca_5(PO_4)_3OH\,(s) + F^-\,(aq) \longrightarrow Ca_5(PO_4)_3F\,(s) + Ol}$$

Gua kapur: $\mathrm{CO_2}$ sebagai saklar

Air hujan yang meresap ke tanah menyerap $\mathrm{CO_2}$ dan menjadi asam lemah. Air itu melarutkan batu kapur karena $\mathrm{CO_3^{2-}}$ diubah menjadi $\mathrm{HCO_3^-}$. Saat air tiba di gua yang udaranya miskin $\mathrm{CO_2}$, reaksinya berbalik arah.

$$\mathrm{CaCO_3\,(s) + CO_2\,(aq) + H_2O\,(l) \rightleftharpoons Ca^{2+}\,(aq) + 2\,H}$$

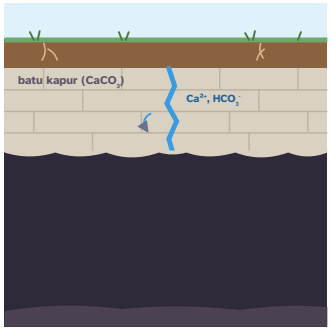


1 · Hujan menyerap CO_2

$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$

Udara di pori tanah kaya CO_2 dari akar dan mikroba, bisa puluhan kali udara biasa. Air yang meresap menjadi asam lemah.

Langkah 1. Air hujan meresap ke tanah. Akar tanaman dan mikroba membuat udara di pori tanah kaya CO_2, sehingga air menjadi asam karbonat yang lemah.

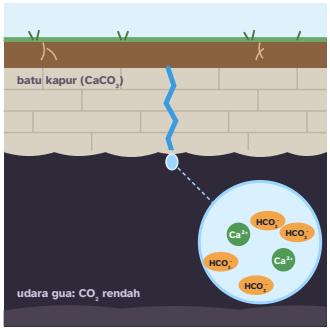


2 · Batu kapur larut

$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^-$

Asam mengubah CO_3^{2-} menjadi HCO_3^-, jadi Qsp $CaCO_3$ tetap di bawah Ksp: kapur terus larut. Celah melebar menjadi lorong gua.

Langkah 2. Air asam merembes lewat celah batu kapur. H^+ dari asam karbonat mengubah CO_3^{2-} menjadi HCO_3^-, jadi Q_{sp} $CaCO_3$ tetap di bawah K_{sp} dan batu kapur terus larut. Selama ribuan tahun celah melebar menjadi lorong gua.

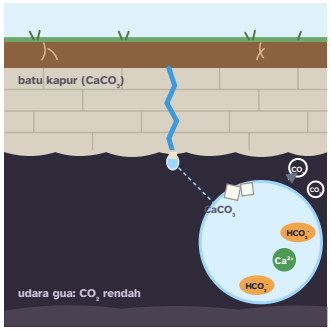


3 · Tetesan di atap gua

membawa Ca^{2+} + HCO_3^-

Udara gua jauh lebih miskin CO_2 daripada udara tanah. Tetesan yang tiba di atap tidak lagi setimbang dengan udara di sekitarnya.

Langkah 3. Air yang kini kaya Ca^{2+} dan HCO_3^- menetes dari atap gua. Udara gua mengandung jauh lebih sedikit CO_2 daripada udara tanah.

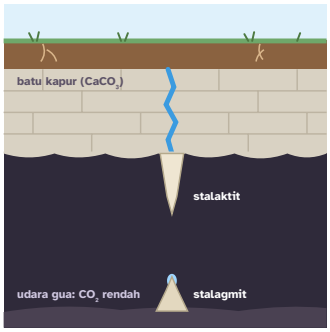


4 · CO_2 kabur, kapur muncul

$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$

CO_2 lepas dari tetesan. Kesetimbangan bergeser ke arah $CaCO_3$: $[CO_3^{2-}]$ naik, Qsp > Ksp, cincin kapur mengendap di tepi tetesan.

Langkah 4. CO_2 lepas dari tetesan ke udara gua. Sesuai asas Le Chatelier, kesetimbangan bergeser ke arah pembentukan $CaCO_3$: $Q_{sp} > K_{sp}$ dan cincin kapur halus mengendap di tepi tetesan.

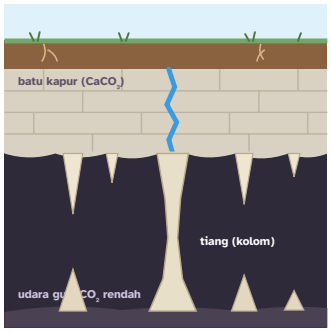


5 · Tumbuh dua arah

stalaktit ↓ stalagmit ↑

Cincin $CaCO_3$ memanjang jadi "pipa sedotan", lalu stalaktit. Tetesan yang jatuh melepas CO_2 lagi di lantai gua: stalagmit tumbuh ke atas.

Langkah 5. Cincin itu memanjang menjadi "pipa sedotan" lalu stalaktit yang menggantung. Tetesan yang jatuh ke lantai melepas CO_2 lagi, sehingga stalagmit tumbuh dari bawah.



6 · Ribuan tahun kemudian

±0,1 mm per tahun

Kira-kira 1 cm per abad, bergantung pada derasnya tetesan dan kadar CO_2. Akhirnya stalaktit dan stalagmit bertemu: tiang!

Langkah 6. Laju pertumbuhan rata-rata hanya sekitar 0,1 mm per tahun (sekitar 1 cm per abad), bisa lebih lambat atau lebih cepat. Setelah ribuan sampai puluhan ribu tahun, keduanya bertemu menjadi tiang (kolom).

TRIK KAK TIRTA (DIBISIKKAN KIMO)

StalakTit itu Tergantung dari atap; stalagMit itu Mencuat dari lantai. Dan keduanya sama-sama $CaCO_3$ yang "terusir" dari air karena CO_2-nya kabur.

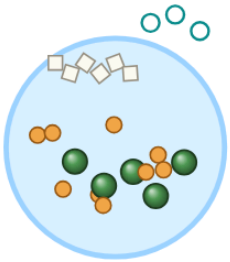
LAB MINI

Gua Waktu: tumbuhkan stalaktitmu sendiri

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28



Di dalam setetes air



Ca^{2+} HCO_3^- $CaCO_3$

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$$

136 mg $CaCO_3$ per liter bisa mengendap

599 tahun

≈ 6 abad · laju 10,6 mm/abad

Waktu berlalu	Panjang stalaktit	Tinggi stalagmit	Ca^{2+} dalam tetesan
600 tahun	6,3 cm	11,9 cm	80 mg/L

$CaCO_3$ yang bisa mengendap	Laju stalaktit
136 mg/L	10,6 mm/abad

Atur kadar CO_2 di tanah dan di udara gua, kecepatan tetesan, lalu tekan ▶ Jalankan. Satu detik di layar bisa berarti ratusan tahun! Apa yang terjadi bila udara gua sama kaya CO_2-nya dengan udara tanah? Mengapa gua yang ramai dikunjungi orang (napas manusia menambah CO_2) bisa memperlambat pertumbuhan stalaktit? Model ini disederhanakan: hanya sebagian kecil kapur terlarut yang benar-benar menempel di stalaktit.

ID

KIMIA NUSANTARA · GUA GONG DAN KARST GUNUNG SEWU

Di selatan Jawa, dari Gunungkidul (DIY), Wonogiri, sampai Pacitan, terbentang **karst Gunung Sewu**: ribuan bukit kerucut batu kapur yang diakui UNESCO sebagai Global Geopark sejak 2015. Di bawahnya tersembunyi ratusan gua dan sungai bawah tanah. **Gua Gong** di Pacitan terkenal dengan stalaktit dan stalagmit raksasa; konon namanya berasal dari bunyi mirip gong saat batuannya diketuk. Setiap ornamen di sana adalah catatan ribuan tahun pertarungan antara Q_{sp} dan K_{sp}. Karena tumbuhnya sangat lambat, menyentuh atau mematahkannya berarti merusak karya alam yang tidak tergantikan dalam umur manusia.

Air sadah dan kerak teko

Air sumur di daerah kapur seperti Gunungkidul mengandung banyak Ca^{2+} dan HCO_3^-. Air semacam ini disebut **air sadah**. Saat direbus, CO_2 terusir dari air panas (dan kelarutan $CaCO_3$ pun turun), sehingga terjadi "stalaktit

mini" di dasar teko:

$$\mathrm{Ca(HCO_3)_2\,(aq)} \xrightarrow{\Delta} \mathrm{CaCO_3\,(s) + CO_2\,(g) + H_2O\,(l)}$$

Cara membersihkannya memakai prinsip pH: rendam kerak dengan cuka atau air jeruk nipis. Asam mengubah karbonat menjadi $\mathrm{CO_2}$, sehingga kerak larut sambil berbuih halus:

$$\mathrm{CaCO_3\,(s) + 2\,CH_3COOH\,(aq) \longrightarrow Ca(CH_3COO)_2\,(a}$$

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BERAPA BANYAK KAPUR YANG DIBAWA AIR GUA?

Gabungkan empat kesetimbangan: K_{sp} kalsit, hukum Henry untuk $\mathrm{CO_2}$ (K_H), serta K_{a1} dan K_{a2} asam karbonat. Hasilnya satu reaksi total:

$$\mathrm{CaCO_3\,(s) + CO_2\,(g) + H_2O\,(l) \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2\,HCO_3^-} \qquad K = \frac{K_{sp}\,K_H\,K_{a1}}{K_{a2}} \approx 1{,}1 \times 10^{-6}$$

Karena $[\mathrm{HCO_3^-}] \approx 2[\mathrm{Ca^{2+}}]$, maka $K = \dfrac{4[\mathrm{Ca^{2+}}]^3}{p_{\mathrm{CO_2}}}$, sehingga $[\mathrm{Ca^{2+}}] = \sqrt[3]{K\,p_{\mathrm{CO_2}}/4}$. Untuk udara biasa ($p_{\mathrm{CO_2}} \approx 0{,}0004$ atm), $[\mathrm{Ca^{2+}}] \approx 4{,}7 \times 10^{-4}$ M. Untuk udara tanah dengan 3% $\mathrm{CO_2}$ (0,03 atm), $[\mathrm{Ca^{2+}}] \approx 2{,}0 \times 10^{-3}$ M, sekitar 80 mg Ca per liter. Selisih itulah yang "dijatuhkan" air di dalam gua. Lab Mini **Gua Waktu** memakai persamaan ini.

KESELAMATAN · AIR KAPUR



Merusak mata



Iritasi kulit

Air kapur sirih (larutan jenuh $\mathrm{Ca(OH)_2}$) ber-pH sekitar 12,4. Cipratannya bisa merusak mata. Pakai kacamata pelindung, hembuskan napas pelan lewat sedotan dan **jangan pernah menyedot**, jangan diminum, dan bilas kulit atau mata yang terkena dengan air mengalir selama 15 menit.

Hal serupa terjadi di tubuh. Batu ginjal yang paling umum tersusun atas **kalsium oksalat**, $\mathrm{CaC_2O_4}$ (K_{sp} sekitar $2{,}3 \times 10^{-9}$). Bila urine terlalu pekat, $Q_{sp} = [\mathrm{Ca^{2+}}][\mathrm{C_2O_4^{2-}}]$ melampaui K_{sp} dan kristal mulai tumbuh. Itulah sebabnya dokter biasanya menganjurkan cukup minum air putih: urine yang lebih encer menjaga Q_{sp} tetap di bawah K_{sp}.

Lanjut: pengendapan selektif, uji ion, dan ion kompleks

28.6

Bayangkan larutan yang berisi dua anion, misalnya Cl^- dan CrO_4^{2-}. Bila perak nitrat diteteskan sedikit demi sedikit, siapa yang mengendap lebih dulu? Jawabannya: garam yang membutuhkan $[Ag^+]$ **paling kecil** untuk mencapai K_{sp}-nya. Teknik memisahkan ion dengan cara ini disebut **pengendapan selektif**.

COBA SENDIRI **Rahasia titrasi Mohr**

Larutan berisi Cl^- 0,010 M dan CrO_4^{2-} 0,010 M. Larutan $AgNO_3$ ditambahkan tetes demi tetes (abaikan perubahan volume). (a) Endapan mana yang terbentuk lebih dulu? (b) Berapa persen Cl^- yang sudah mengendap ketika Ag_2CrO_4 merah bata mulai muncul? (K_{sp} AgCl $= 1{,}8 \times 10^{-10}$; $Ag_2CrO_4 = 1{,}1 \times 10^{-12}$)

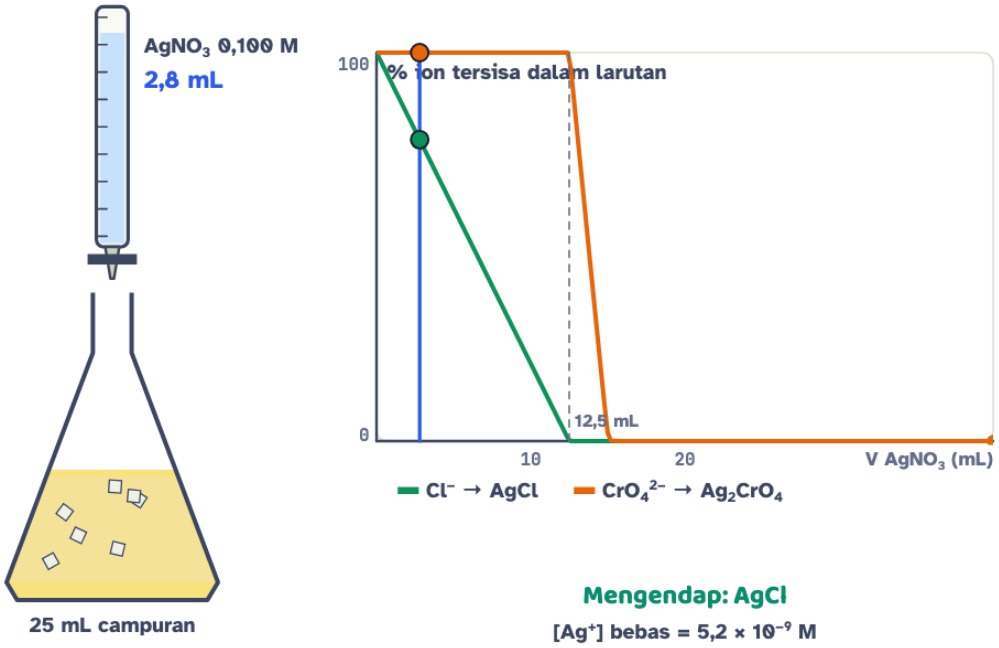
1. $[Ag^+]$ agar AgCl mulai mengendap: $1{,}8 \times 10^{-10} / 0{,}010 = 1{,}8 \times 10^{-8}$ M.
2. $[Ag^+]$ agar Ag_2CrO_4 mulai mengendap: $\sqrt{1{,}1 \times 10^{-12} / 0{,}010} = 1{,}05 \times 10^{-5}$ M.
3. (a) AgCl butuh $[Ag^+]$ ±580 kali lebih kecil, jadi **AgCl putih mengendap lebih dulu**, walaupun K_{sp}-nya lebih besar!
4. (b) Saat $[Ag^+] = 1{,}05 \times 10^{-5}$ M, sisa $[Cl^-] = 1{,}8 \times 10^{-10} / 1{,}05 \times 10^{-5} = 1{,}7 \times 10^{-5}$ M, yaitu 0,17% dari semula.

Ketika warna merah bata muncul, 99,8% Cl^- sudah mengendap. Itulah dasar titrasi Mohr untuk menentukan kadar garam (misalnya kadar NaCl dalam garam krosok atau air laut): ion kromat menjadi indikator titik akhir.

LAB MINI

Siapa Mengendap Duluan? Titrasi pengendapan

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28



[Ag⁺] bebas
5,16 × 10⁻⁹ M

pAg = −log[Ag⁺]
8,29

Ion tersisa
Cl⁻ 77,6% · CrO₄²⁻ 100%

Endapan (mmol)
AgCl 0,28 · Ag₂CrO₄ 0

Tambahkan larutan $AgNO_3$ 0,100 M dari buret ke 25 mL campuran anion. Perhatikan grafik "% ion tersisa": ion mana yang habis lebih dulu? Pada campuran Mohr, kapan warna merah bata muncul? Pada campuran tiga halida, berapa mL untuk setiap "anak tangga"? Kromat berbahaya bagi kesehatan, jadi titrasi Mohr nyata hanya dikerjakan dengan pengawasan guru.

Pengendapan juga menjadi "detektor" ion logam. Natrium hidroksida dan amonia mengendapkan hidroksida logam dengan warna khas. Bila pereaksi ditambahkan **berlebih**, beberapa endapan larut kembali, karena terbentuk ion kompleks atau karena hidroksidanya amfoter.

Ion logam	+ NaOH sedikit	+ NaOH berlebih	+ NH_3 berlebih
Al^{3+}	endapan putih $Al(OH)_3$	larut: $[Al(OH)_4]^-$	endapan putih tetap
Zn^{2+}	endapan putih $Zn(OH)_2$	larut: $[Zn(OH)_4]^{2-}$	larut: $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$
Ca^{2+}	endapan putih (sedikit)	tetap	tidak ada / sangat sedikit

Cu^{2+}	endapan biru muda $Cu(OH)_2$	tetap	larut, biru tua: $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$
Fe^{2+}	endapan hijau $Fe(OH)_2$	tetap	endapan hijau tetap
Fe^{3+}	endapan cokelat kemerahan $Fe(OH)_3$	tetap	endapan cokelat tetap

Ion kompleks juga bisa melarutkan endapan "keras kepala". Endapan AgCl larut dalam amonia encer karena Ag^+ dirangkul dua molekul NH_3 menjadi $[Ag(NH_3)_2]^+$. Konsentrasi Ag^+ bebas anjlok, Q_{sp} turun di bawah K_{sp}, dan endapan terus larut.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGHITUNG KELARUTAN AGCL DALAM AMONIA

Jumlahkan dua kesetimbangan; tetapan reaksi totalnya adalah hasil kali kedua tetapan:

$$AgCl(s) \rightleftharpoons Ag^+ + Cl^- \qquad K_{sp} = 1{,}8 \times 10^{-10}$$

$$Ag^+ + 2\,NH_3 \rightleftharpoons [Ag(NH_3)_2]^+ \qquad K_f = 1{,}6 \times 10^{7}$$

$$AgCl(s) + 2\,NH_3 \rightleftharpoons [Ag(NH_3)_2]^+ + Cl^- \qquad K = K_{sp}\,K_f = 2{,}9 \times 10^{-3}$$

Dalam NH_3 1,0 M: $\dfrac{s^2}{(1{,}0-2s)^2} = 2{,}9 \times 10^{-3}$ → $\dfrac{s}{1{,}0-2s} = 0{,}054$ → $s = 0{,}048$ M. Itu ±3.600 kali lebih larut daripada di air murni! Untuk AgI ($K_{sp} = 8{,}5 \times 10^{-17}$), cara yang sama memberi $s \approx 3{,}7 \times 10^{-5}$ M saja. Maka amonia encer dipakai untuk membedakan endapan AgCl (larut) dari AgI (tidak larut).

TAMU DARI MASA LALU · FOTO YANG TIDAK MEMUDAR

Foto-foto pertama di abad ke-19 terus menghitam bila terkena cahaya, karena sisa garam perak di kertas tetap peka cahaya. Pada 1819 **John Herschel** menemukan bahwa natrium tiosulfat ("hipo") melarutkan garam perak halida dengan membentuk ion kompleks $[Ag(S_2O_3)_2]^{3-}$. Sejak 1839 "hipo" dipakai sebagai *fixer* untuk mengawetkan foto, dan terus dipakai di kamar gelap selama lebih dari 150 tahun.

Kimia di sekitarmu

Kerak teko & air sadah

Air sumur di daerah kapur seperti Gunungkidul dan Tuban kaya $\mathrm{Ca^{2+}}$ dan $\mathrm{HCO_3^-}$. Saat direbus, $\mathrm{CaCO_3}$ mengendap menjadi kerak. Cuka atau air jeruk nipis melarutkannya kembali.

Pasta gigi berfluorida

Fluorida (sekitar 1.000–1.500 ppm) mengubah sebagian hidroksiapatit email menjadi fluorapatit yang lebih tahan asam dari sisa makanan manis.

"Bubur barium" rontgen

$\mathrm{BaSO_4}$ sangat sukar larut dan tidak terpengaruh asam lambung, sehingga aman diminum untuk memotret saluran cerna, walaupun ion $\mathrm{Ba^{2+}}$ bebas beracun.

Garam beryodium

Garam konsumsi diperkaya kalium iodat, $\mathrm{KIO_3}$, yang cukup larut untuk disemprotkan merata dan lebih stabil daripada KI di udara tropis yang panas dan lembap.

Batu ginjal

Kalsium oksalat mengkristal bila urine terlalu pekat ($Q_{sp} > K_{sp}$). Cukup minum air membantu menjaga ion-ionnya tetap terlarut.

Sabun susah berbusa

Di air sadah, ion $\mathrm{Ca^{2+}}$ mengendapkan anion sabun menjadi "daki sabun" lengket. Busanya sedikit dan cucian terasa kusam.

Limbah logam berat

Industri pelapisan logam menaikkan pH limbahnya sehingga ion seperti $\mathrm{Cu^{2+}}$, $\mathrm{Ni^{2+}}$, dan $\mathrm{Cr^{3+}}$ mengendap sebagai hidroksida yang bisa disaring sebelum air dibuang.

Cek Cepat

Ungkapan K_{sp} yang benar untuk Ag_2CrO_4 adalah ...

- $[Ag^+][CrO_4{}^{2-}]$
- $[Ag^+]^2[CrO_4{}^{2-}]$
- $[2Ag^+]^2[CrO_4{}^{2-}]$
- $[Ag^+]^2[CrO_4{}^{2-}]/[Ag_2CrO_4]$

Saat dua larutan dicampur, ternyata $Q_{sp} > K_{sp}$. Artinya ...

- larutan belum jenuh
- larutan tepat jenuh
- endapan terbentuk sampai $Q_{sp} = K_{sp}$
- garam menjadi lebih mudah larut

Ke dalam larutan jenuh CaF_2 ditambahkan NaF padat. Apa yang terjadi?

- Kelarutan CaF_2 turun dan endapannya bertambah
- K_{sp} CaF_2 turun
- K_{sp} CaF_2 naik
- Tidak ada pengaruh karena NaF mudah larut

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: kerak, cangkang telur, dan cuka

Bahan: 2 potong cangkang telur bersih (atau sedikit kerak teko), cuka dapur, air, 2 gelas bening, sendok, senter HP, spidol.

1. Isi gelas A dengan cuka dan gelas B dengan air, masing-masing setinggi 3 cm. Beri label.
2. Masukkan sepotong cangkang telur (atau kerak teko) ke setiap gelas. Amati permukaannya dengan senter HP selama 2 menit.
3. Biarkan semalam. Esoknya, bandingkan ukuran, kekerasan, dan warna kedua potongan.
4. Catat semua pengamatan dalam tabel, lalu foto hasilnya.

Keselamatan: kerjakan bersama orang dewasa. Cuka bisa perih di mata dan luka, jadi jauhkan dari wajah. Jangan pernah mencampur cuka dengan pemutih pakaian atau pembersih lain. Jangan mencicipi larutan. Buang cairan ke wastafel sambil dialiri air, dan cuci tangan sesudahnya.

Pertanyaan: Dari mana gelembung kecil di gelas cuka? Mengapa cangkang di dalam air tidak berubah, padahal $\mathrm{CaCO_3}$ juga "sedikit larut" dalam air? Hubungkan dengan cara membersihkan kerak teko dan dengan aturan "garam beranion basa lebih larut dalam asam".

RINGKASAN KILAT Bab 28 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **kelarutan** serta larutan tak jenuh, jenuh, dan lewat jenuh pada tingkat partikel
- menulis ungkapan **hasil kali kelarutan (K_{sp})** dan menghitung kelarutan s dari K_{sp} untuk garam AB, AB_2, A_2B, AB_3, dan A_2B_3
- memprediksi **terbentuknya endapan** dengan membandingkan Q_{sp} dan K_{sp}, lalu menulis persamaan ion bersihnya
- menjelaskan pengaruh **ion senama** dan **pH** terhadap kelarutan, dari gigi berlubang sampai stalaktit
- merancang **pengendapan selektif** dan menjelaskan larutnya endapan karena pembentukan **ion kompleks**

Istilah kunci

Kelarutan · kelarutan molar · Larutan tak jenuh · Larutan jenuh · Larutan lewat jenuh · aturan kelarutan · hasil kali kelarutan · endapan · hasil kali ion · persamaan ion bersih · ion penonton · efek ion senama · air sadah · pengendapan selektif

Rumus penting

$$K_{sp} = x^{x}\, y^{y}\, s^{x+y}$$

Ksp dari kelarutan (garam A_xB_y). Setiap mol garam yang larut melepas x mol kation dan y mol anion. Kalikan konsentrasi keduanya, masing-masing dipangkatkan koefisiennya.

$$s = \sqrt[3]{\frac{K_{sp}}{4}}$$

Kelarutan garam AB_2 dari Ksp. Untuk garam yang melepas satu ion dan dua ion pasangannya, Ksp = s × $(2s)^2$ = $4s^3$. Bagi Ksp dengan 4, lalu tarik akar pangkat tiga.

$$Q_{sp} = \frac{c_1\, V_1}{V_1 + V_2} \times \frac{c_2\, V_2}{V_1 + V_2}$$

Qsp setelah dua larutan dicampur ($AgNO_3$ + NaCl). Encerkan dulu setiap ion dengan volume total, baru kalikan. Jika hasilnya melewati Ksp AgCl ($1{,}8 \times 10^{-10}$), endapan putih muncul.

$$s = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 4K_{sp}}}{2} \approx \frac{K_{sp}}{c}$$

Kelarutan garam AB bila ada ion senama. Ion senama yang sudah ada membuat larutan cepat jenuh. Bila c jauh lebih besar daripada s, kelarutan cukup dihitung Ksp dibagi c.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Membandingkan K_{sp} untuk menentukan mana yang lebih larut hanya sah bila tipe rumusnya sama (AB dengan AB, AB_2 dengan AB_2).
- Saat dua larutan dicampur, volumenya bertambah, jadi setiap ion terencerkan.
- Merusak mataIritasi kulit Air kapur sirih (larutan jenuh $\mathrm{Ca(OH)_2}$) ber-pH sekitar 12,4.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=28

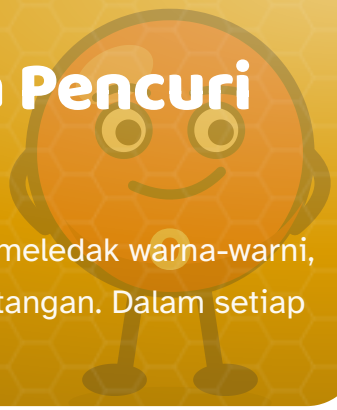
🧩 Teka-teki untuk Bab 29

Apel yang dipotong menjadi cokelat, paku berkarat, dan kembang api yang menyala: tiga peristiwa, satu tema. Di ketiganya ada sesuatu yang "dicuri" dari satu zat oleh zat lain. Apa yang dicuri?

▼ **Intip petunjuk**

Yang dicuri adalah **elektron**. Oksigen dan zat lain yang "rakus" mengambil elektron dari besi, dari zat dalam buah, atau dari logam di kembang api. Peristiwa serah-terima elektron ini disebut reaksi **redoks**. Bahkan garam beryodium bisa diuji dengan reaksi redoks: iodat mengubah iodida menjadi iodin yang membirukan kanji. Sampai jumpa di Bab 29!

29 Reaksi Redoks: Kisah Para Pencuri Elektron



Pagar yang berkarat, apel yang menjadi cokelat, kembang api yang meledak warna-warni, bahkan napasmu sendiri: semuanya kisah elektron yang berpindah tangan. Dalam setiap "pencurian" selalu ada yang kehilangan dan ada yang mendapat.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan oksidasi dan reduksi dengan **tiga definisi** (oksigen, hidrogen, elektron) dan memilih yang paling umum;
- menentukan **bilangan oksidasi** unsur dalam unsur bebas, senyawa, dan ion;
- mengenali **oksidator**, **reduktor**, reaksi **disproporsionasi**, dan **komproporsionasi**;
- menyetarakan reaksi redoks dengan **metode setengah reaksi** (suasana asam dan basa) dan **metode perubahan biloks**;
- menjelaskan redoks di sekitarmu (pemutih, uji napas alkohol, respirasi, fotosintesis, antioksidan) dan menghitung hasil **titrasi redoks**.

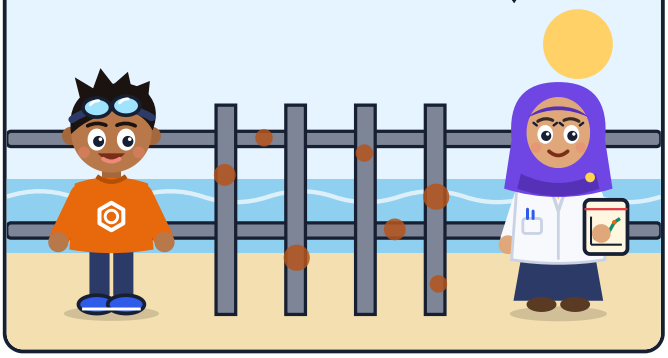
PENCURIAN DI PAGAR BESI

KOMIK · 4 PANEL

Pulang sekolah, di pagar tepi pantai

BIMA
Pagar ini cepat sekali berkarat. Besinya dimakan udara laut, ya?

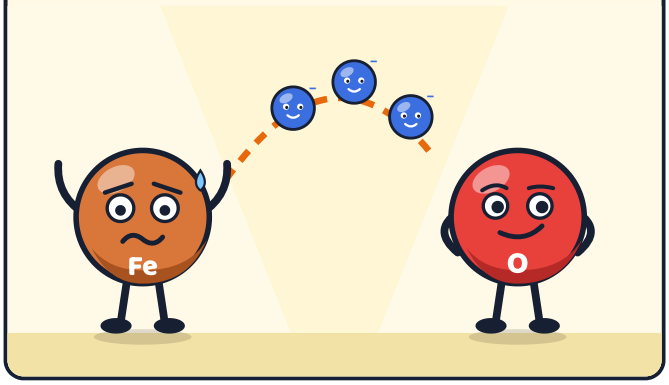
LARAS
Kalau dimakan, mestinya berkurang. Karat justru lebih berat daripada besinya!



Sementara itu, di dunia atom...

OKSIGEN
Serahkan elektronmu, Besi! Aku butuh dua lagi.

BESI
Tolong! Satu, dua, tiga... elektronku dicuri!





Tebak Dulu!

Pita magnesium dibakar di dalam gas klorin. Tidak ada oksigen sama sekali di dalam wadah. Apakah magnesium mengalami oksidasi?

- Tidak, karena oksidasi berarti bereaksi dengan oksigen.
- Ya, karena setiap atom Mg melepas dua elektron menjadi Mg^{2+}.
- Tidak, magnesium justru tereduksi karena mengikat klorin.
- Ya, tetapi hanya bila ada uap air di udara.

Jawabannya: ya, magnesium teroksidasi. Dalam $\mathrm{Mg} + \mathrm{Cl_2} \longrightarrow \mathrm{MgCl_2}$, setiap atom Mg melepas dua elektron dan klorin menerimanya. Oksigen tidak ikut, tetapi polanya persis sama dengan magnesium yang terbakar di udara. Karena itu kimiawan memakai definisi yang lebih luas: oksidasi adalah **pelepasan elektron**.

29.1 Tiga wajah redoks: oksigen, hidrogen, elektron

Kata *oksidasi* lahir dari oksigen. Dulu, sebuah zat disebut teroksidasi bila zat itu **bergabung dengan oksigen**: Fe berkarat, kayu terbakar, makanan "dibakar" di dalam sel menjadi $\mathrm{CO_2}$. Kebalikannya, *reduksi*, adalah **pelepasan oksigen**, seperti saat bijih logam diolah menjadi logam murni.

Bahasa sederhana · Bayangkan elektron sebagai kelereng kecil. Atom yang **memberikan** kelerengnya disebut teroksidasi. Atom yang **menerima** kelereng disebut tereduksi. Kelereng tidak bisa hilang begitu saja, jadi setiap kali ada yang memberi, pasti ada yang menerima. Itulah sebabnya oksidasi dan reduksi selalu terjadi bersamaan. Pasangan ini disebut **redoks** (reduksi + oksidasi).

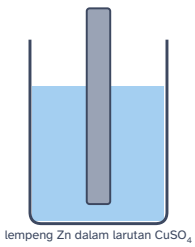
Lama-kelamaan kimiawan menemukan banyak reaksi tanpa oksigen yang polanya sama. Maka definisinya diperluas dua kali: lewat hidrogen, lalu lewat elektron. Definisi yang lebih baru tidak membuang yang lama; definisi lama menjadi *kasus khusus*.

Definisi	Oksidasi	Reduksi	Contoh
1. Oksigen	mengikat oksigen	melepas oksigen	$4\,\mathrm{Fe} + 3\,\mathrm{O_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{Fe_2O_3}$ (Fe teroksidasi) $\mathrm{CuO} + \mathrm{H_2} \longrightarrow \mathrm{Cu} + \mathrm{H_2O}$ (CuO tereduksi)
2. Hidrogen	melepas hidrogen	mengikat hidrogen	$\mathrm{H_2S} + \mathrm{Cl_2} \longrightarrow \mathrm{S} + 2\,\mathrm{HCl}$ ($\mathrm{H_2S}$ teroksidasi, $\mathrm{Cl_2}$ tereduksi)
3. Elektron	melepas elektron	menerima elektron	$\mathrm{Zn} \longrightarrow \mathrm{Zn^{2+}} + 2\,\mathrm{e^-}$ $\mathrm{Cu^{2+}} + 2\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{Cu}$
4. Biloks (29.2)	biloks naik	biloks turun	Mg: 0 → +2 (oksidasi)

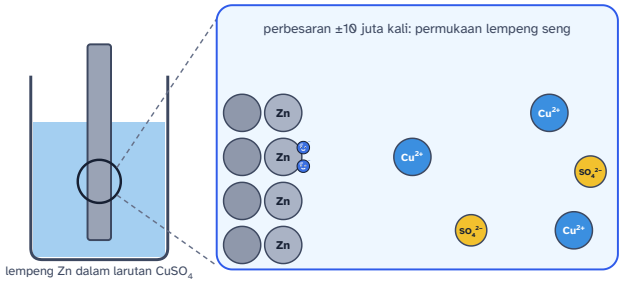
DEFINISI · OKSIDASI DAN REDUKSI

Oksidasi adalah peristiwa **pelepasan elektron** (biloks naik). **Reduksi** adalah peristiwa **penerimaan elektron** (biloks turun). Keduanya selalu berpasangan dalam satu reaksi yang disebut **reaksi redoks**. Mengikat oksigen atau melepas hidrogen hanyalah dua cara khusus untuk kehilangan elektron.

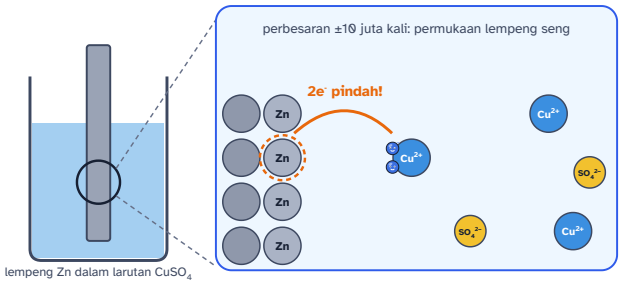
Mari lihat redoks di tiga tingkat sekaligus. Celupkan lempeng Zn ke larutan terusi (tembaga(II) sulfat) yang biru. Apa yang terlihat mata, apa yang dilakukan partikelnya, dan bagaimana kita menuliskannya?



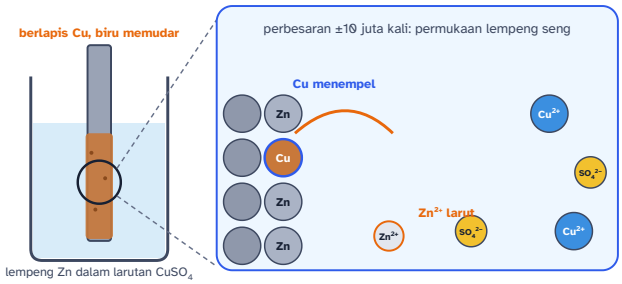
Langkah 1. Makroskopik. Lempeng seng dicelupkan ke larutan tembaga(II) sulfat yang biru. Beberapa menit kemudian lempeng berlapis serbuk merah-cokelat dan warna biru memudar.



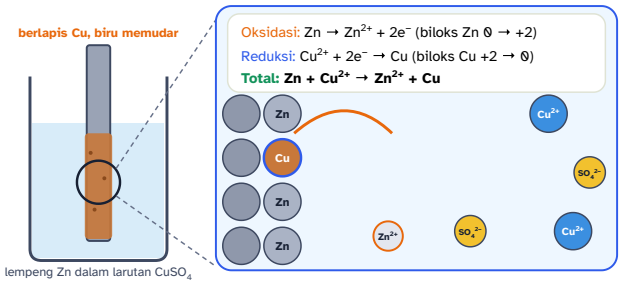
Langkah 2. Submikroskopik. Perbesar permukaan seng: ada atom Zn di lempeng dan ion Cu^{2+} (penyebab warna biru) di larutan. Ion SO_4^{2-} hanya menonton.



Langkah 3. Ketika ion Cu^{2+} menyentuh lempeng, **dua elektron** melompat dari satu atom Zn kepadanya.



Langkah 4. Atom Zn yang kehilangan 2 elektron menjadi ion Zn^{2+} yang larut (tak berwarna). Ion Cu^{2+} yang menerima 2 elektron menjadi atom Cu yang menempel di lempeng.



Langkah 5. Simbolik. Zn teroksidasi (melepas elektron, biloks naik); Cu^{2+} tereduksi (menerima elektron, biloks turun). Elektron yang dilepas sama banyak dengan elektron yang diterima.

TRIK KAK TIRTA · OPER–REBUT

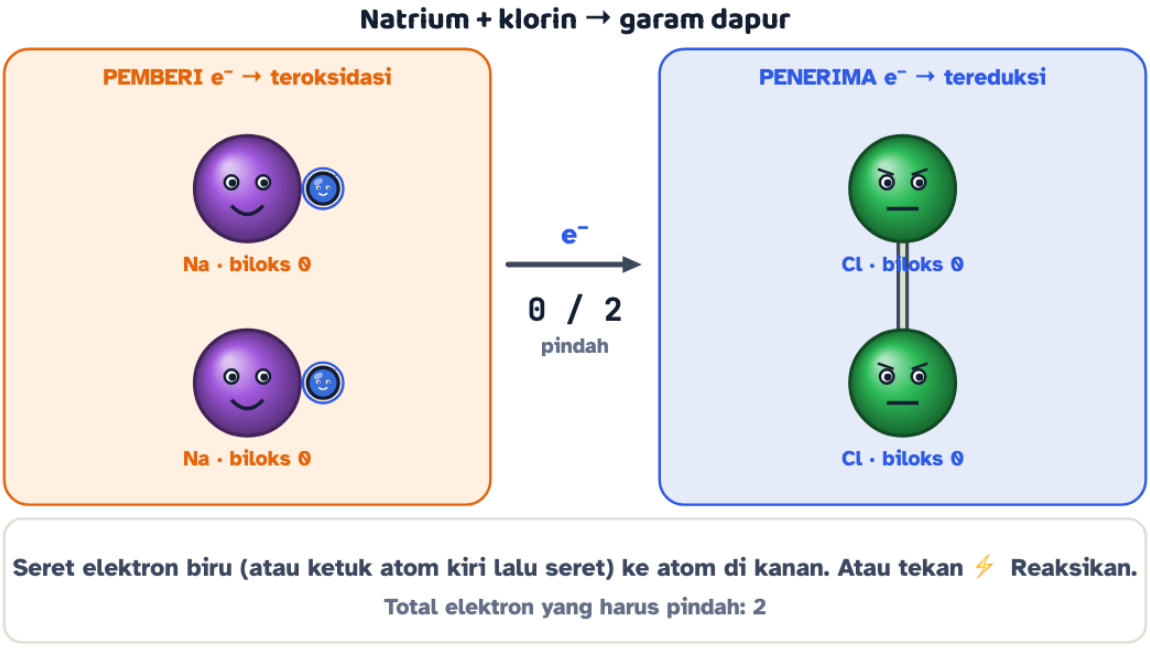
Oksidasi = meng**o**per elektron (melepas). **R**eduksi = me**r**ebut elektron (menerima). Dalam bahasa Inggris dikenal *OIL RIG*: *Oxidation Is Loss, Reduction Is Gain*. Seperti umpan dalam sepak bola, tidak ada operan tanpa penerima: jumlah elektron yang dioper selalu sama dengan yang direbut.

AWAS JEBAKAN

Oksidasi **tidak harus** melibatkan oksigen. Magnesium dalam gas klorin, natrium dengan klorin, dan seng dalam larutan terusi semuanya mengalami oksidasi tanpa oksigen sama sekali. Sebaliknya, reaksi yang melibatkan oksigen belum tentu redoks: $CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$ bukan redoks karena tidak ada biloks yang berubah.

LAB MINI **Pencuri Elektron: siapa memberi, siapa menerima?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-29



e⁻ dilepas	e⁻ diterima	Reduktor	Oksidator	Keadaan
0	0	?	?	belum ada

Pilih pasangan zat, lalu **seret elektron biru** dari atom pemberi (kiri) ke atom penerima (kanan), atau tekan ⚡ Reaksikan. Perhatikan biloks setiap atom dan wajahnya. Bisakah kamu memaksa atom yang sudah penuh menerima elektron lagi? Bandingkan karat (besi + oksigen) dengan besi(II) + klorin: atom besi yang sama bisa berhenti di biloks berbeda.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1770-an, **Antoine Lavoisier** di Paris membuktikan bahwa pembakaran adalah penggabungan dengan oksigen, bukan pelepasan "zat api" seperti yang dipercaya sebelumnya. Pada 1777 ia menamai gas itu *oxygène*, "pembentuk asam", karena ia (keliru) mengira semua asam mengandung oksigen; asam klorida membuktikan sebaliknya. Kata *reduksi* lebih tua lagi: dari bahasa Latin *reducere*, "membawa kembali". Para pandai logam "membawa kembali" logam dari bijihnya, dan gundukan bijih menyusut menjadi bongkah logam yang lebih kecil. Setelah elektron ditemukan J. J. Thomson (1897), kimiawan abad ke-20 merumuskan redoks sebagai perpindahan elektron.

29.2 Bilangan oksidasi: pembukuan elektron

Pada reaksi ion seperti natrium dengan klorin, mudah melihat siapa yang melepas elektron. Namun bagaimana dengan pembakaran gas alam, $\mathrm{CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O}$? Semua zatnya molekul kovalen, tidak ada ion. Elektron hanya *bergeser* di dalam ikatan, tidak berpindah penuh. Untuk melacaknya, kimiawan memakai alat pembukuan bernama **bilangan oksidasi** (biloks).

DEFINISI · BILANGAN OKSIDASI

Bilangan oksidasi adalah muatan yang *seandainya* dimiliki sebuah atom bila semua ikatannya dianggap ikatan ion, yaitu setiap pasangan elektron ikatan diberikan kepada atom yang lebih elektronegatif. Biloks ditulis dengan tanda di depan angka (+2, –1), sedangkan muatan ion ditulis dengan angka di depan tanda (2+, 1–).

Bahasa sederhana · Biloks itu seperti "saldo" elektron sebuah atom. Saldo nol berarti atom memegang elektronnya sendiri. Saldo positif berarti sebagian elektronnya ditarik pergi oleh atom lain. Saldo negatif berarti atom itu menarik elektron milik tetangganya.

ATURAN · MENENTUKAN BILOKS

1. Unsur bebas (Fe, O_2, Cl_2, S_8, P_4) biloksnya **0**.
2. Ion monoatom: biloks = muatannya (Na^+ = +1, S^{2-} = –2).
3. Jumlah biloks semua atom dalam senyawa netral = **0**; dalam ion poliatom = **muatan ion**.
4. Logam golongan 1 selalu +1, golongan 2 selalu +2, dan Al +3.
5. F selalu –1 (unsur paling elektronegatif).
6. H biasanya +1, kecuali dalam hidrida logam (NaH, CaH_2) = –1.
7. O biasanya –2, kecuali dalam peroksida (H_2O_2, Na_2O_2) = –1, superoksida (KO_2) = –½, dan OF_2 = +2.
8. Cl, Br, dan I biasanya –1, kecuali bila berikatan dengan O atau halogen yang lebih elektronegatif.

Bila dua aturan bertabrakan, aturan bernomor lebih kecil yang menang.

$$\sum(\text{jumlah atom} \times \text{biloks}) = \text{muatan spesi}$$

RUMUS HIDUP

Biloks unsur X dalam spesi

$$x = \frac{q - h\,(+1) - o\,(-2)}{n}$$

Biloks X sama dengan muatan spesi dikurangi sumbangan semua H dan O, lalu dibagi jumlah atom X.

- q Muatan spesi
- h Jumlah atom H
- o Jumlah atom O
- n Jumlah atom X
- x Biloks X

BILOKS X

7

MnO_4^- (permanganat, ungu): Mn = +7

Cek: **1**·x + **0**·(+1) + **4**·(−2) = **-1**, sehingga x = **7**.

Cek satuan: biloks tidak bersatuan; jumlah biloks = muatan ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-BILOKS-ION

CONTOH

Biloks di aki, PK, dan pemutih

Tentukan biloks: (a) S dalam H_2SO_4 (air aki); (b) Mn dalam $KMnO_4$ (kalium permanganat, "PK"); (c) Cl dalam NaOCl (pemutih pakaian).

1. (a) $2(+1) + x + 4(-2) = 0$, sehingga $x = +6$.
2. (b) K golongan 1: $(+1) + x + 4(-2) = 0$, sehingga $x = +7$.
3. (c) Na golongan 1: $(+1) + x + (-2) = 0$, sehingga $x = +1$.

S = +6, Mn = +7, Cl = +1. Mn +7 adalah biloks tertinggi mangan, dan Cl +1 jauh di atas biloks Cl yang paling stabil (−1). Atom-atom ini "lapar elektron", sehingga $KMnO_4$ dan NaOCl adalah pengoksidasi yang kuat.

Tebak Dulu!

Dalam ion sulfat, SO_4^{2-}, biloks belerang adalah +6. Apa artinya?

Atom S benar-benar kehilangan 6 elektron dan bermuatan 6+.

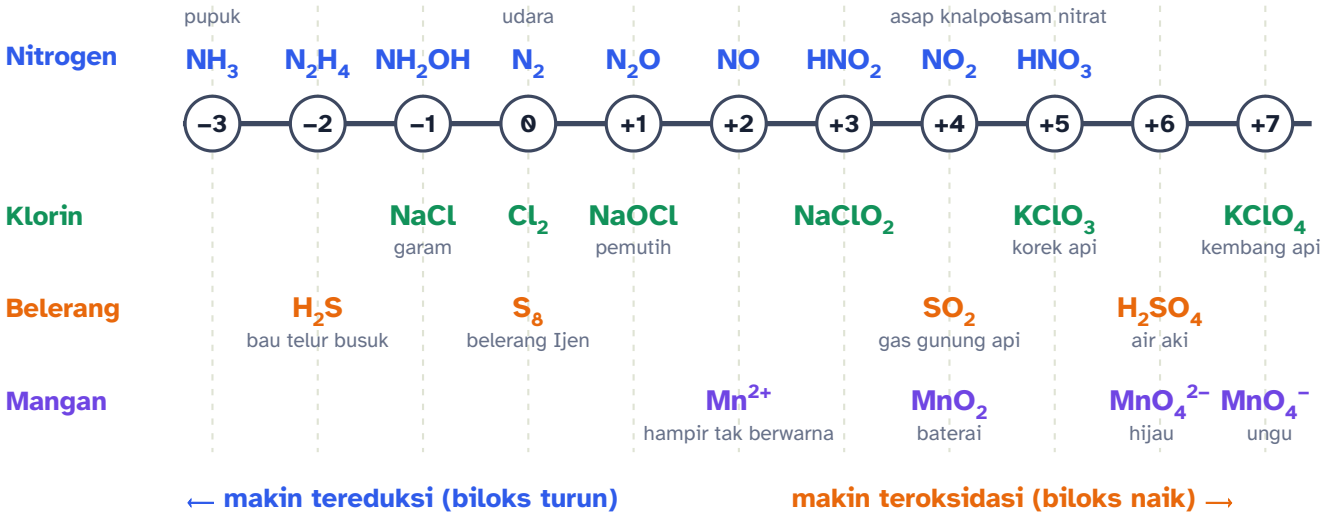
Atom S bermuatan 2–, sama dengan muatan ionnya.

Itu muatan "pembukuan" bila semua ikatan S–O dianggap ion; muatan S yang sebenarnya jauh lebih kecil.

Atom S bermuatan nol karena belerang adalah nonlogam.

Jawabannya: muatan pembukuan. Ikatan S–O adalah ikatan kovalen polar. Elektron ikatan memang tertarik ke arah O yang lebih elektronegatif, tetapi tidak pindah seluruhnya. Biloks +6 adalah hasil "seandainya semua ikatan ion". Pembukuan ini sangat berguna untuk melacak elektron, asal kita ingat bahwa ia bukan muatan nyata.

Satu unsur bisa tampil dengan banyak biloks. Nitrogen, misalnya, punya "wajah" dari −3 (amonia di pupuk) sampai +5 (asam nitrat). Inilah alasan unsur-unsur ini sering terlibat redoks: mereka bisa naik atau turun tangga biloks.



Tangga biloks. Zat di ujung kanan (HNO_3, $KClO_4$, MnO_4^-) hanya bisa turun, jadi hanya bisa menjadi oksidator. Zat di ujung kiri (NH_3, H_2S) hanya bisa naik, jadi menjadi reduktor. Zat di tengah bisa keduanya.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Biloks **bukan** muatan sebenarnya untuk semua senyawa. Dalam SO_4^{2-}, biloks S = +6, tetapi atom S tidak benar-benar kehilangan 6 elektron. Biloks juga bisa pecahan: dalam Fe_3O_4 biloks rata-rata Fe = +8/3, karena sebenarnya ada satu Fe^{2+} dan dua Fe^{3+}. Jangan tertukar penulisan: biloks +2 (tanda dulu), muatan ion 2+ (angka dulu).

Mengapa O bisa +2 dalam OF_2?

Biloks ditentukan oleh "siapa yang lebih rakus elektron". Biasanya O menang melawan hampir semua unsur, sehingga O mendapat kedua elektron ikatan dan biloksnya −2. Tetapi F lebih elektronegatif daripada O. Dalam OF_2, kedua pasangan ikatan diberikan kepada F (masing-masing −1), sehingga O "kehilangan" dua elektron dan biloksnya +2. Itulah sebabnya aturan F (nomor 5) ditempatkan di atas aturan O (nomor 7).

ADU CEPAT

Biloks kilat (jawaban boleh negatif!)

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-29

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Jumlah biloks = muatan. Logam golongan 1 = +1, H = +1, O = −2. Contoh: 1 X, 4 H, muatan +1 (seperti NH_4^+) → x + 4 = +1 → x = −3.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BILOKS KARBON: DARI METANA SAMPAI KARBON DIOKSIDA

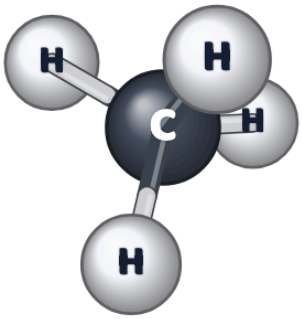
Dalam senyawa organik, biloks setiap atom C dapat dihitung dari ikatannya: tiap ikatan C–H menyumbang −1, tiap ikatan C–O (atau C–N, C–Cl) menyumbang +1 per pasangan elektron, dan ikatan C–C menyumbang 0.

Zat	CH_4	CH_3OH	$HCHO$	$HCOOH$	CO_2
Biloks C	−4	−2	0	+2	+4

Membakar metana berarti mengoksidasi karbon dari −4 ke +4: **8 elektron per atom C**. Itulah sebabnya gas alam kaya energi. Biloks rata-rata juga bisa menipu: dalam ion tetrationat, $S_4O_6^{2-}$, biloks rata-rata S = +2,5, padahal strukturnya berisi dua atom S bernilai +5 dan dua atom S bernilai 0 (rantai –S–S– di tengah).

MOLEKUL 3D

Satu karbon, lima wajah biloks



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Metana CH_4 Mr ≈ 16,04 PubChem ↗

Tetrahedral sempurna (109,5°). Gas rumah kaca dari sawah, sampah, dan peternakan; komponen utama gas alam.

Putar setiap molekul dan hitung ikatan C–H dan C–O pada atom karbonnya. Setiap ikatan C–H yang hilang dan diganti ikatan ke O menaikkan biloks C. Dari metana ke karbon dioksida, karbon naik dari −4 ke +4.

29.3 Oksidator, reduktor, dan reaksi yang "terbelah"

Dalam setiap reaksi redoks ada dua peran. Zat yang merebut elektron membuat zat lain teroksidasi, jadi ia disebut *pengoksidasi* atau oksidator. Ironisnya, si pencuri sendiri justru mengalami reduksi. Zat yang mengoper elektron disebut reduktor, dan ia sendiri teroksidasi.

DEFINISI · OKSIDATOR DAN REDUKTOR

Oksidator (pengoksidasi) adalah zat yang **mengoksidasi** zat lain; ia sendiri **tereduksi** (menerima elektron, biloks turun). **Reduktor** (pereduksi) adalah zat yang **mereduksi** zat lain; ia sendiri **teroksidasi** (melepas elektron, biloks naik). Zat yang terbentuk dari oksidator disebut *hasil reduksi*; yang terbentuk dari reduktor disebut *hasil oksidasi*.

KERJAKAN BERSAMA

Tanur tinggi: siapa pencurinya?

Di tanur tinggi, bijih besi diolah menjadi besi: $Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$. Tentukan oksidator, reduktor, hasil oksidasi, dan hasil reduksi.

1. Biloks Fe: +3 dalam Fe_2O_3 menjadi 0 dalam Fe. Turun, jadi Fe_2O_3 tereduksi: **oksidator**. Fe adalah **hasil reduksi**.
2. Biloks C: +2 dalam CO menjadi +4 dalam CO_2. Naik, jadi CO teroksidasi: **reduktor**. CO_2 adalah **hasil oksidasi**.
3. Cek elektron: 2 atom Fe × 3 = 6 elektron diterima; 3 atom C × 2 = 6 elektron dilepas. Setara!

Oksidator Fe_2O_3, reduktor CO. Biloks O (–2) tidak berubah: oksigen hanya "berpindah rumah", bukan pelaku redoks.

Zat	Peran	Berubah menjadi	Kamu menemuinya di
O_2	oksidator	H_2O atau oksida	napas, karat, api
Cl_2, OCl^-	oksidator	Cl^-	kaporit air PDAM & kolam, pemutih pakaian
MnO_4^- (ungu)	oksidator	Mn^{2+} (asam) atau MnO_2	PK untuk akuarium, titrasi
$Cr_2O_7^{2-}$ (jingga)	oksidator	Cr^{3+} (hijau)	uji alkohol napas klasik
C, CO	reduktor	CO_2	tanur tinggi, smelter nikel
logam aktif (Mg, Zn, Al)	reduktor	ion logam	kembang api, baterai
vitamin C	reduktor	asam dehidroaskorbat	jeruk nipis, jambu biji
H_2O_2, SO_2	keduanya	bergantung pasangannya	obat luka, pengawet buah kering

RUMUS HIDUP

Elektron yang dipindahkan

$$n_e = k \times \left| x_{\text{akhir}} - x_{\text{awal}} \right|$$

Jumlah elektron per satuan rumus sama dengan jumlah atom yang berubah dikali besar perubahan biloksnya.

- x_{awal} Biloks awal
- x_{akhir} Biloks akhir
- k Jumlah atom yang berubah
- n_e Elektron per satuan rumus e^-

ELEKTRON PER SATUAN RUMUS

5

e^-

⬇ biloks turun: reduksi, zat ini oksidator (menerima e^-)

MnO_4^- → Mn^{2+} (suasana asam): 5 e^-

1 atom × |(**2**) – (**7**)| = **5** elektron per satuan rumus.

Cek satuan: atom × (perubahan biloks) = elektron ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ELEKTRON-REDOKS

ADU CEPAT

Naik atau turun? Perubahan biloks total

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-29

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Δ = jumlah atom × (biloks akhir – biloks awal). Positif = oksidasi (melepas e^-), negatif = reduksi (menerima e^-). Contoh: $Cr_2O_7^{2-} \rightarrow 2Cr^{3+}$ memberi 2 × (3 – 6) = –6.

Disproporsionasi dan komproporsionasi

Biasanya oksidator dan reduktor adalah dua zat berbeda. Tetapi ada reaksi ketika **satu unsur** memerankan keduanya sekaligus.

DEFINISI · DISPROPORSIONASI DAN KOMPROPORSIONASI

Disproporsionasi (autoredoks) adalah reaksi redoks ketika satu unsur dalam satu zat sebagian teroksidasi dan sebagian tereduksi. **Komproporsionasi** adalah kebalikannya: unsur yang sama dengan dua biloks berbeda bertemu dan menghasilkan satu biloks di antaranya.

Pemutih pakaian dibuat dengan disproporsionasi. Gas klorin dialirkan ke larutan NaOH dingin; separuh atom Cl turun menjadi −1, separuh lagi naik menjadi +1:

$$\overset{0}{\mathrm{Cl_2}} + 2\,\mathrm{NaOH} \longrightarrow \overset{-1}{\mathrm{NaCl}} + \overset{+1}{\mathrm{NaClO}} + \mathrm{H_2O}$$

Dalam NaOH panas, hasilnya lain: klorat (Cl +5) yang dipakai di kepala korek api.

$$3\,\mathrm{Cl_2} + 6\,\mathrm{NaOH} \xrightarrow{\text{panas}} 5\,\mathrm{NaCl} + \mathrm{NaClO_3} + 3\,\mathrm{H_2O}$$

Hidrogen peroksida di botol cokelat apotek juga pelan-pelan berdisproporsionasi: $2\,\mathrm{H_2O_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2O} + \mathrm{O_2}$. Biloks O berubah dari −1 menjadi −2 (dalam air) dan 0 (dalam $\mathrm{O_2}$).

Contoh komproporsionasi terjadi di kawah gunung api. Gas $\mathrm{H_2S}$ (S = −2) dan $\mathrm{SO_2}$ (S = +4) bertemu dan menghasilkan belerang kuning (S = 0):

$$2\,\mathrm{H_2S} + \mathrm{SO_2} \longrightarrow 3\,\mathrm{S} + 2\,\mathrm{H_2O}$$

KIMIA NUSANTARA · BELERANG KAWAH IJEN

Di Kawah Ijen, Banyuwangi, gas vulkanik dialirkan lewat pipa-pipa. Gas mendingin dan belerang cair merah mengalir keluar, lalu membeku menjadi bongkahan kuning. Para penambang tradisional memikulnya menuruni kawah dengan beban sekitar 70–90 kg sekali angkut. Pada malam hari, Ijen terkenal dengan "api biru": nyala gas belerang yang terbakar, ketika S teroksidasi menjadi $\mathrm{SO_2}$. Gas $\mathrm{SO_2}$ dan $\mathrm{H_2S}$ di sana beracun, sehingga penambang dan wisatawan perlu masker.

MITOS

"Oksidator pasti mengandung oksigen."

FAKTA

Tidak. Cl_2, F_2, dan Fe^{3+} adalah oksidator tanpa oksigen. Oksidator adalah **penerima elektron**, apa pun rumusnya.

MITOS

"Zat yang teroksidasi disebut oksidator."

FAKTA

Terbalik! Zat yang teroksidasi adalah **reduktor**. Oksidator adalah pelaku yang membuat zat lain teroksidasi; ia sendiri tereduksi.

MITOS

"Karat terjadi karena besi dimakan sehingga massanya berkurang."

FAKTA

Massa karat justru **lebih besar** daripada besi asalnya, karena oksigen dan air ikut terikat. Atom besi tidak hilang; ia hanya kehilangan elektron.

29.4 Menyetarakan redoks: metode setengah reaksi

Persamaan redoks ion sering tampak menakutkan: ada MnO_4^-, H^+, elektron, dan air. Kuncinya sederhana: pisahkan menjadi dua "cerita" kecil, setarakan masing-masing, lalu gabungkan. Cara ini disebut **metode setengah reaksi** atau metode ion-elektron.

ATURAN · METODE SETENGAH REAKSI (SUASANA ASAM)

1. Tulis kerangka reaksi, tentukan unsur yang berubah biloks, lalu pisahkan menjadi setengah reaksi oksidasi dan reduksi.
2. Setarakan atom selain O dan H.
3. Setarakan O dengan menambahkan H_2O di ruas yang kekurangan O.
4. Setarakan H dengan menambahkan H^+ di ruas yang kekurangan H.
5. Setarakan muatan dengan menambahkan elektron di ruas yang muatannya lebih positif.
6. Kalikan setengah reaksi agar elektron yang dilepas sama dengan yang diterima.
7. Jumlahkan, coret zat yang sama di kedua ruas, lalu periksa atom dan muatan.

Kerangka reaksi (suasana asam)

$MnO_4^- + Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$

Mn: +7 → +2 (turun, reduksi) · Fe: +2 → +3 (naik, oksidasi)

Dua unsur berubah biloks → ada dua setengah reaksi.

Langkah 1. Tulis kerangka reaksi dan tentukan biloks. Mn turun dari +7 ke +2 (reduksi); Fe naik dari +2 ke +3 (oksidasi).

Kerangka reaksi (suasana asam)

$MnO_4^- + Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$

Mn: +7 → +2 (turun, reduksi) · Fe: +2 → +3 (naik, oksidasi)

REDUKSI $MnO_4^- \rightarrow Mn^{2+}$

Mn sudah setara (1 = 1)

OKSIDASI $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$

tidak ada O atau H yang perlu disetarakan

Langkah 2. Pisahkan menjadi dua setengah reaksi. Atom selain O dan H (Mn dan Fe) sudah setara.

Kerangka reaksi (suasana asam)

$MnO_4^- + Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$

Mn: +7 → +2 (turun, reduksi) · Fe: +2 → +3 (naik, oksidasi)

REDUKSI $MnO_4^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$

kiri 4 O, kanan 0 O → tambah 4 H_2O di kanan

OKSIDASI $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$

tidak ada O atau H yang perlu disetarakan

Langkah 3. Setarakan O dengan H_2O: kiri ada 4 atom O, jadi kanan diberi $4H_2O$.

Kerangka reaksi (suasana asam)

$MnO_4^- + Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$

Mn: +7 → +2 (turun, reduksi) · Fe: +2 → +3 (naik, oksidasi)

REDUKSI $MnO_4^- + 8H^+ \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$

kanan 8 H → tambah 8 H^+ di kiri

OKSIDASI $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$

tidak ada O atau H yang perlu disetarakan

Langkah 4. Setarakan H dengan H^+ (suasana asam): kanan ada 8 atom H, jadi kiri diberi $8H^+$.

Kerangka reaksi (suasana asam)

$MnO_4^- + Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$

Mn: +7 → +2 (turun, reduksi) · Fe: +2 → +3 (naik, oksidasi)

REDUKSI $MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$

muatan kiri $-1 + 8 = +7$, kanan +2 → tambah 5 e^- di kiri

OKSIDASI $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$

muatan kiri +2, kanan +3 → tambah 1 e^- di kanan

Langkah 5. Setarakan muatan dengan elektron. Reduksi: kiri $-1 + 8 = +7$, kanan $+2$, jadi kiri diberi $5e^-$. Oksidasi: kanan diberi $1e^-$.

Kerangka reaksi (suasana asam)

$MnO_4^- + Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$

Mn: +7 → +2 (turun, reduksi) · Fe: +2 → +3 (naik, oksidasi)

REDUKSI $MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$

menerima 5 e^-

OKSIDASI $5Fe^{2+} \rightarrow 5Fe^{3+} + 5e^-$ × 5

dikali 5 agar elektron yang dilepas = 5

Langkah 6. Samakan elektron: reduksi menerima $5e^-$, oksidasi melepas $1e^-$, jadi setengah reaksi oksidasi dikali 5.

Kerangka reaksi (suasana asam)

$MnO_4^- + Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} + Fe^{3+}$

Mn: +7 → +2 (turun, reduksi) · Fe: +2 → +3 (naik, oksidasi)

REDUKSI $MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$

menerima 5 e^-

OKSIDASI $5Fe^{2+} \rightarrow 5Fe^{3+} + 5e^-$

melepas 5 e^-

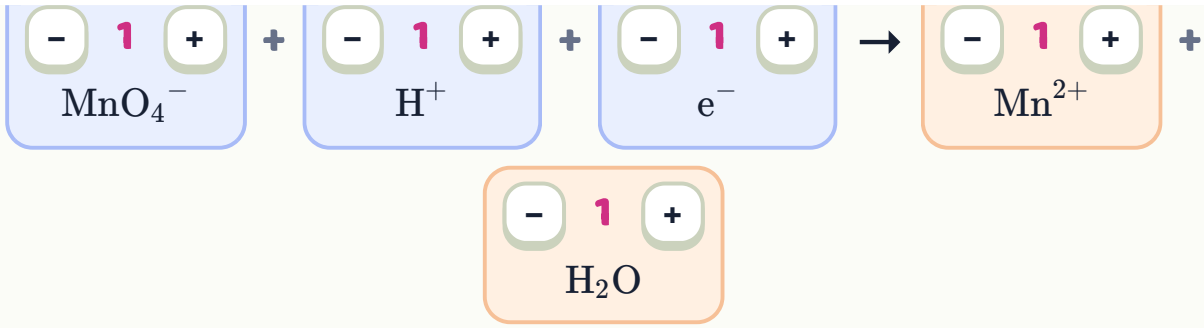
$$MnO_4^- + 5Fe^{2+} + 8H^+ \rightarrow Mn^{2+} + 5Fe^{3+} + 4H_2O$$

5e⁻ dicoret · muatan kiri −1 + 10 + 8 = +17 · kanan +2 + 15 = +17 ✓

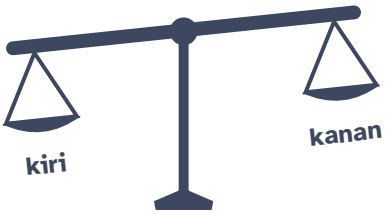
Langkah 7. Jumlahkan dan coret $5e^-$ di kedua ruas. Periksa: semua atom setara dan muatan kiri (+17) = kanan (+17).

PENYETARA REAKSI

Setengah reaksi dan suasana asam



Unsur	Kiri	Kanan	
Mn	1 ●	1 ●	✓
O	4 ●●●●	1 ●	✗
H	1 ○	2 ○○	✗
muatan	-1	+2	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 7 null

Mulailah dari setengah reaksi (perhatikan e^-!), lalu reaksi lengkap. Baris **muatan** di tabel harus ikut setara. Persamaan terakhir adalah reaksi di alat uji alkohol napas klasik: dikromat jingga menjadi Cr^{3+} hijau.

KERJAKAN BERSAMA **Dikromat dan besi(II)**

Setarakan reaksi yang dipakai untuk menentukan kadar besi dalam bijih: $\mathrm{Cr_2O_7^{2-} + Fe^{2+} \longrightarrow Cr^{3+} + Fe^{3+}}$ **(suasana asam).**

1. Reduksi, setarakan Cr dulu: $\mathrm{Cr_2O_7^{2-} \longrightarrow 2\,Cr^{3+}}$.
2. Setarakan O dengan $\mathrm{7H_2O}$ di kanan, lalu H dengan $\mathrm{14H^+}$ di kiri.
3. Muatan kiri $-2 + 14 = +12$, kanan $+6$, jadi tambahkan $\mathrm{6e^-}$ di kiri:

$$\mathrm{Cr_2O_7^{2-} + 14\,H^+ + 6\,e^- \longrightarrow 2\,Cr^{3+} + 7\,H_2O}$$

4. Oksidasi $\mathrm{Fe^{2+} \longrightarrow Fe^{3+} + e^-}$ dikali 6, lalu jumlahkan dan coret $\mathrm{6e^-}$:

$$\mathrm{Cr_2O_7^{2-} + 6\,Fe^{2+} + 14\,H^+ \longrightarrow 2\,Cr^{3+} + 6\,Fe^{3+} + 7\,H_2O}$$

Cek muatan: kiri $-2 + 12 + 14 = +24$, kanan $+6 + 18 = +24$ ✓. Satu ion dikromat mengoksidasi enam ion besi(II).

Bagaimana dalam suasana basa?

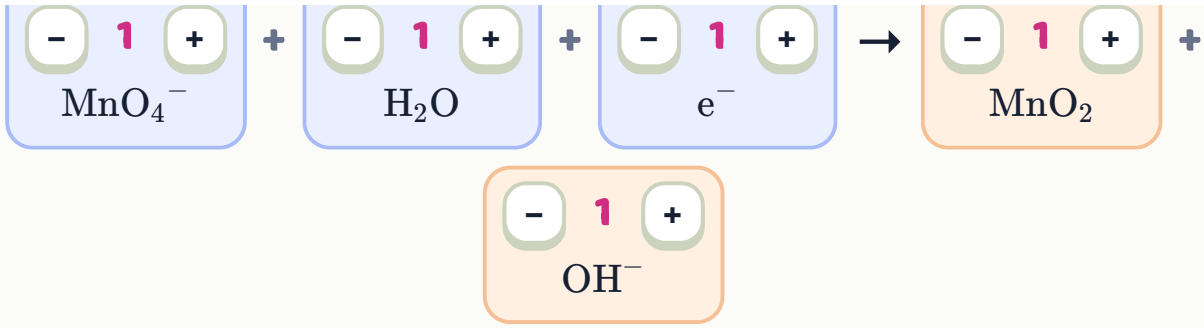
ATURAN TAMBAHAN · SUASANA BASA

Kerjakan seperti suasana asam sampai langkah 4. Lalu tambahkan $\mathrm{OH^-}$ di **kedua ruas** sebanyak jumlah $\mathrm{H^+}$. Pasangan $\mathrm{H^+}$ dan $\mathrm{OH^-}$ di ruas yang sama digabung menjadi $\mathrm{H_2O}$. Terakhir, coret $\mathrm{H_2O}$ yang muncul di kedua ruas.

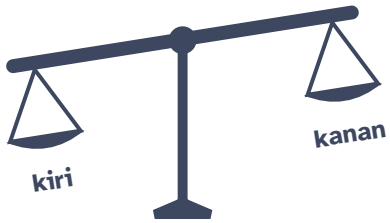
Contoh: permanganat dalam suasana basa berubah menjadi $\mathrm{MnO_2}$ yang cokelat.

$$\begin{aligned}
&\text{cara asam:} && \mathrm{MnO_4^- + 4\,H^+ + 3\,e^- \longrightarrow MnO_2 +} \\
&\text{tambah } 4\,\mathrm{OH^-}: && \mathrm{MnO_4^- + 4\,H_2O + 3\,e^- \longrightarrow MnO_2} \\
&\text{coret } 2\,\mathrm{H_2O}: && \mathrm{MnO_4^- + 2\,H_2O + 3\,e^- \longrightarrow MnO_2}
\end{aligned}$$

PENYETARA REAKSI **Suasana basa dan disproporsionasi**



Unsur	Kiri	Kanan	
Mn	1	1	✓
O	5	3	✗
H	2	1	✗
muatan	-2	-1	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 5 null

Dalam suasana basa, yang muncul adalah OH^- dan H_2O, bukan H^+. Persamaan keempat adalah disproporsionasi klorin dalam basa panas: satu zat menjadi oksidator sekaligus reduktor.

COBA SENDIRI — Permanganat dan iodida (basa)

Coba sendiri: setarakan dalam suasana basa $MnO_4^- + I^- \longrightarrow MnO_2 + I_2$.

1. Reduksi (dari contoh di atas): $MnO_4^- + 2\,H_2O + 3\,e^- \longrightarrow MnO_2 + 4\,OH^-$.
2. Oksidasi: $2\,I^- \longrightarrow I_2 + 2\,e^-$.
3. KPK elektron 3 dan 2 adalah 6: reduksi × 2, oksidasi × 3, lalu jumlahkan.

$$2\,MnO_4^- + 6\,I^- + 4\,H_2O \longrightarrow 2\,MnO_2 + 3\,I_2 + 8\,OH^-$$

Cek muatan: kiri $-2-6=-8$, kanan -8 ✓.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Jawaban akhir suasana basa tidak boleh berisi H^+, dan jawaban suasana asam tidak boleh berisi OH^-. Jangan menulis atom O atau O_2 "bebas" untuk menyetarakan oksigen; dalam larutan berair, oksigen tambahan selalu datang dari H_2O (atau OH^-). Elektron juga tidak boleh tersisa di persamaan lengkap.

🚀 **LANJUT · IB & OLIMPIADE**

PERMANGANAT SI BUNGLON DAN KONSEP EKIVALEN

Produk reduksi permanganat bergantung pada suasana: dalam asam menjadi Mn^{2+} yang hampir tak berwarna (5e⁻), dalam larutan netral atau basa lemah menjadi MnO_2 cokelat (3e⁻), dan dalam basa kuat menjadi manganat MnO_4^{2-} hijau (1e⁻). Larutan PK yang dicampur basa kuat dan gula berubah ungu → hijau → cokelat-jingga: "bunglon kimia".

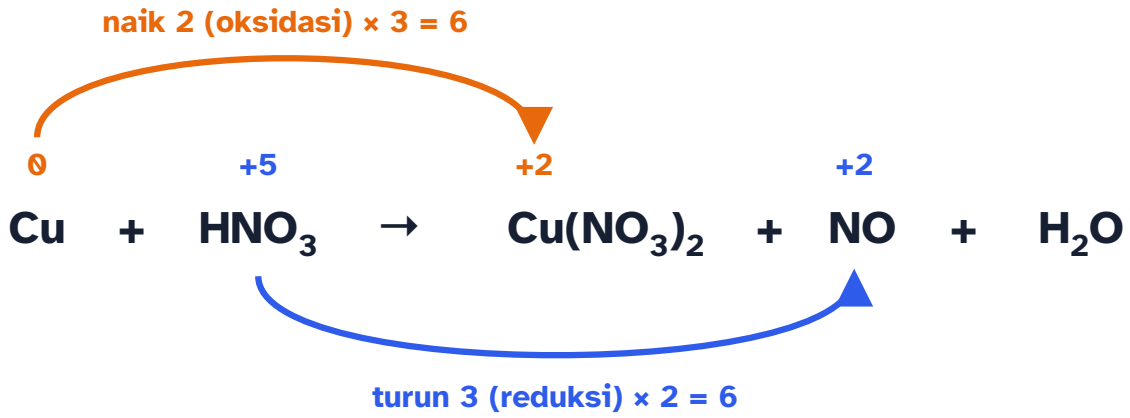
Karena jumlah elektron per satuan rumus berubah-ubah, kimiawan analitik memakai **ekivalen**: $n_{ek} = n \times (\text{elektron per satuan rumus})$. Pada titik ekivalen titrasi redoks, ekivalen oksidator = ekivalen reduktor. Misalnya 1 mmol MnO_4^- (asam) = 5 mek, cukup untuk 5 mmol Fe^{2+} atau 2,5 mmol $C_2O_4^{2-}$.

29.5 Metode perubahan bilangan oksidasi

Untuk persamaan molekul yang panjang, misalnya yang berisi ion penonton seperti K^+ atau NO_3^-, ada jalan pintas: hitung langsung naik-turunnya biloks. Inilah **metode perubahan bilangan oksidasi** (PBO).

☆ **ATURAN · METODE PERUBAHAN BILOKS**

1. Tentukan biloks semua unsur; tandai unsur yang biloksnya berubah.
2. Samakan jumlah atom unsur yang berubah di kedua ruas.
3. Hitung kenaikan biloks (oksidasi) dan penurunan biloks (reduksi), masing-masing dikali jumlah atomnya.
4. Samakan kenaikan dan penurunan dengan mengalikan koefisien (pakai KPK).
5. Setarakan atom lain: ion penonton, lalu H (untuk persamaan ion: muatan dengan H^+ atau OH^-), terakhir O dengan H_2O.



KPK = 6 ⟹ $3Cu + 8HNO_3 \rightarrow 3Cu(NO_3)_2 + 2NO + 4H_2O$

Jembatan biloks untuk tembaga dalam asam nitrat encer. Cu naik 2, N turun 3. Agar sama-sama 6, Cu dikali 3 dan NO dikali 2.

KERJAKAN BERSAMA — Tembaga dalam asam nitrat encer

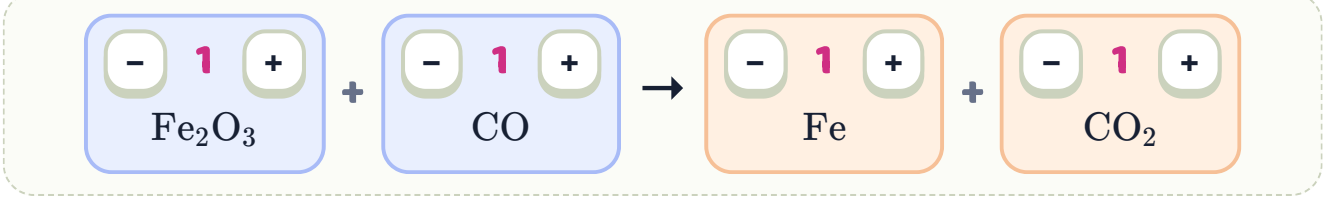
Setarakan $\mathrm{Cu + HNO_3 \longrightarrow Cu(NO_3)_2 + NO + H_2O}$ dengan metode perubahan biloks.

1. Biloks: Cu 0 → +2 (naik 2); N +5 (dalam $\mathrm{HNO_3}$) → +2 (dalam NO), turun 3.
2. KPK 2 dan 3 adalah 6: Cu dikali 3, NO dikali 2.
3. Hitung N di kanan: 3×2 (nitrat penonton) $+2 = 8$, jadi $8\mathrm{HNO_3}$.
4. H: 8 di kiri, jadi $4\mathrm{H_2O}$ di kanan. Cek O: kiri 24; kanan $18 + 2 + 4 = 24$ ✓.

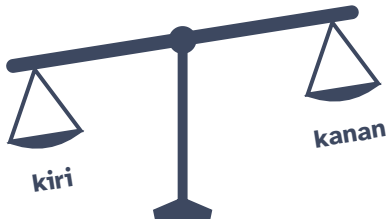
$$\mathrm{3\,Cu + 8\,HNO_3 \longrightarrow 3\,Cu(NO_3)_2 + 2\,NO + 4\,H_2O}$$

Hanya 2 dari 8 molekul $\mathrm{HNO_3}$ yang benar-benar menjadi oksidator; 6 sisanya hanya menyumbang ion nitrat penonton.

PENYETARA REAKSI — Redoks molekul: metode perubahan biloks



Unsur	Kiri	Kanan	
Fe	2	1	✗
O	4	2	✗
C	1	1	✓



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 7 null

Tulis dulu biloks unsur yang berubah di kertas, hitung naik-turunnya, baru tekan + dan –. Persamaan kelima adalah mesiu hitam kembang api: karbon teroksidasi, sedangkan nitrogen dan belerang sama-sama tereduksi!

✏️ **TRIK KAK TIRTA · HUKUM YANG TIDAK BISA DITAWAR**

Apa pun metodenya, **elektron yang dilepas = elektron yang diterima**. Kalau hitunganmu tidak memenuhinya, ulangi. Untuk cek terakhir pada persamaan ion, hitung muatan: total muatan kiri harus sama dengan kanan. Ibarat arisan: uang yang disetor semua anggota harus sama dengan uang yang dibawa pulang pemenang.

	Metode setengah reaksi	Metode perubahan biloks
Paling cocok	persamaan ion dalam larutan (asam/basa)	persamaan molekul panjang, ada ion penonton
Kelebihan	tidak perlu menghitung biloks setiap unsur; dekat dengan sel elektrokimia (Bab 30)	cepat bila hanya dua unsur yang berubah
Hati-hati	elektron di kedua setengah reaksi harus sama	unsur yang sama bisa ada di beberapa zat (N dalam HNO_3 dan $Cu(NO_3)_2$)

COBA SENDIRI **Membuat klorin dari PK dan asam klorida**

Coba sendiri: setarakan $\mathrm{KMnO_4 + HCl \longrightarrow KCl + MnCl_2 + Cl_2 + H_2O}$**.**

1. Mn: +7 → +2, turun 5. Cl: −1 → 0, naik 1 per atom, atau naik 2 per molekul $\mathrm{Cl_2}$.
2. KPK 5 dan 2 adalah 10: 2 Mn dan 5 $\mathrm{Cl_2}$.
3. K: 2KCl. Cl di kanan: $2 + 2(2) + 5(2) = 16$, jadi 16HCl. H: 16, jadi $8\mathrm{H_2O}$. Cek O: 8 = 8 ✓.

$$2\,\mathrm{KMnO_4} + 16\,\mathrm{HCl} \longrightarrow 2\,\mathrm{KCl} + 2\,\mathrm{MnCl_2} + 5\,\mathrm{Cl_2} + 8\,\mathrm{H_2O}$$

Dari 16 HCl, hanya 10 yang dioksidasi menjadi $\mathrm{Cl_2}$; 6 lainnya berakhir sebagai ion $\mathrm{Cl^-}$ dalam KCl dan $\mathrm{MnCl_2}$.

29.6 Redoks dalam kehidupan

Redoks bukan hanya urusan laboratorium. Ia bekerja di lemari cuci, di dapur, di dalam sel tubuhmu, dan di pabrik-pabrik besar Indonesia.

Pemutih pakaian

Pemutih pakaian berisi natrium hipoklorit, NaOCl, sekitar 5%. Ion $\mathrm{OCl^-}$ adalah oksidator. Ia merebut elektron dari molekul zat warna noda, sehingga sistem ikatan rangkap yang membuat noda berwarna terputus dan noda menjadi tak berwarna. Ion $\mathrm{OCl^-}$ sendiri tereduksi:

$$\mathrm{OCl^- + H_2O + 2\,e^- \longrightarrow Cl^- + 2\,OH^-}$$

⚠ **KESELAMATAN · JANGAN MENCAMPUR PEMUTIH!**

Jangan pernah mencampur pemutih dengan pembersih lain. Dengan pembersih kloset yang asam (mengandung HCl), pemutih melepaskan gas klorin beracun lewat komproporsionasi $\mathrm{OCl^- + Cl^- + 2\,H^+ \longrightarrow Cl_2 + H_2O}$. Dengan pembersih beramonia terbentuk gas kloramin. Keduanya merusak saluran napas. Pakai pemutih di ruang berventilasi, kenakan sarung tangan, simpan di botol aslinya, dan jauhkan dari anak-anak.



Korosif



Bahaya lingkungan

Apel dan salak yang menjadi cokelat

Bahasa sederhana · Irisan apel atau salak cepat menjadi cokelat. Buahnya tidak busuk. Oksigen di udara "mencuri" elektron dari zat di dalam buah, dan zat yang sudah dicuri elektronnya berwarna cokelat. Air jeruk nipis memperlambatnya karena vitamin C di dalamnya rela dicuri lebih dulu.

Saat buah diiris, sel-selnya pecah. Enzim *polifenol oksidase* bertemu senyawa fenol buah dan oksigen udara. Fenol dioksidasi menjadi kuinon, lalu kuinon bergabung membentuk pigmen cokelat (melanin). Untuk fenol sederhana katekol:

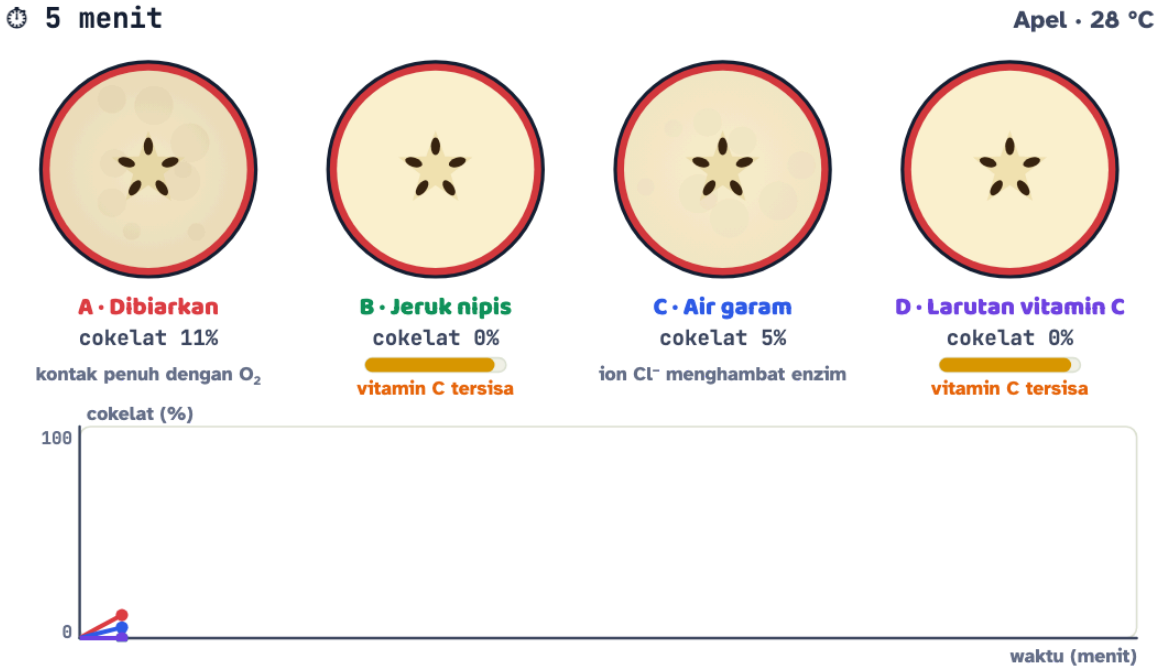
$$2\,\mathrm{C_6H_4(OH)_2} + \mathrm{O_2} \xrightarrow{\text{enzim}} 2\,\mathrm{C_6H_4O_2} + 2\,\mathrm{H_2O}$$

Vitamin C (asam askorbat) adalah **antioksidan**: reduktor yang "dikorbankan". Ia mengembalikan kuinon menjadi fenol tak berwarna, dan dirinya sendiri teroksidasi menjadi asam dehidroaskorbat. Selama vitamin C masih ada, buah tetap pucat:

$$\mathrm{C_6H_8O_6} \longrightarrow \mathrm{C_6H_6O_6} + 2\,\mathrm{H^+} + 2\,\mathrm{e^-}$$

LAB MINI Balapan Pencokelatan: buah, oksigen, dan antioksidan

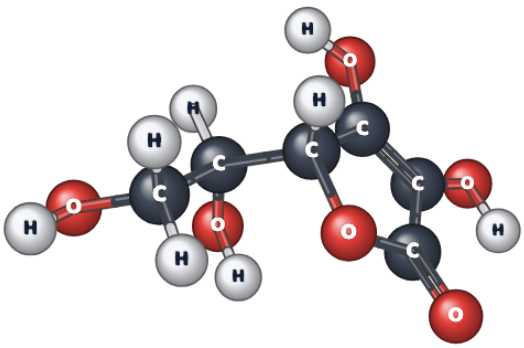
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-29



Waktu	Paling cepat cokelat	Paling awet
5 menit	A · Dibiarkan	D · Larutan vitamin C

Tekan ▶ Jalankan dan amati empat irisan selama 2 jam (dipercepat). Ganti buah, suhu, dan perlakuan irisan D. Mengapa irisan dengan vitamin C tetap pucat dulu, lalu tiba-tiba ikut cokelat? Perhatikan bilah vitamin C-nya. Ini model sederhana, bukan data laboratorium.

MOLEKUL 3D Molekul pelaku redoks sehari-hari



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam askorbat (vitamin C) $C_6H_8O_6$ Mr ≈ 176,12 PubChem ↗

Antioksidan yang mencegah sariawan dan pencokelatan buah.

Vitamin C melepas dua atom H dari dua gugus –OH di cincinnya (bersama 2 elektron). Bandingkan juga etanol → asetaldehida → asam asetat: setiap langkah, karbon yang mengikat O kehilangan ikatan C–H dan biloksnya naik. Inilah yang terjadi di alat uji napas.

Napas dan daun: respirasi dan fotosintesis

Di setiap sel tubuhmu, glukosa "dibakar" perlahan. Karbon dalam glukosa (biloks rata-rata 0) teroksidasi menjadi $\mathrm{CO_2}$ (+4), sedangkan oksigen (0) tereduksi menjadi air (–2). Energinya disimpan dalam ATP.

$$\mathrm{C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O}$$

Fotosintesis berjalan ke arah sebaliknya dengan energi cahaya matahari: $\mathrm{CO_2}$ direduksi menjadi glukosa, sedangkan air dioksidasi menjadi $\mathrm{O_2}$, $\mathrm{2\,H_2O \longrightarrow O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^-}$. Jadi oksigen yang kamu hirup berasal dari molekul air yang dipecah daun, bukan dari $\mathrm{CO_2}$.

Uji alkohol napas

Alat uji napas klasik berisi kristal kalium dikromat jingga yang diasamkan. Etanol dalam napas mereduksi $\mathrm{Cr_2O_7^{2-}}$ (Cr +6) menjadi $\mathrm{Cr^{3+}}$ (+3) yang hijau, sedangkan etanol teroksidasi menjadi asam asetat:

$$\mathrm{2\,Cr_2O_7^{2-} + 3\,C_2H_5OH + 16\,H^+ \longrightarrow 4\,Cr^{3+} + 3\,CH_3C}$$

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1954, **Robert Borkenstein**, seorang polisi sekaligus ilmuwan forensik di Amerika Serikat, menciptakan *Breathalyzer*. Napas ditiupkan melewati larutan dikromat yang diasamkan, lalu perubahan warnanya diukur dengan fotometer. Alat modern umumnya memakai sel bahan bakar: etanol dioksidasi pada elektrode, dan arus listrik yang terbentuk sebanding dengan kadar alkohol. Redoks yang menghasilkan listrik? Itu cerita Bab 30.

Kembang api dan mesiu

Kembang api adalah redoks yang sangat cepat: oksidator (kalium nitrat atau kalium perklorat) bercampur dengan bahan bakar (karbon, belerang, serbuk magnesium atau aluminium). Pada mesiu hitam, karbon teroksidasi (0 → +4), sedangkan nitrogen (+5 → 0) dan belerang (0 → –2) tereduksi. Warna-warninya berasal dari garam logam: stronsium merah, barium hijau, natrium kuning.

$$2\,KNO_3 + S + 3\,C \longrightarrow K_2S + N_2\uparrow + 3\,CO_2\uparrow$$

KIMIA NUSANTARA · DARI BIJIH LATERIT KE BATERAI

Indonesia memiliki cadangan nikel terbesar di dunia, terutama bijih laterit di Sulawesi (Sorowako, Morowali, Pomalaa) dan Maluku Utara (Weda Bay, Pulau Obi). Di smelter, nikel oksida direduksi dengan karbon pada suhu tinggi: $NiO + C \longrightarrow Ni + CO$. **Ni** turun dari +2 ke 0, C naik dari 0 ke +2. Hasilnya feronikel atau nikel matte untuk baja tahan karat. Jalur lain, pelindian asam bertekanan tinggi (HPAL), melarutkan nikel dengan asam sulfat untuk bahan katode baterai kendaraan listrik. Baterai itu sendiri? Ia juga mesin redoks (Bab 30).

MITOS

"Antioksidan menghentikan semua oksidasi, jadi makin banyak makin baik."

FAKTA

Tubuh justru **butuh** oksidasi untuk menghasilkan energi dan melawan kuman. Antioksidan dari buah dan sayur membantu menjaga keseimbangan; suplemen berlebihan tidak otomatis lebih sehat.

MITOS

"Apel yang sudah cokelat berarti busuk."

FAKTA

Warna cokelat hanyalah hasil oksidasi fenol oleh oksigen udara. Rasanya sedikit berubah, tetapi itu bukan pembusukan oleh mikroba.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TITRASI REDOKS: PERMANGANOMETRI DAN IODOMETRI

Permanganometri memakai $KMnO_4$ sebagai titran dalam suasana asam sulfat. Permanganat adalah *indikator diri*: selama masih ada reduktor (misalnya Fe^{2+} atau oksalat), warna ungunya langsung hilang menjadi Mn^{2+} yang hampir tak berwarna. Titik akhir ditandai warna **merah muda pucat pertama yang bertahan** sekitar 30 detik. $KMnO_4$ bukan baku primer (mudah terurai dan mengandung MnO_2), sehingga konsentrasinya ditentukan dulu dengan natrium oksalat pada suhu ±60–70 °C.

$$MnO_4^- + 5\,Fe^{2+} + 8\,H^+ \longrightarrow Mn^{2+} + 5\,Fe^{3+} +$$

Iodometri dipakai untuk oksidator seperti OCl^- atau Cu^{2+}. Oksidator direaksikan dengan KI berlebih sehingga terbentuk I_2, lalu I_2 dititrasi dengan natrium tiosulfat memakai indikator kanji (biru tua menjadi tak berwarna). Tiosulfat tidak bereaksi rapi dengan oksidator kuat, tetapi bereaksi bersih dengan iodin:

$$OCl^- + 2\,I^- + 2\,H^+ \longrightarrow Cl^- + I_2 + H_2O \qquad I_2$$

Contoh: 10,00 mL pemutih diencerkan menjadi 100,0 mL. Sebanyak 25,00 mL larutan encer (berisi 2,50 mL pemutih asli) ditambah KI berlebih dan asam, lalu dititrasi dengan 33,6 mL $Na_2S_2O_3$ 0,100 M. Mol tiosulfat = 3,36 mmol, mol I_2 = mol OCl^- = 1,68 mmol. Massa NaOCl = 1,68 mmol × 74,5 mg/mmol = 125 mg dalam 2,50 mL, yaitu ±50 g/L atau sekitar 5% (m/v). Cocok dengan label!

RUMUS HIDUP

Kadar Fe^{2+} dari titrasi permanganat

$$c_{Fe^{2+}} = \frac{5 \times c_{MnO_4^-} \times V_{MnO_4^-}}{V_{sampel}}$$

Setiap ion permanganat menerima 5 elektron, cukup untuk mengoksidasi 5 ion besi(II).

- $c_{MnO_4^-}$ Konsentrasi $KMnO_4$ mol/L
- $V_{MnO_4^-}$ Volume $KMnO_4$ di titik akhir mL
- V_{sampel} Volume sampel Fe^{2+} mL
- $c_{Fe^{2+}}$ Konsentrasi Fe^{2+} mol/L

KONSENTRASI FE^{2+}

0,0215

mol/L

💊 **±60 mg besi per tablet (sampel 25 mL dari larutan satu tablet 50 mL)**

10,75 mL × **0,01** M = **0,108** mmol MnO_4^- → **0,538** mmol Fe^{2+} = **30,019** mg besi dalam **25** mL sampel.

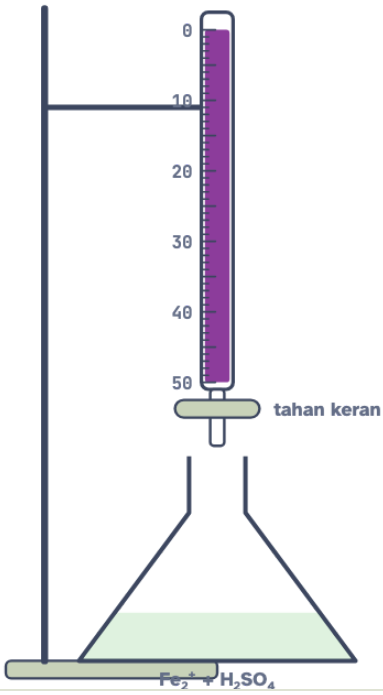
Cek satuan: (mol/L × mL) ÷ mL = mol/L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PERMANGANOMETRI

LAB MINI

Titrasi Ungu: kadar besi tablet tambah darah

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-29



Isi labu (mmol)

Fe^{2+}	0,
Fe^{3+}	0
Mn^{2+}	0
MnO_4^- berlebih	0

1 MnO_4^- menghabiskan 5 Fe^{2+}

$$MnO_4^- + 5Fe^{2+} + 8H^+ \rightarrow Mn^{2+} + 5Fe^{3+} + 4H_2O$$

Sampel 25 mL · $KMnO_4$ 0,01 M · terpakai 0 mL

Tambahkan $KMnO_4$ sampai merah muda pucat pertama yang tidak hilang lagi.

V $KMnO_4$	Fe^{2+} tersisa	Warna labu	c Fe^{2+} hitunganmu
0 mL	0,538 mmol	hijau sangat pucat (Fe^{2+})	–

Satu tablet tambah darah (berisi besi(II), sekitar 60 mg besi) dilarutkan dalam asam sulfat encer menjadi 50,0 mL. Tambahkan $KMnO_4$ setetes demi setetes (tombol, atau **tekan dan tahan keran buret**). Hentikan pada merah muda pertama yang tidak hilang, lalu bandingkan kadar hitunganmu dengan nilai sebenarnya. Coba juga Sampel C yang misterius!

Kimia di sekitarmu

Pagar dan atap seng

Cat mencegah besi bertemu oksigen dan air. Lapisan seng pada atap "berkorban" teroksidasi lebih dulu sehingga besi di bawahnya terlindung (Bab 31).

Kaporit PDAM dan kolam

Klorin dan kaporit, $Ca(OCl)_2$, mengoksidasi dinding sel kuman sehingga air ledeng aman. Bau "kolam renang" berasal dari kloramin.

Obat luka berbuih

Hidrogen peroksida 3% berbuih di luka karena enzim katalase mempercepat disproporsionasinya menjadi air dan gas oksigen.

Minyak tengik

Minyak goreng dan santan yang lama terbuka berbau tengik karena lemak tak jenuhnya dioksidasi oksigen udara. Simpan tertutup dan jauh dari cahaya.

Foto film

Cahaya mengaktifkan butir perak bromida; larutan pengembang (reduktor) mengubah ion $\mathrm{Ag^{+}}$ di butir itu menjadi perak hitam yang membentuk gambar.

Baterai HP dan motor listrik

Setiap baterai adalah reaksi redoks yang elektronnya dipaksa lewat kabel, dan nikel Indonesia ada di dalam banyak katodenya.

Cek Cepat

Dalam reaksi $\mathrm{Zn + Cu^{2+} \longrightarrow Zn^{2+} + Cu}$, zat yang bertindak sebagai oksidator adalah ...

- Zn
- $\mathrm{Cu^{2+}}$
- $\mathrm{Zn^{2+}}$
- Cu

Biloks Cr dalam $\mathrm{K_2Cr_2O_7}$ adalah ...

- +3
- +7
- +12
- +6

Reaksi manakah yang merupakan disproporsionasi?

- $\mathrm{2\,H_2O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + O_2}$
- $\mathrm{2\,H_2S + SO_2 \longrightarrow 3\,S + 2\,H_2O}$
- $\mathrm{CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2}$
- $\mathrm{Zn + 2\,HCl \longrightarrow ZnCl_2 + H_2}$

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: balapan apel cokelat

Bahan: 1 buah apel (atau salak/pisang), pisau dan talenan, 4 piring kecil, 1 jeruk nipis, garam, air matang, label, jam atau stopwatch HP, kamera HP.

1. Minta orang dewasa memotong apel menjadi 4 irisan yang sama tebal.
2. Irisan A dibiarkan. Irisan B dioles perasan jeruk nipis. Irisan C direndam 5 menit dalam air garam (1 sendok teh garam per gelas air). Irisan D direndam 5 menit dalam air biasa.
3. Letakkan berjajar di tempat yang sama, jauh dari sinar matahari langsung.
4. Foto semua irisan setiap 15 menit selama 1–2 jam dari jarak yang sama, lalu urutkan dari yang paling cokelat.

Keselamatan: pemotongan dilakukan orang dewasa. Jangan mengucek mata setelah memegang jeruk nipis. Irisan percobaan jangan dimakan setelah dibiarkan lama; buang ke tempat sampah organik atau kompos, lalu cuci tangan. Percobaan ini cukup memakai bahan dapur; jangan memakai pemutih atau pembersih apa pun.

Pertanyaan: Irisan mana yang paling lambat cokelat? Mengapa irisan D (air biasa) perlu ada? Siapa oksidatornya, dan apa peran vitamin C di jeruk nipis?

RINGKASAN KILAT

Bab 29 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan oksidasi dan reduksi dengan **tiga definisi** (oksigen, hidrogen, elektron) dan memilih yang paling umum
- menentukan **bilangan oksidasi** unsur dalam unsur bebas, senyawa, dan ion
- mengenali **oksidator**, **reduktor**, reaksi **disproporsionasi**, dan **komproporsionasi**
- menyetarakan reaksi redoks dengan **metode setengah reaksi** (suasana asam dan basa) dan **metode perubahan biloks**
- menjelaskan redoks di sekitarmu (pemutih, uji napas alkohol, respirasi, fotosintesis, antioksidan) dan menghitung hasil **titrasi redoks**

Istilah kunci

Oksidasi · Reduksi · reaksi redoks · bilangan oksidasi · Bilangan oksidasi · Oksidator · Reduktor · Disproporsionasi · Komproporsionasi · metode setengah reaksi · metode perubahan bilangan oksidasi · antioksidan

Rumus penting

$$x = \frac{q - h\,(+1) - o\,(-2)}{n}$$

Biloks unsur X dalam spesi. Biloks X sama dengan muatan spesi dikurangi sumbangan semua H dan O, lalu dibagi jumlah atom X.

$$n_e = k \times \left| x_{\text{akhir}} - x_{\text{awal}} \right|$$

Elektron yang dipindahkan. Jumlah elektron per satuan rumus sama dengan jumlah atom yang berubah dikali besar perubahan biloksnya.

$$c_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{5 \times c_{\text{MnO}_4^-} \times V_{\text{MnO}_4^-}}{V_{\text{sampel}}}$$

Kadar Fe^{2+} dari titrasi permanganat. Setiap ion permanganat menerima 5 elektron, cukup untuk mengoksidasi 5 ion besi(II).

⚠ Jangan sampai terjebak

- Oksidasi tidak harus melibatkan oksigen.
- Biloks bukan muatan sebenarnya untuk semua senyawa.
- Jawaban akhir suasana basa tidak boleh berisi H^+, dan jawaban suasana asam tidak boleh berisi OH^-.

⛰ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=29

🧩 Teka-teki untuk Bab 30

Kentang, lemon, dan dua logam berbeda (misalnya paku seng dan kawat tembaga) bisa menyalakan LED kecil. Padahal tidak ada baterai sama sekali. Dari mana listriknya?

▼ **Intip petunjuk**

Di Lab Pencuri Elektron, seng memberikan elektronnya *langsung* kepada ion tembaga. Bagaimana kalau seng dan tembaga dipisahkan, lalu elektronnya dipaksa berjalan lewat kabel? Aliran elektron di kabel itulah listrik! Di Bab 30 kamu akan merakit **sel volta**.

BAB 30 · REDOKS & ELEKTROKIMIA

30 Sel Volta & Baterai: Menjinakkan Aliran Elektron

Di dalam setiap baterai ada reaksi redoks yang dipaksa antre: elektronnya tidak boleh melompat langsung, tetapi harus berjalan memutar lewat kawat. Perjalanan memutar itulah yang menyalakan senter, ponsel, jam dinding, sampai motor listrik.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan susunan dan cara kerja **sel volta** (sel Daniell): **anode**, **katode**, arah elektron, dan peran **jembatan garam**;
- memakai **tabel potensial reduksi standar** dan **deret volta** untuk meramalkan logam mana yang teroksidasi;
- menghitung **potensial sel standar** E°_{sel} dan menentukan apakah sebuah reaksi redoks berlangsung spontan;
- menulis dan membaca **notasi sel**;
- menjelaskan kimia **aki**, **baterai alkalin**, **litium-ion** (dan peran nikel Indonesia), serta **sel bahan bakar hidrogen**; lalu (tingkat lanjut) memakai **persamaan Nernst** dan $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$.

JAM DINDING BERTENAGA JERUK NIPIS

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Dari mana sebenarnya listrik baterai jeruk nipis Bima?

Dari sari jeruk yang menyimpan listrik, seperti air di dalam tangki.

Dari kawat tembaga yang melepas elektron ke paku.

Dari reaksi redoks: seng melepas elektron, elektron berjalan lewat kawat, lalu ion H^+ dalam sari jeruk menerimanya di permukaan tembaga.

Dari vitamin C yang bermuatan listrik.

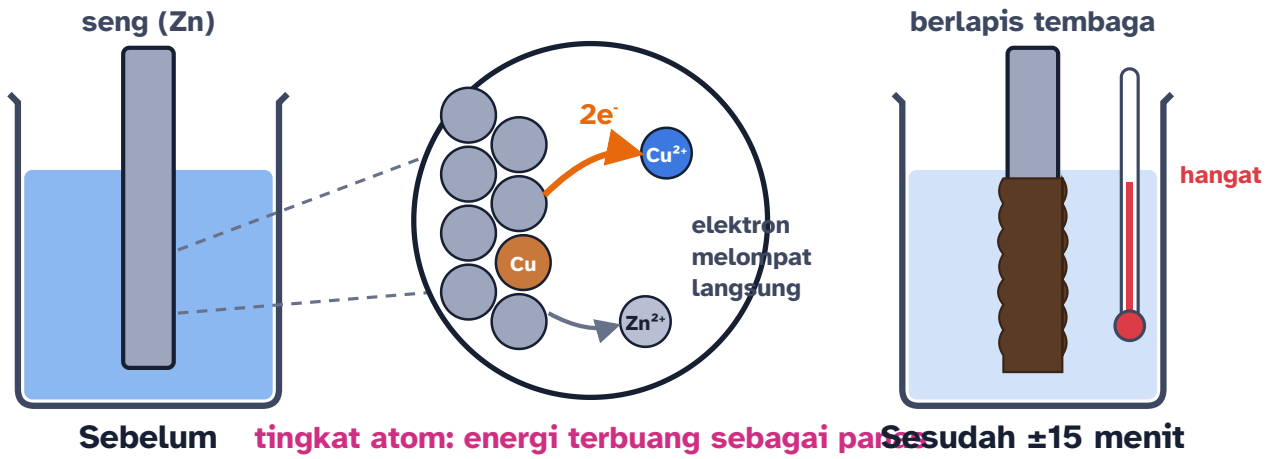
Jawabannya: dari reaksi redoks. Seng lebih "royal" melepas elektron daripada tembaga. Elektron yang dilepas seng harus berjalan memutar lewat kawat (dan jam dinding!) sebelum diterima ion H^+ di permukaan tembaga. Jeruk hanya menyediakan ion yang bisa bergerak (elektrolit). Ganti jeruk dengan kentang atau air garam, listriknya tetap ada; tetapi pakai dua kawat tembaga, listriknya hilang. Rahasianya ada pada **dua logam yang berbeda**.

30.1 Sel volta: anode, katode, dan jembatan garam

Mari mulai dari percobaan yang sangat sederhana. Celupkan sekeping Zn (seng) ke dalam larutan tembaga(II) sulfat yang biru. Dalam beberapa menit kamu akan melihat tiga hal: permukaan seng tertutup lapisan **cokelat**

kehitaman (butiran tembaga halus), warna biru larutan **memudar**, dan gelasnya terasa sedikit **hangat**.

$$\mathrm{Zn\,(s) + Cu^{2+}\,(aq) \longrightarrow Zn^{2+}\,(aq) + Cu\,(s)}$$



Tiga tingkat pengamatan. **Makroskopik:** seng berlapis cokelat kehitaman, biru memudar, gelas menghangat. **Submikroskopik:** atom Zn langsung menyerahkan 2 elektron kepada ion Cu^{2+} yang menempel. **Simbolik:** persamaan reaksi di atas. Semua energinya berubah menjadi panas, belum menjadi listrik.

Reaksi ini adalah redoks (Bab 29): seng **teroksidasi** (melepas elektron) dan ion tembaga **tereduksi** (menerima elektron). Masalahnya, elektron melompat langsung dari atom seng ke ion tembaga yang menempel di permukaannya, sehingga energinya hanya menjadi panas. Bagaimana kalau kita **memisahkan** kedua pihak dan memaksa elektron berjalan lewat kawat? Itulah ide besar **sel volta**.

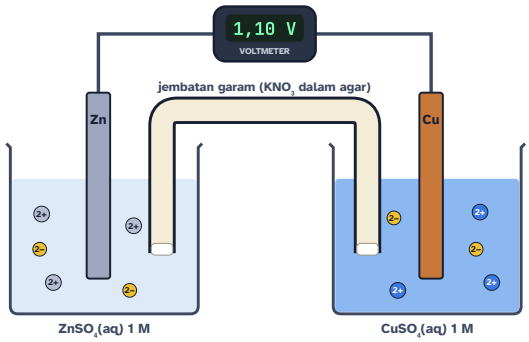
Bahasa sederhana · Bayangkan seng sebagai anak yang ingin sekali membagikan kelerengnya (elektron), sedangkan ion tembaga ingin sekali menerimanya. Kalau mereka duduk bersebelahan, kelereng langsung berpindah tangan dan tidak ada yang istimewa. Tetapi kalau mereka dipisahkan dan kelereng hanya boleh dikirim lewat sebuah perosotan panjang (kawat), kelereng yang meluncur bisa memutar kincir kecil di tengah jalan. Kincir itu adalah lampu, jam, atau ponselmu!

DEFINISI · SEL VOLTA (SEL GALVANI)

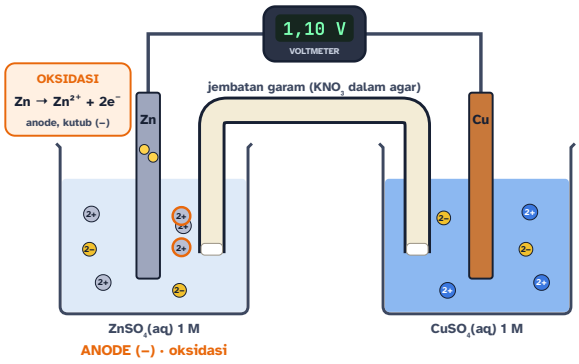
Sel volta adalah sel elektrokimia yang mengubah **energi kimia** dari reaksi redoks **spontan** menjadi **energi listrik**. Oksidasi dan reduksi terjadi di dua tempat terpisah (dua **setengah sel**):

- **Anode** = elektrode tempat terjadinya **oksidasi**.
- **Katode** = elektrode tempat terjadinya **reduksi**.
- **Jembatan garam** = tabung berisi larutan elektrolit (misalnya $\mathrm{KNO_3}$ dalam agar-agar) yang menghubungkan kedua larutan sehingga **ion** dapat berpindah.

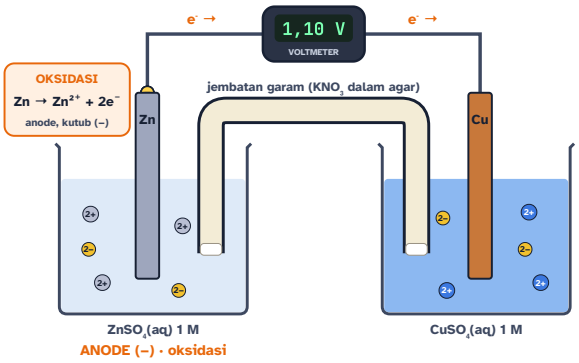
Contoh paling terkenal adalah **sel Daniell**: seng dalam larutan seng sulfat, tembaga dalam larutan tembaga sulfat. Tekan **Lanjut** untuk melihat apa yang dilakukan setiap partikel.



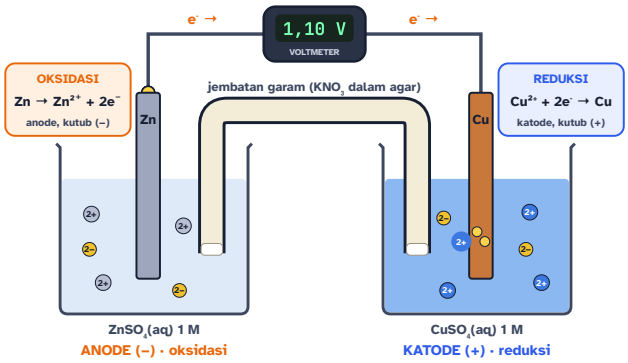
Langkah 1. Sel Daniell. Seng dicelup dalam larutan $\mathrm{ZnSO_4}$ 1 M, tembaga dalam $\mathrm{CuSO_4}$ 1 M. Kedua logam dihubungkan kawat dan voltmeter; kedua larutan dihubungkan jembatan garam berisi $\mathrm{KNO_3}$. Voltmeter membaca 1,10 V.



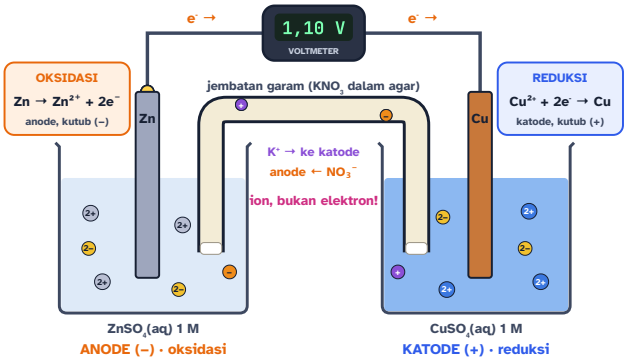
Langkah 2. Di **anode** (seng), atom Zn melepas 2 elektron lalu masuk ke larutan sebagai ion $\mathrm{Zn^{2+}}$: $\mathrm{Zn} \longrightarrow \mathrm{Zn^{2+}} + 2\,\mathrm{e^-}$. Inilah **oksidasi**. Elektronnya tertinggal di logam, sehingga seng menjadi kutub **negatif**.



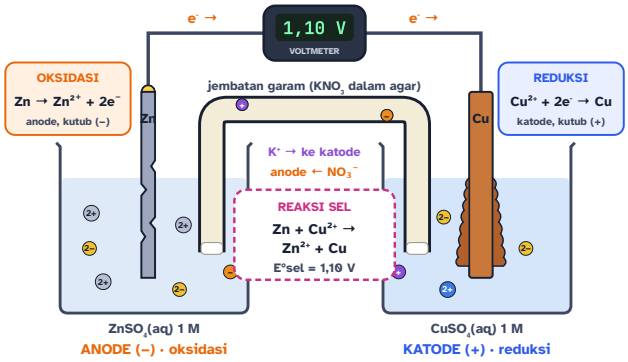
Langkah 3. Elektron yang berdesakan di seng mengalir lewat kawat menuju tembaga. Tegangan 1,10 V adalah "dorongan" yang menggerakkan elektron itu, mirip beda ketinggian yang membuat air mengalir.



Langkah 4. Di **katode** (tembaga), ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ dari larutan menangkap elektron dan menempel sebagai atom Cu: $\mathrm{Cu^{2+}} + 2\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{Cu}$. Inilah **reduksi**; tembaga menjadi kutub **positif**.



Langkah 5. Tanpa penyeimbang, gelas kiri akan kelebihan ion positif dan gelas kanan kekurangan ion positif, lalu aliran berhenti. Jembatan garam mengirim ion $\mathrm{NO_3^-}$ ke gelas anode dan ion $\mathrm{K^+}$ ke gelas katode sehingga kedua larutan tetap netral. **Yang lewat jembatan garam adalah ion, bukan elektron.**



Langkah 6. Beberapa jam kemudian: seng menipis, tembaga menebal, dan warna biru memudar karena $\mathrm{Cu^{2+}}$ terpakai. Reaksi selnya $\mathrm{Zn} + \mathrm{Cu^{2+}} \longrightarrow \mathrm{Zn^{2+}} + \mathrm{Cu}$ dengan $E^\circ_{sel} = 1{,}10$ V.

Perhatikan "lingkaran" muatan yang tertutup: elektron berjalan di **kawat** dari anode ke katode, sedangkan di dalam larutan dan jembatan garam muatan dibawa oleh **ion**. Kation bergerak menuju katode, anion bergerak menuju anode. Putuskan salah satu bagian lingkaran itu, maka arus berhenti.

TRIK KAK TIRTA · KRAO DAN KPAN

KRAO: **K**atode–**R**eduksi, **A**node–**O**ksidasi. Ini berlaku untuk semua sel elektrokimia, kapan pun. Lalu khusus sel volta: **KPAN**, **K**atode **P**ositif, **A**node **N**egatif. (Di sel elektrolisis, Bab 31, kutubnya terbalik: **KNAP**.) Satu lagi: elektron selalu **keluar** dari anode lewat kawat dan **masuk** ke katode. Ion tidak pernah lewat kawat, elektron tidak pernah lewat larutan.

Tebak Dulu!

Kak Tirta mencabut jembatan garam dari sel Daniell yang sedang bekerja. Apa yang terjadi pada voltmeter?

- Tetap 1,10 V, karena elektron masih bisa lewat kawat.
- Turun ke nol, karena lingkaran muatan terputus: ion tidak bisa lagi berpindah antargelas.
- Naik, karena hambatan rangkaian berkurang.
- Berbalik tanda, karena elektron kini lewat larutan.

Jawabannya: turun ke nol. Tanpa jembatan garam, ion Zn^{2+} yang baru terbentuk menumpuk muatan positif di gelas kiri, dan gelas kanan menumpuk muatan negatif (ion sulfat yang ditinggal Cu^{2+}). Dalam sekejap, tumpukan muatan itu menghentikan aliran elektron. Jembatan garam adalah "jalan pulang" bagi muatan; tanpa jalan pulang, tidak ada sirkuit.

AWAS JEBAKAN

Elektron tidak pernah berenang melalui jembatan garam atau larutan. Elektron hanya mengalir di kawat dan logam; di larutan dan jembatan garam, yang bergerak adalah **ion**. Jebakan kedua: "anode selalu positif" itu keliru. Anode didefinisikan sebagai tempat **oksidasi**. Di sel volta, anode justru kutub **negatif**.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1780-an, **Luigi Galvani** di Bologna melihat kaki katak mati berkedut ketika disentuh dua logam berbeda. Ia mengira listrik berasal dari tubuh katak ("listrik hewan"). **Alessandro Volta** tidak setuju: menurutnya listrik berasal dari *dua logam berbeda* yang dipisahkan cairan. Pada 1800 Volta membuktikannya dengan menumpuk lempeng seng dan tembaga (atau perak) berselang-seling, dipisahkan kain yang dibasahi air garam. Inilah baterai pertama di dunia, dan satuan tegangan "volt" dinamai untuk menghormatinya. Tumpukan Volta cepat lemah, sehingga pada 1836 **John Frederic Daniell** merancang sel dua larutan yang tegangannya stabil. Sel Daniell kemudian dipakai untuk jaringan telegraf.

30.2 Potensial elektrode standar dan deret volta

Mengapa seng yang melepas elektron dan bukan tembaga? Bayangkan setiap setengah sel ikut lomba **tarik tambang elektron**. Ion Cu^{2+} menarik elektron lebih kuat daripada ion Zn^{2+}, sehingga tembaga "menang" dan mengambil elektron; seng "kalah" dan terpaksa melepaskannya.

Kekuatan tarikan itu tidak bisa diukur sendirian. Voltmeter selalu membutuhkan **dua** setengah sel. Karena itu kimiawan sepakat memakai satu setengah sel sebagai patokan, seperti tinggi gunung yang selalu diukur dari permukaan laut. Patokannya adalah **elektrode hidrogen standar**: kepingan platina dalam larutan H^+ 1 M yang dialiri gas hidrogen bertekanan 1 bar. Potensialnya **ditetapkan** 0,00 V.

DEFINISI · POTENSIAL REDUKSI STANDAR, E°

Potensial reduksi standar (E°) adalah tegangan sebuah setengah sel, ditulis sebagai reaksi **reduksi**, yang diukur terhadap elektrode hidrogen standar pada **keadaan standar**: 25 °C, konsentrasi ion 1 M, dan tekanan gas 1 bar (≈ 1 atm).

- E° **positif**: spesi itu lebih mudah tereduksi daripada H^+ (oksidator kuat), misalnya Ag^+, Cl_2, F_2.
- E° **negatif**: logamnya lebih mudah teroksidasi daripada H_2 (reduktor kuat), misalnya Li, Mg, Zn.

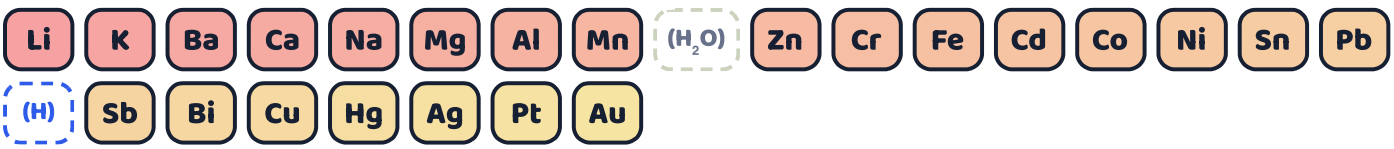
Setengah reaksi reduksi (25 °C)	E° (V)	Catatan
$Li^+ + e^- \longrightarrow Li$	−3,04	reduktor terkuat; anode baterai litium
$K^+ + e^- \longrightarrow K$	−2,93	
$Ca^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Ca$	−2,87	
$Na^+ + e^- \longrightarrow Na$	−2,71	
$Mg^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Mg$	−2,37	anode korban kapal (Bab 31)
$Al^{3+} + 3\,e^- \longrightarrow Al$	−1,66	terlindung lapisan oksida
$2\,H_2O + 2\,e^- \longrightarrow H_2 + 2\,OH^-$	−0,83	air direduksi (larutan basa)
$Zn^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Zn$	−0,76	atap seng, baterai alkalin
$Cr^{3+} + 3\,e^- \longrightarrow Cr$	−0,74	
$Fe^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Fe$	−0,44	paku, pagar, kerangka jembatan
$PbSO_4 + 2\,e^- \longrightarrow Pb + SO_4^{2-}$	−0,36	anode aki
$Ni^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Ni$	−0,25	nikel Sulawesi

$\mathrm{Sn^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Sn}$	−0,14	timah Bangka
$\mathrm{Pb^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Pb}$	−0,13	
$\mathrm{2\,H^+ + 2\,e^- \longrightarrow H_2}$	**0,00**	patokan (elektrode hidrogen standar)
$\mathrm{Cu^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Cu}$	+0,34	kabel listrik
$\mathrm{O_2 + 2\,H_2O + 4\,e^- \longrightarrow 4\,OH^-}$	+0,40	oksigen di larutan basa
$\mathrm{I_2 + 2\,e^- \longrightarrow 2\,I^-}$	+0,54	
$\mathrm{Fe^{3+} + e^- \longrightarrow Fe^{2+}}$	+0,77	pasangan ion (elektrode Pt)
$\mathrm{Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag}$	+0,80	perak Kotagede
$\mathrm{Br_2 + 2\,e^- \longrightarrow 2\,Br^-}$	+1,07	
$\mathrm{O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^- \longrightarrow 2\,H_2O}$	+1,23	katode sel bahan bakar
$\mathrm{Cl_2 + 2\,e^- \longrightarrow 2\,Cl^-}$	+1,36	
$\mathrm{Au^{3+} + 3\,e^- \longrightarrow Au}$	+1,50	emas: logam paling "mulia"
$\mathrm{MnO_4^- + 8\,H^+ + 5\,e^- \longrightarrow Mn^{2+} + 4\,H_2O}$	+1,51	permanganat (Bab 29)
$\mathrm{PbO_2 + 4\,H^+ + SO_4^{2-} + 2\,e^- \longrightarrow PbSO_4 + 2\,H_2O}$	+1,69	katode aki
$\mathrm{F_2 + 2\,e^- \longrightarrow 2\,F^-}$	+2,87	oksidator terkuat

Cara membaca tabel ini: **makin ke bawah**, spesi di kiri panah makin rakus elektron (**oksidator makin kuat**). **Makin ke atas**, logam di kanan panah makin royal melepas elektron (**reduktor makin kuat**). Litium di puncak tabel adalah "dermawan" terbesar, sedangkan fluorin di dasar adalah "perampok" terbesar.

Bahasa sederhana · Gampangnya begini: logam di bagian atas tabel (litium, kalium, magnesium, seng) senang melepas elektron dan mudah "larut" menjadi ion. Logam di bagian bawah (tembaga, perak, emas) lebih suka tetap menjadi logam. Itu sebabnya emas tetap berkilau ratusan tahun, sedangkan seng di atap perlahan menjadi kusam.

Logam-logam yang diurutkan dari E° paling negatif ke paling positif disebut **deret volta** (deret keaktifan logam):



ATURAN · MEMBACA DERET VOLTA

1. Logam di **kiri** lebih mudah teroksidasi (reduktor lebih kuat) daripada logam di kanannya.
2. Logam di kiri dapat **mendesak** (mereduksi) ion logam yang ada di kanannya dari larutan. Contoh: $\mathrm{Fe} + \mathrm{CuSO_4} \longrightarrow \mathrm{FeSO_4} + \mathrm{Cu}$ berlangsung, tetapi $\mathrm{Cu} + \mathrm{FeSO_4}$ tidak bereaksi.
3. Logam di kiri **H** dapat bereaksi dengan asam encer (misalnya HCl) menghasilkan gas $\mathrm{H_2}$; logam di kanan H (Cu, Ag, Au) tidak.
4. Dalam sel volta, logam yang letaknya lebih kiri menjadi **anode**. Makin jauh jarak kedua logam di deret, makin besar tegangan selnya.

CONTOH **Bereaksi atau tidak?**

Ramalkan apakah terjadi reaksi: (a) paku besi dicelup ke larutan $\mathrm{CuSO_4}$; (b) kawat tembaga dicelup ke larutan $\mathrm{ZnSO_4}$; (c) kawat tembaga dicelup ke larutan $\mathrm{AgNO_3}$.

1. (a) Fe di kiri Cu: Fe dapat mendesak $\mathrm{Cu^{2+}}$. Paku berlapis tembaga merah, larutan memudar. **Bereaksi.**
2. (b) Cu di kanan Zn: tembaga tidak mampu mereduksi $\mathrm{Zn^{2+}}$. **Tidak bereaksi.**
3. (c) Cu di kiri Ag: $\mathrm{Cu} + 2\,\mathrm{Ag^+} \longrightarrow \mathrm{Cu^{2+}} + 2\,\mathrm{Ag}$. Kristal perak mengilap tumbuh seperti ranting ("pohon perak"), larutan berubah biru. **Bereaksi.**

Hanya (a) dan (c) yang bereaksi. Kuncinya: logam kiri mendesak ion logam kanan, tidak pernah sebaliknya.

Tebak Dulu!

Kamu punya empat pasangan logam dan larutannya masing-masing (1 M). Pasangan mana yang memberi tegangan sel paling besar?

Seng dan tembaga, karena paling sering dipakai di buku.

Besi dan tembaga, karena besi paling mudah berkarat.

Magnesium dan tembaga.

Tembaga dan perak, karena perak paling mahal.

Jawabannya: magnesium dan tembaga $(0{,}34 - (-2{,}37) = 2{,}71$ V). Tegangan ditentukan oleh **jarak** kedua logam di deret volta, bukan oleh harga atau kepopulerannya. Zn–Cu memberi 1,10 V, Fe–Cu 0,78 V, dan Cu–Ag hanya 0,46 V.

30.3 Potensial sel dan spontanitas

Kalau E° adalah "ketinggian" setiap setengah sel, maka tegangan sel adalah **beda ketinggian** antara keduanya. Elektron "meluncur" dari setengah sel ber-E° rendah (anode) ke setengah sel ber-E° tinggi (katode), seperti air terjun Coban Rondo: makin tinggi tebingnya, makin deras energinya.

ATURAN · POTENSIAL SEL STANDAR

$$E^\circ_{sel} = E^\circ_{katode} - E^\circ_{anode}$$

Keduanya memakai nilai **potensial reduksi** dari tabel, tanpa mengubah tanda. Bila $E^\circ_{sel} > 0$, reaksi berlangsung **spontan** sehingga dapat dipakai sebagai sel volta. Bila $E^\circ_{sel} < 0$, reaksi **tidak spontan** ke arah itu; reaksi kebalikannya yang spontan, atau perlu listrik dari luar (elektrolisis, Bab 31).

RUMUS HIDUP

Potensial sel standar

$$E^\circ_{sel} = E^\circ_{katode} - E^\circ_{anode}$$

Tegangan sel sama dengan 'ketinggian' setengah sel katode dikurangi 'ketinggian' setengah sel anode.

- E°_{katode} — E° katode (reduksi) — V
- E°_{anode} — E° anode (ditulis sebagai reduksi) — V
- E°_{sel} — Potensial sel standar — V

POTENSIAL SEL STANDAR

1,1

V

✔ **E°sel > 0: spontan, bisa jadi sel volta**

sel Daniell (Zn–Cu)

Elektron meluncur dari anode (E° = **-0,76** V) ke katode (E° = **0,34** V) dengan 'beda ketinggian' **1,1** V.

Cek satuan: V – V = V ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ESEL-STANDAR

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Jangan mengalikan E° dengan koefisien reaksi! Potensial adalah besaran **intensif**, seperti suhu atau ketinggian: dua gelas teh bersuhu 60 °C tidak menjadi 120 °C. Reaksi $\mathrm{Cu} + 2\,\mathrm{Ag^+} \longrightarrow \mathrm{Cu^{2+}} + 2\,\mathrm{Ag}$ tetap memakai $E^\circ_{\mathrm{Ag^+/Ag}} = +0{,}80$ V, bukan 1,60 V. Jebakan lain: jangan membalik tanda E° anode lalu mengurangkannya lagi. Pilih salah satu cara saja.

CONTOH **Tegangan sel Daniell**

Hitung E°_{sel} sel Daniell. (E° $Zn^{2+}/Zn = -0{,}76$ V; $Cu^{2+}/Cu = +0{,}34$ V)

1. Katode = E° lebih besar = tembaga (+0,34 V). Anode = seng (−0,76 V).
2. $E^\circ_{sel} = E^\circ_{katode} - E^\circ_{anode} = 0{,}34 - (-0{,}76) = 1{,}10$ V.

$E^\circ_{sel} = +1{,}10$ V. Positif, jadi reaksinya spontan, persis angka yang dibaca voltmeter di stepper tadi.

KERJAKAN BERSAMA **Sel magnesium–perak**

Sebuah sel volta memakai magnesium dalam $Mg(NO_3)_2$ dan perak dalam $AgNO_3$. Tuliskan setengah reaksi, reaksi sel, dan E°_{sel}. (E° $Mg^{2+}/Mg = -2{,}37$ V; $Ag^+/Ag = +0{,}80$ V)

1. Mg lebih negatif → **anode**: $Mg \longrightarrow Mg^{2+} + 2\,e^-$.
2. Ag lebih positif → **katode**: $Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag$, dikali 2 agar elektronnya sama: $2\,Ag^+ + 2\,e^- \longrightarrow 2\,Ag$.
3. Jumlahkan dan coret elektronnya: $Mg + 2\,Ag^+ \longrightarrow Mg^{2+} + 2\,Ag$.
4. $E^\circ_{sel} = 0{,}80 - (-2{,}37) = 3{,}17$ V. Nilai 0,80 **tidak** dikali 2.

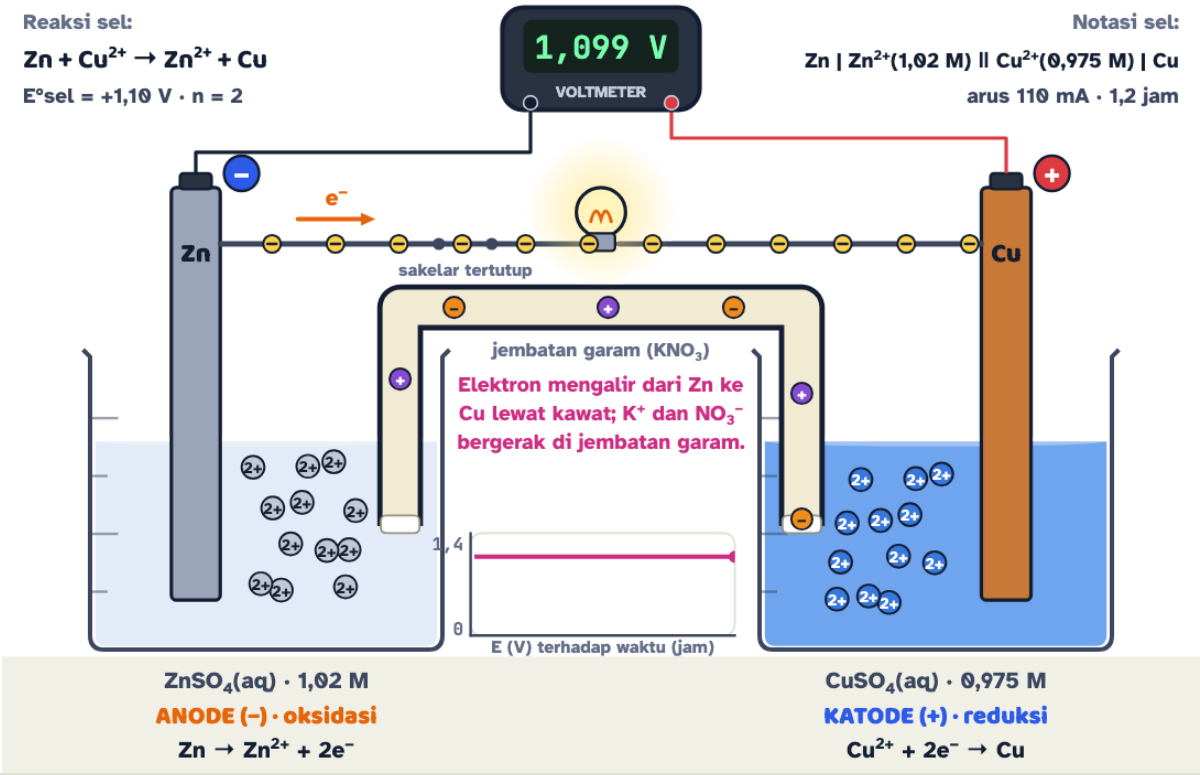
Reaksi sel $Mg + 2\,Ag^+ \longrightarrow Mg^{2+} + 2\,Ag$, $E^\circ_{sel} = 3{,}17$ V, hampir tiga kali sel Daniell.

Sekarang giliranmu merakit sel sendiri. Pilih dua logam, atur konsentrasinya, lalu perhatikan voltmeter, arah elektron, ion di jembatan garam, dan elektrode yang menipis atau menebal.

LAB MINI

Sel Volta Virtual: rakit, ukur, amati

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-30



Voltmeter	E°sel	Anode (–) · oksidasi	Katode (+) · reduksi	Arus (model)
1,099 V	+1,10 V	Zn (seng)	Cu (tembaga)	110 mA

Waktu berjalan	Notasi sel
1,2 jam	Zn | Zn²⁺(1,02 M) ‖ Cu²⁺(0,975 M) | Cu

Ketuk gelas kiri atau kanan untuk mengganti logam, ketuk jembatan garam untuk mencabut atau memasangnya, dan ketuk lampu untuk membuka atau menutup sakelar. Coba: (1) Zn–Cu lalu Mg–Ag, mana yang lebih besar? (2) Cabut jembatan garam, apa kata voltmeter? (3) Pakai logam yang sama di kedua gelas tetapi konsentrasi berbeda: **sel konsentrasi**! (4) Biarkan lampu menyala lama atau tekan ⏩. Mengapa tegangannya perlahan turun?

COBA SENDIRI

Wadah untuk larutan terusi

Peternak ikan menyimpan larutan terusi ($CuSO_4$) untuk membasmi jamur kolam. Bolehkah larutan itu disimpan dalam ember besi? Bagaimana dengan wadah berlapis perak? Jelaskan dengan E°_{sel}.

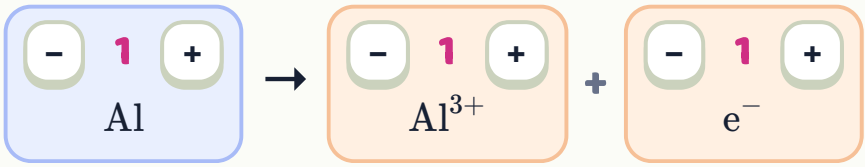
1. Ember besi: reaksi yang mungkin $Fe + Cu^{2+} \longrightarrow Fe^{2+} + Cu$. Fe dioksidasi (anode), Cu^{2+} direduksi (katode).
2. $E^\circ_{sel} = 0{,}34 - (-0{,}44) = +0{,}78$ V > 0 → **spontan**. Ember akan berlapis tembaga, lama-lama keropos, dan terusinya habis.
3. Wadah perak: reaksi yang mungkin $2\,Ag + Cu^{2+} \longrightarrow 2\,Ag^+ + Cu$. $E^\circ_{sel} = 0{,}34 - 0{,}80 = -0{,}46$ V < 0 → **tidak spontan**.

Jangan pakai ember besi; wadah perak (atau, lebih murah, plastik dan kaca) aman. Aturan cepatnya: larutan ion logam aman disimpan dalam wadah logam yang letaknya lebih kanan di deret volta.

Berlatihlah menyetarakan setengah reaksi dan reaksi sel. Ingat, dalam reaksi redoks yang setara, **muatan** juga harus setara, dan jumlah elektron yang dilepas harus sama dengan yang diterima.

PENYETARA REAKSI

Setarakan setengah reaksi dan reaksi sel



Unsur	Kiri	Kanan	
Al	1	1	✓
muatan	0	+2	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 4 null

Perhatikan baris "muatan" di tabel timbangan. Pada $Al + Cu^{2+}$, aluminium melepas 3 elektron, sedangkan tembaga menerima 2. Kelipatan persekutuan terkecilnya 6 elektron, jadi berapa atom Al dan berapa ion

Cu^{2+}?

ADU CEPAT **Adu Cepat: hitung E°sel**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-30

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Katode = E° yang lebih besar. E°sel = E°besar − E°kecil, selalu positif untuk sel volta.

30.4 Notasi sel: menggambar sel dalam satu baris

Menggambar gelas, kawat, dan jembatan garam setiap kali tentu melelahkan. Kimiawan memakai singkatan yang disebut **notasi sel** (diagram sel). Sel Daniell ditulis:

$$\mathrm{Zn\,(s)} \mid \mathrm{Zn^{2+}(aq,\,1\,M)} \parallel \mathrm{Cu^{2+}(aq,\,1\,M)} \mid \mathrm{Cu\,(s)}$$



Anatomi notasi sel. Satu garis tegak memisahkan dua fasa (logam padat | larutan). Garis ganda melambangkan jembatan garam. Konsentrasi atau tekanan ditulis dalam kurung.

ATURAN · MENULIS NOTASI SEL

1. **Anode** ditulis di **kiri**, **katode** di **kanan**. Urutannya mengikuti arah reaksi: dari pereaksi ke hasil di setiap setengah sel.
2. Garis tegak tunggal | = batas fasa; garis ganda || = jembatan garam.
3. Bila setengah reaksi tidak melibatkan logam padat (gas atau pasangan ion), pakai **elektrode inert** seperti platina atau grafit: $\mathrm{Pt\,(s)} \mid \mathrm{H_2\,(g)} \mid \mathrm{H^+\,(aq)}$ atau $\mathrm{Fe^{3+}\,(aq)},\ \mathrm{Fe^{2+}\,(aq)} \mid \mathrm{Pt\,(s)}$. Spesi dalam fasa yang sama dipisah koma.
4. Elektron dan ion jembatan garam **tidak** ditulis.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · URUTAN ABJAD**

"**A**node di kiri, **K**atode di kanan, seperti A yang datang sebelum K di abjad." Lalu baca notasi seperti membaca buku, dari kiri ke kanan: yang di kiri **teroksidasi**, yang di kanan **tereduksi**, dan elektron ikut "membaca" ke arah yang sama.

KERJAKAN BERSAMA — Dari notasi ke reaksi

Diketahui notasi sel $\mathrm{Ni(s)} \mid \mathrm{Ni^{2+}(aq)} \parallel \mathrm{Ag^{+}(aq)} \mid \mathrm{Ag(s)}$. Tuliskan reaksi selnya dan hitung E°_{sel}. (E° $\mathrm{Ni^{2+}/Ni} = -0{,}25$ V; $\mathrm{Ag^{+}/Ag} = +0{,}80$ V)

1. Kiri = anode: $\mathrm{Ni} \longrightarrow \mathrm{Ni^{2+}} + 2\,\mathrm{e^-}$.
2. Kanan = katode: $2\,\mathrm{Ag^{+}} + 2\,\mathrm{e^-} \longrightarrow 2\,\mathrm{Ag}$.
3. Reaksi sel: $\mathrm{Ni} + 2\,\mathrm{Ag^{+}} \longrightarrow \mathrm{Ni^{2+}} + 2\,\mathrm{Ag}$.
4. $E^\circ_{sel} = 0{,}80 - (-0{,}25) = 1{,}05$ V.

$E^\circ_{sel} = +1{,}05$ V, positif, jadi notasi itu menggambarkan sel volta yang benar-benar dapat bekerja.

COBA SENDIRI — Mengukur E° dengan elektrode hidrogen

Laras merakit $\mathrm{Pt(s)} \mid \mathrm{H_2(g,\,1\ bar)} \mid \mathrm{H^{+}(aq,\,1\ M)} \parallel \mathrm{X^{2+}(aq,\,1\ M)} \mid \mathrm{X(s)}$ dan voltmeter membaca +0,34 V. Lalu ia merakit $\mathrm{Y(s)} \mid \mathrm{Y^{2+}(aq,\,1\ M)} \parallel \mathrm{H^{+}(aq,\,1\ M)} \mid \mathrm{H_2(g,\,1\ bar)} \mid \mathrm{Pt(s)}$ dan membaca +0,76 V. Tentukan E° untuk X dan Y, lalu tebak logamnya.

1. Sel pertama: hidrogen di kiri (anode, 0,00 V), X di kanan (katode). $0{,}34 = E^\circ_X - 0{,}00$ → $E^\circ_X = +0{,}34$ V.
2. Sel kedua: Y di kiri (anode), hidrogen di kanan (katode). $0{,}76 = 0{,}00 - E^\circ_Y$ → $E^\circ_Y = -0{,}76$ V.
3. Cocokkan dengan tabel: X = tembaga, Y = seng.

$E^\circ_X = +0{,}34$ V (Cu) dan $E^\circ_Y = -0{,}76$ V (Zn). Begitulah angka-angka di tabel potensial reduksi diukur: satu per satu terhadap elektrode hidrogen.

30.5 Baterai dalam kehidupan

Sel Daniell bagus untuk belajar, tetapi berisi cairan yang mudah tumpah. Baterai adalah sel volta yang dibuat **praktis**: elektrolitnya berupa pasta, gel, atau cairan yang tertutup rapat, ukurannya kecil, dan tahan guncangan. Ada tiga keluarga besar:

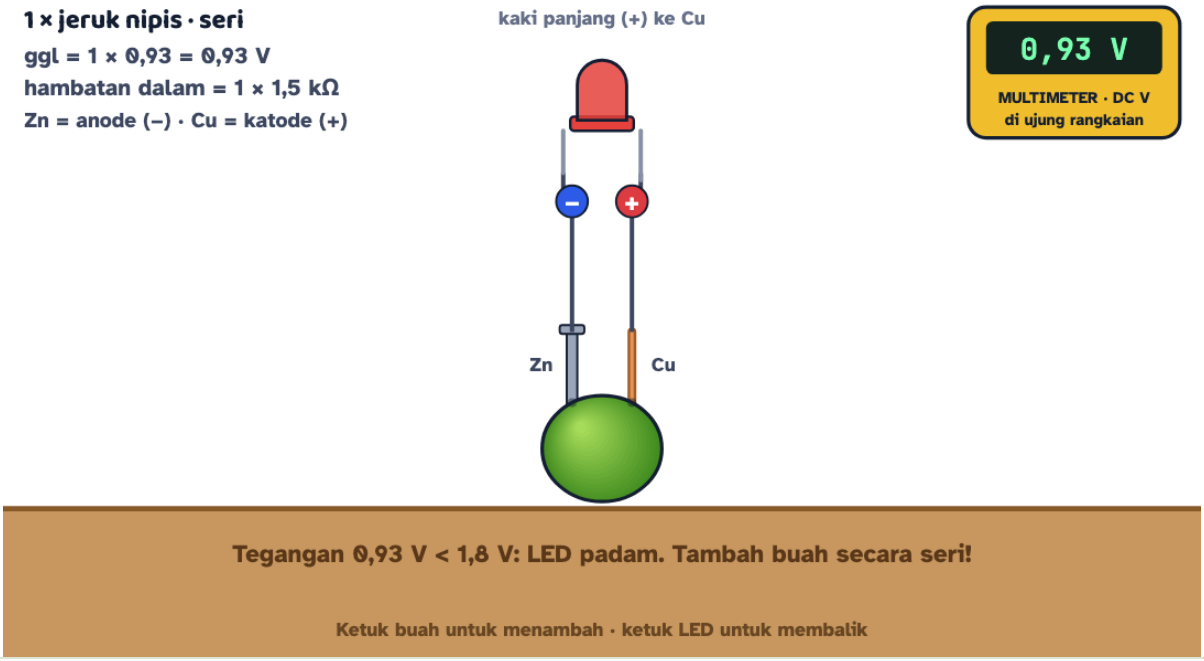
- **Sel primer**: sekali pakai, reaksinya sulit dibalik (baterai seng–karbon, alkalin, kancing).
- **Sel sekunder**: dapat diisi ulang, karena reaksinya dapat dibalik dengan listrik dari luar (aki, litium-ion, NiMH).
- **Sel bahan bakar**: pereaksinya terus dipasok dari luar (hidrogen dan oksigen), jadi tidak pernah "habis" selama bahan bakar ada.

Satu sel hanya memberi tegangan beberapa volt. Untuk tegangan lebih besar, sel dirangkai **seri** (kutub + satu sel ke kutub – sel berikutnya): tegangannya dijumlahkan. Untuk kapasitas atau arus lebih besar, sel dirangkai **paralel**: tegangannya tetap. Coba sendiri dengan buah-buahan!

LAB MINI Baterai Buah: seri atau paralel?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-30

1 × jeruk nipis · seri
ggl = 1 × 0,93 = 0,93 V
hambatan dalam = 1 × 1,5 kΩ
Zn = anode (–) · Cu = katode (+)



Tegangan di ujung rangkaian	Arus	Tegangan tanpa beban (ggl)	Hambatan dalam total
0,93 V	0 mA	0,93 V	1,5 kΩ

Keadaan
Tegangan 0,93 V < 1,8 V: LED padam. Tambah buah secara seri!

Nyalakan LED merah (butuh ±1,8 V) dengan jumlah buah sesedikit mungkin. Ketuk buah untuk menambah jumlahnya, ketuk LED untuk membalik kakinya. Bandingkan susunan seri dan paralel, lalu ganti pasangan logam dan jenis buah. Mengapa kentang rebus lebih "kuat" daripada kentang mentah? Petunjuk: lihat hambatan dalamnya. Jangan lupa "matikan lampu kamar" karena LED dari baterai buah menyala redup.

Baterai	Anode (–)	Katode (+)	Elektrolit	Tegangan per sel	Jenis · contoh
Seng–karbon (Leclanché)	Zn (wadahnya)	MnO_2 + batang grafit	pasta NH_4Cl/$ZnCl_2$	1,5 V	primer · senter, jam dinding
Alkalin	serbuk Zn	MnO_2	pasta KOH	1,5 V	primer · remote, mainan
Perak oksida (kancing)	Zn	Ag_2O	KOH	1,55 V	primer · jam tangan, kalkulator
Timbal–asam (aki)	Pb	PbO_2	H_2SO_4 ±35%	2,0 V (6 sel = 12 V)	sekunder · motor, mobil, UPS
Nikel–metal hidrida (NiMH)	paduan penyimpan hidrogen	NiOOH	KOH	1,2 V	sekunder · baterai AA isi ulang
Litium-ion NMC	grafit berisi Li (LiC_6)	$LiMO_2$, M = Ni, Mn, Co	garam $LiPF_6$ dalam pelarut organik	3,6–3,7 V	sekunder · ponsel, laptop, mobil listrik
Litium besi fosfat (LFP)	grafit berisi Li	$LiFePO_4$	sama dengan di atas	3,2 V	sekunder · motor & bus listrik, penyimpan listrik surya
Sel bahan bakar hidrogen	H_2 (katalis Pt)	O_2 udara (katalis Pt)	membran polimer penghantar H^+	1,23 V (teori), ±0,7 V saat bekerja	bahan bakar · bus hidrogen, wahana antariksa

Aki: baterai timbal–asam

Aki motor dan mobil berisi enam sel yang dirangkai seri. Setiap sel punya lempeng timbal (anode) dan lempeng timbal(IV) oksida (katode) yang terendam asam sulfat. Saat aki dipakai:

$$\text{Anode } (-): \ \mathrm{Pb(s) + SO_4^{2-}(aq) \longrightarrow PbSO_4(s) + 2\,e^-}$$

$$\text{Katode } (+): \ \mathrm{PbO_2(s) + 4\,H^+(aq) + SO_4^{2-}(aq) + 2\,e^-}$$

$$\text{Reaksi sel}: \ \mathrm{Pb + PbO_2 + 2\,H_2SO_4 \longrightarrow 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O}$$

Kedua lempeng sama-sama berubah menjadi $\mathrm{PbSO_4}$, dan asam sulfat terpakai menjadi air. Akibatnya massa jenis elektrolit turun dari sekitar 1,28 g/cm³ (penuh) mendekati 1,1 g/cm³ (kosong). Montir bengkel memeriksanya dengan **hidrometer**. Saat mesin menyala, dinamo (alternator) memaksa reaksi berjalan terbalik sehingga aki terisi kembali. Aki yang lama dibiarkan kosong mengalami **sulfasi**: kristal $\mathrm{PbSO_4}$ membesar dan mengeras sehingga sulit diubah kembali.

⚠ **KESELAMATAN**

Jangan pernah membongkar baterai atau aki. Aki berisi asam sulfat yang **korosif** dan, saat diisi, menghasilkan gas hidrogen yang **mudah menyala**; jauhkan dari percikan api. Baterai litium-ion yang tertusuk, penyok, atau menggembung dapat terbakar hebat: jangan diisi, jangan dibuang ke api, dan serahkan ke tempat pengumpulan limbah elektronik. Baterai alkalin yang bocor mengeluarkan basa korosif (KOH): bersihkan dengan sarung tangan.



Korosif



Mudah menyala



Bahaya lingkungan

Baterai alkalin

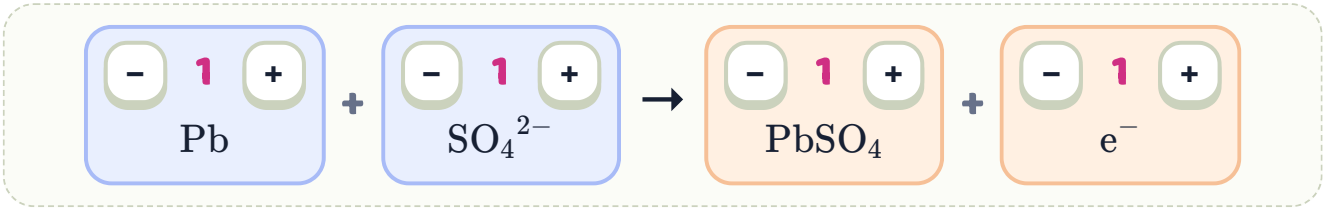
Baterai AA dan AAA di remote televisi biasanya alkalin. Serbuk seng menjadi anode, mangan dioksida menjadi katode, dan pasta kalium hidroksida menjadi elektrolit:

$$\text{Anode}: \ \mathrm{Zn(s) + 2\,OH^-(aq) \longrightarrow ZnO(s) + H_2O(l) + 2\,e^-}$$

$$\text{Katode}: \ \mathrm{2\,MnO_2(s) + H_2O(l) + 2\,e^- \longrightarrow Mn_2O_3(s) + 2\,OH^-(aq)}$$

$$\text{Reaksi sel}: \ \mathrm{Zn + 2\,MnO_2 \longrightarrow ZnO + Mn_2O_3} \qquad \approx 1{,}5\ \text{V}$$

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi di dalam baterai**



Unsur	Kiri	Kanan	
Pb	1 ●	1 ●	✓
S	1 ●	1 ●	✓
O	4 ●●●●	4 ●●●●	✓
muatan	-2	-1	✗



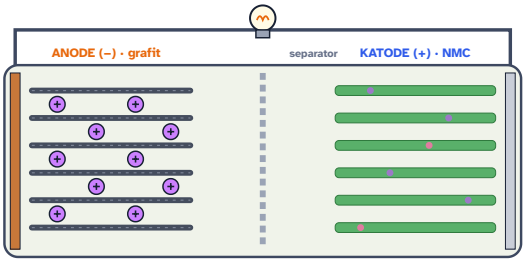
Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Tiga persamaan pertama milik aki, dua berikutnya milik baterai alkalin, dan yang terakhir milik sel bahan bakar. Setarakan atom dulu, lalu cocokkan muatan dengan elektron.

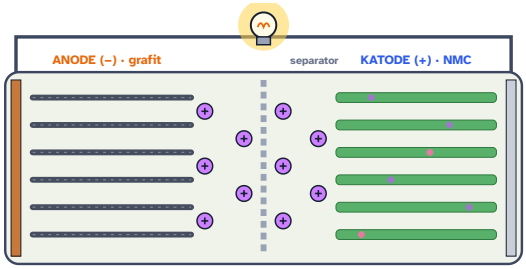
Litium-ion: baterai "kursi goyang"

Mengapa litium? Li adalah logam **paling ringan** (Ar 6,94) sekaligus punya E° **paling negatif** (−3,04 V). Artinya, satu gram litium menyimpan muatan sangat banyak dan memberi tegangan tinggi. Uniknya, baterai litium-ion tidak berisi logam litium. Yang berpindah adalah ion Li^+, berayun bolak-balik di antara dua "rumah": lapisan grafit dan lapisan oksida logam.



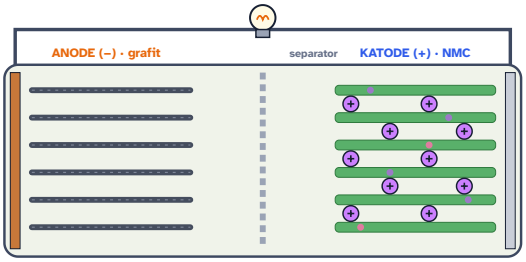
Baterai penuh: litium "menginap" di sela lapisan grafit.

Langkah 1. Baterai penuh. Ion litium tersimpan di sela lapisan grafit pada anode (lempeng tembaga). Katodenya oksida logam berlapis pada lempeng aluminium, misalnya NMC yang kaya **nikel** (hijau), dengan sedikit mangan dan kobalt.



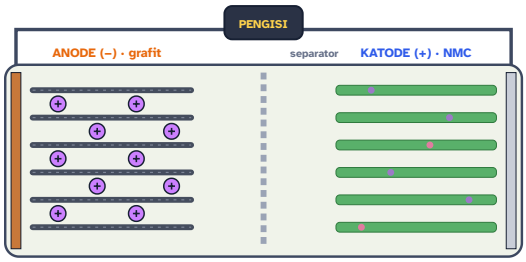
Anode: $LiC_6 \rightarrow C_6 + Li^+ + e^-$ · Katode: $Li^+ + e^-$ + oksida logam → $LiMO_2$

Langkah 2. Dipakai. Di anode litium melepas elektron: $\mathrm{LiC_6} \quad \mathrm{C_6 + Li^+ + e^-}$. Elektron mengalir lewat kabel dan menyalakan lampu, sedangkan ion $\mathrm{Li^+}$ menyeberang lewat elektrolit dan menembus pori separator.



Baterai kosong: ion Li^+ sudah pindah ke lapisan oksida logam.

Langkah 3. Kosong. Ion $\mathrm{Li^+}$ dan elektron bertemu di katode lalu menyusup ke sela lapisan oksida; ion logam transisi di dalamnya (terutama nikel) tereduksi. Bila hampir semua litium sudah pindah, tegangan turun dan ponselmu minta diisi.



Diisi ulang: listrik dari luar memaksa Li^+ dan elektron kembali ke grafit.

Langkah 4. Diisi ulang. Pengisi daya memaksa elektron mengalir terbalik, dan ion $\mathrm{Li^+}$ kembali ke grafit. Ion berayun bolak-balik seperti kursi goyang, ratusan sampai ribuan kali selama umur baterai.

Berapa banyak muatan yang bisa disimpan sejumlah logam? Setiap mol elektron membawa muatan $F = 96.485$ C, sama dengan 26,8 ampere-jam (Ah). Kapasitas powerbank yang tertulis "10.000 mAh" adalah ukuran muatan seperti ini.

RUMUS HIDUP

Kapasitas teoretis logam anode

$$Q = \frac{m}{A_r} \times n \times F$$

Muatan yang dapat dilepas = jumlah mol logam × elektron yang dilepas setiap atom × muatan satu mol elektron.

- m Massa logam anode `g`
- A_r Massa atom relatif `g/mol`
- n Elektron per atom
- Q Kapasitas `mAh`

KAPASITAS

820

mAh

seng di baterai alkalin

1 g logam melepas **2.951,514** C = **820** mAh. Powerbank 10.000 mAh setara dengan **12,197** g logam ini.

Cek satuan: (g ÷ g/mol) × C/mol = C; 1 mAh = 3,6 C ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KAPASITAS-TEORETIS

KIMIA NUSANTARA · NIKEL DARI MOROWALI DAN WEDA BAY

Indonesia memiliki cadangan nikel terbesar di dunia dan kini menjadi produsen nikel terbesar. Bijih laterit dari Sulawesi dan Maluku Utara diolah di kawasan industri seperti **Morowali** (Sulawesi Tengah) dan **Weda Bay** (Halmahera, Maluku Utara). Bijih limonit yang kadar nikelnya rendah dilarutkan dengan asam sulfat pada suhu dan tekanan tinggi (proses HPAL) menjadi endapan campuran hidroksida, lalu dimurnikan menjadi nikel sulfat, bahan katode NMC. Makin tinggi kadar nikel (NMC 811 berarti 8 : 1 : 1 untuk Ni : Mn : Co), makin banyak energi yang tersimpan per kilogram baterai, sehingga mobil dan motor listrik dapat menempuh jarak lebih jauh. Tantangannya nyata: limbah tailing, hutan yang dibuka, dan listrik smelter yang sebagian besar masih dari batu bara. Itu sebabnya daur ulang baterai bekas disebut "tambang masa depan".

TAMU DARI MASA LALU

Gaston Planté membuat aki timbal–asam pertama pada 1859, baterai isi ulang pertama di dunia yang prinsipnya masih dipakai di motor kita. Pada 1866 **Georges Leclanché** menciptakan sel seng–karbon, nenek moyang baterai senter. Lebih dari seabad kemudian, **M. Stanley Whittingham**, **John B. Goodenough**, dan **Akira Yoshino** mengembangkan baterai litium-ion dan menerima Nobel Kimia 2019. Goodenough menerimanya pada usia 97 tahun, peraih Nobel tertua sepanjang sejarah!

Sel bahan bakar hidrogen

Sel bahan bakar mereaksikan hidrogen dan oksigen tanpa nyala api. Pada jenis bermembran polimer, membran hanya meloloskan ion $\mathrm{H^+}$, sehingga elektron terpaksa lewat kabel:

$$\text{Anode}: \ 2\,\mathrm{H_2\,(g)} \longrightarrow 4\,\mathrm{H^+\,(aq)} + 4\,\mathrm{e^-}$$

$$\text{Katode}: \ \mathrm{O_2\,(g)} + 4\,\mathrm{H^+\,(aq)} + 4\,\mathrm{e^-} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2O\,(l)}$$

$$\text{Reaksi sel}: \ 2\,\mathrm{H_2} + \mathrm{O_2} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2O} \qquad E^\circ_{sel} = 1{,}23 - 0$$

Hasil buangnya hanya air. Wahana Apollo yang membawa manusia ke Bulan memakai sel bahan bakar, dan air hasilnya diminum para astronot. Tantangannya ada pada hidrogen itu sendiri: bila dibuat dari gas alam, tetap ada $\mathrm{CO_2}$ yang dilepas; bila dibuat dengan elektrolisis air memakai listrik panas bumi atau surya, barulah benar-benar bersih ("hidrogen hijau").

MITOS

"Baterai menyimpan listrik, seperti tangki menyimpan air."

FAKTA

Baterai menyimpan **energi kimia** dalam bentuk zat pereaksi. Listrik baru "dibuat" saat reaksi redoks berlangsung. Jumlah elektron di baterai penuh dan kosong sama saja; yang berubah adalah zatnya.

MITOS

"Makin besar buahnya, makin tinggi tegangannya."

FAKTA

Tegangan ditentukan oleh **pasangan logam** (selisih E°). Buah besar atau elektrode lebar hanya menurunkan hambatan dalam, sehingga arusnya bisa sedikit lebih besar.

MITOS

"Anode selalu kutub positif."

FAKTA

Anode adalah tempat **oksidasi**. Di sel volta dan baterai yang sedang dipakai, anode justru kutub **negatif**. Di sel elektrolisis (Bab 31), barulah anode menjadi kutub positif.

MITOS

"Aki kering tidak berisi asam."

FAKTA

Aki "kering" (bebas perawatan) tetap aki timbal–asam. Asam sulfatnya terserap dalam serat kaca atau gel sehingga tidak tumpah. Tetap jangan dibongkar!

Kimia di sekitarmu



Aki motor

Enam sel timbal–asam 2 V dirangkai seri menjadi 12 V untuk starter, lampu, dan klakson. Dinamo mengisinya kembali selama mesin hidup.



Motor listrik

Paket berisi puluhan sampai ratusan sel litium-ion (NMC atau LFP) yang dirangkai seri-paralel, umumnya 48–72 V. Katode NMC-nya bisa jadi berisi nikel dari Sulawesi.



Jam tangan & kalkulator

Baterai kancing perak oksida (1,55 V) atau litium (3 V) yang setipis koin bisa bertahan bertahun-tahun karena arus yang diminta sangat kecil.



Pameran sains sekolah

Baterai jeruk, kentang, atau tomat: dua logam berbeda ditambah elektrolit sudah menjadi sel volta. Tegangannya kecil, jadi biasanya dirangkai seri.



Gigi ngilu karena kertas timah

Tambalan logam, kertas aluminium yang tergigit, dan air liur membentuk sel volta kecil di mulut. Arus lemahnya menyentuh saraf gigi: nyut!



Listrik surya di pulau terpencil

Pembangkit listrik tenaga surya di desa kepulauan dilengkapi baterai penyimpan (aki atau LFP) agar lampu tetap menyala setelah matahari terbenam.

30.6 Lanjut: $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$, persamaan Nernst, dan sel konsentrasi

Tegangan sel ternyata punya hubungan erat dengan energi bebas Gibbs (Bab 20). Ketika n mol elektron didorong melewati beda potensial E, kerja listrik yang dihasilkan sama dengan muatan × tegangan, yaitu $nF \times E$. Kerja berguna maksimum itu berasal dari penurunan energi bebas sistem:

HUBUNGAN · ENERGI BEBAS DAN POTENSIAL SEL

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ_{sel} \qquad F = 96.485\ \text{C/mol elektron} \qquad E^\circ_{sel} = \frac{RT}{nF}\ln K$$

n = mol elektron yang dipindahkan dalam persamaan reaksi; F = **tetapan Faraday**, muatan satu mol elektron ($N_A \times e$). $E^\circ_{sel} > 0 \Leftrightarrow \Delta G^\circ < 0 \Leftrightarrow K > 1$: tiga cara mengatakan "spontan".

Mengapa begitu? Menurunkan $\Delta G = -nFE$

Kerja listrik untuk memindahkan muatan Q melalui beda potensial E adalah $w = QE$ (1 C × 1 V = 1 J). Untuk n mol elektron, $Q = nF$, sehingga $w_{listrik} = nFE$. Termodinamika menyatakan bahwa kerja berguna (selain kerja ekspansi) maksimum yang bisa diperoleh dari reaksi pada suhu dan tekanan tetap sama dengan penurunan energi bebasnya: $w_{maks} = -\Delta G$. Jadi $-\Delta G = nFE$, atau $\Delta G = -nFE$. Pada keadaan standar, $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$. Lalu dari $\Delta G^\circ = -RT\ln K$ (Bab 22) diperoleh $E^\circ = \frac{RT}{nF}\ln K$.

RUMUS HIDUP **ΔG° dari E°sel**

$$\Delta G^\circ = -n\,F\,E^\circ_{sel}$$

Makin banyak elektron yang dipindahkan dan makin besar tegangannya, makin besar energi bebas yang dilepaskan.

n Elektron yang dipindahkan `mol`

E°_{sel} Potensial sel standar `V`

ΔG° Energi bebas standar `kJ`

ENERGI BEBAS STANDAR

-212,3

kJ

ΔG° < 0: spontan, K > 1 **sel Daniell: −212 kJ**

n = **2**, E°sel = **1,1** V → ΔG° = **-212,3** kJ, dan log K = **37,187** pada 25 °C.

Cek satuan: mol × C/mol × V = J; ÷ 1000 = kJ ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-DG-ESEL

KERJAKAN BERSAMA **Energi dari sel Daniell**

Hitung ΔG° dan K untuk $\mathrm{Zn} + \mathrm{Cu}^{2+} \longrightarrow \mathrm{Zn}^{2+} + \mathrm{Cu}$ ($E^\circ_{sel} = 1{,}10$ V) pada 25 °C.

1. Elektron yang dipindahkan: $n = 2$.
2. $\Delta G^\circ = -2 \times 96.485 \times 1{,}10 = -212.267\ \mathrm{J} \approx -212\ \mathrm{kJ}$.
3. $\log K = \dfrac{nE^\circ}{0{,}0592} = \dfrac{2 \times 1{,}10}{0{,}0592} = 37{,}2$, jadi $K \approx 10^{37}$.

$\Delta G^\circ \approx -212$ kJ dan $K \approx 10^{37}$: reaksi praktis berjalan tuntas. Tidak heran seng di larutan terusi cepat sekali berlapis tembaga.

Tabel E° hanya berlaku pada 1 M. Di baterai sungguhan, konsentrasi terus berubah: pereaksi berkurang, hasil reaksi bertambah. Bagaimana tegangannya? Jawabannya dirumuskan oleh **Walther Nernst** pada 1889.

PERSAMAAN NERNST

$$E_{sel} = E^\circ_{sel} - \frac{RT}{nF}\ln Q \qquad \Longrightarrow \qquad E_{sel} = E^\circ_{sel} - \frac{0{,}0592}{n}\log Q \quad (25\ ^\circ\mathrm{C})$$

Q adalah kuosien reaksi (Bab 22) yang ditulis dari reaksi sel; padatan tidak ikut dimasukkan. Untuk sel Daniell, $Q = \dfrac{[\mathrm{Zn}^{2+}]}{[\mathrm{Cu}^{2+}]}$.

RUMUS HIDUP

Persamaan Nernst

$$E_{sel} = E^{\circ}_{sel} - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

Tegangan sel nyata = tegangan standar dikurangi 'hukuman' karena hasil reaksi sudah menumpuk (Q besar).

- E°_{sel} Potensial sel standar V
- n Elektron yang dipindahkan
- Q Kuosien reaksi
- T Suhu K
- E_{sel} Potensial sel V

POTENSIAL SEL

1,1

V

Q = 1: E = E°

Q = **1** pada **298** K memberi E = **1,1** V, selisih **0** V dari E°.

Cek satuan: (J/mol·K × K) ÷ (C/mol) = J/C = V ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-NERNST

Seiring baterai dipakai, Q terus membesar sehingga E perlahan turun. Ketika Q mencapai K, $E = 0$: reaksi sudah setimbang dan tidak ada lagi dorongan bagi elektron. **Baterai "mati" adalah baterai yang mencapai kesetimbangan.** Seret titiknya untuk melihatnya.

GRAFIK HIDUP

Tegangan turun saat reaksi berjalan (E vs log Q)

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-30

$$E = E^\circ - \frac{0{,}0592}{n} \log Q$$

$$\log Q = 0: \quad E = 1{,}1\ \text{V}, \quad \log K = 37{,}19$$



Q = 1: keadaan standar, E = E°

E	ΔG	log K
1,1 V	-212,3 kJ	37,2

Sel Daniell (E° = 1,10 V, n = 2) baru "mati" ketika log Q ≈ 37, yaitu ketika [Zn^{2+}] kira-kira 10^{37} kali [Cu^{2+}]. Kecilkan E° atau ubah n: titik hijau Q = K bergeser. Garis lebih landai bila n lebih besar.

COBA SENDIRI **Sel Daniell tidak standar**

Hitung tegangan $\mathrm{Zn(s)} \mid \mathrm{Zn^{2+}(0{,}010\ M)} \parallel \mathrm{Cu^{2+}(2{,}0\ M)} \mid \mathrm{Cu(s)}$ pada 25 °C. ($E^\circ_{sel} = 1{,}10$ V)

1. Reaksi sel $\mathrm{Zn} + \mathrm{Cu^{2+}} \longrightarrow \mathrm{Zn^{2+}} + \mathrm{Cu}$, $n = 2$.
2. $Q = \dfrac{[\mathrm{Zn^{2+}}]}{[\mathrm{Cu^{2+}}]} = \dfrac{0{,}010}{2{,}0} = 0{,}0050$; $\log Q = -2{,}30$.
3. $E = 1{,}10 - \dfrac{0{,}0592}{2}(-2{,}30) = 1{,}10 + 0{,}068 = 1{,}168$ V.

$E \approx 1{,}17$ V, sedikit di atas 1,10 V karena pereaksinya ($\mathrm{Cu^{2+}}$) melimpah dan hasilnya ($\mathrm{Zn^{2+}}$) sedikit, sesuai prinsip Le Chatelier.

Sel konsentrasi memakai dua setengah sel yang **sama persis** tetapi konsentrasinya berbeda, misalnya $\mathrm{Cu(s)} \mid \mathrm{Cu^{2+}(0{,}010\ M)} \parallel \mathrm{Cu^{2+}(1{,}0\ M)} \mid \mathrm{Cu(s)}$. Karena $E^\circ_{sel} = 0$, seluruh tegangannya berasal dari suku Nernst: $E = -\dfrac{0{,}0592}{2}\log\dfrac{0{,}010}{1{,}0} = +0{,}059$ V. Tembaga di larutan encer larut (anode) sehingga larutannya makin pekat, sedangkan di larutan pekat $\mathrm{Cu^{2+}}$ mengendap (katode) sehingga larutannya makin encer. Sel berhenti ketika kedua konsentrasi sama. Coba di Lab Mini Sel Volta Virtual: pilih tembaga di kedua gelas dengan konsentrasi berbeda.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGGABUNGKAN SETENGAH REAKSI DAN SEL KONSENTRASI DI TUBUHMU

E° tidak boleh dijumlahkan, ΔG° boleh. Untuk mendapatkan E° setengah reaksi $\mathrm{Fe^{3+}} + 3\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{Fe}$ dari $\mathrm{Fe^{3+}} + \mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{Fe^{2+}}$ (+0,77 V) dan $\mathrm{Fe^{2+}} + 2\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{Fe}$ (−0,44 V), jumlahkan energi bebasnya: $-3FE^\circ = -1F(0{,}77) - 2F(-0{,}44)$, sehingga $E^\circ = \dfrac{0{,}77 - 0{,}88}{3} = -0{,}037$ V. Menjumlahkan potensialnya langsung (0,33 V) adalah kesalahan klasik di olimpiade. Aturan ini hanya diperlukan saat hasilnya masih setengah reaksi; untuk reaksi sel lengkap, elektron sudah saling meniadakan dan $E^\circ_{sel} = E^\circ_{katode} - E^\circ_{anode}$ tetap berlaku.

Sel saraf adalah sel konsentrasi. Di dalam sel saraf $[\mathrm{K^+}] \approx 140$ mM, di luar ±5 mM. Membran yang hanya meloloskan $\mathrm{K^+}$ membangun potensial Nernst $E = \dfrac{RT}{F}\ln\dfrac{[\mathrm{K^+}]_{luar}}{[\mathrm{K^+}]_{dalam}} \approx 61{,}5\ \mathrm{mV} \times \log\dfrac{5}{140} \approx -89$ mV pada 37 °C. Potensial istirahat nyata ±−70 mV karena membran juga sedikit meloloskan $\mathrm{Na^+}$.

pH-meter juga sel konsentrasi. Elektrode kaca peka terhadap $[\mathrm{H^+}]$; tegangannya berubah ±59 mV untuk setiap satu satuan pH pada 25 °C. Dengan Nernst yang sama, tegangan sel juga dapat dipakai untuk menghitung K_{sp} garam yang sangat sukar larut.

Cek Cepat

Pada sel volta Zn–Cu, elektron mengalir ...

- dari Cu ke Zn lewat kawat
- dari Zn ke Cu lewat jembatan garam
- dari Zn ke Cu lewat kawat
- dari Cu ke Zn lewat larutan

$E^\circ\ \mathrm{Fe^{2+}/Fe} = -0{,}44$ **V dan** $\mathrm{Ag^{+}/Ag} = +0{,}80$ **V. Berapa** E°_{sel} **sel besi–perak?**

- 1,24 V
- 0,36 V
- 2,04 V
- –1,24 V

Mengapa aki motor termasuk sel sekunder?

- Karena dipakai setelah baterai primer habis
- Karena tegangannya separuh baterai primer
- Karena memakai dua jenis logam
- Karena reaksinya dapat dibalik dengan mengisi ulang

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: baterai jeruk nipis dan kentang

Bahan: 3–4 jeruk nipis atau kentang (kentang rebus lebih baik), 4 paku galvanis (paku berlapis seng dari toko bangunan), 4 potong kawat tembaga ±8 cm (dari kabel bekas yang dikupas) atau koin berwarna tembaga, kabel berpenjepit buaya, 1 LED merah kecil, multimeter (bila ada), amplas.

1. Amplas paku dan kawat sampai mengilap. Gulingkan jeruk sambil ditekan pelan agar sarinya keluar.
2. Tusukkan satu paku dan satu kawat tembaga ke setiap buah, berjarak ±2 cm, tidak saling bersentuhan.
3. Bila ada multimeter (pilih DC V), ukur tegangan satu buah: kabel hitam ke paku, merah ke tembaga.
4. Rangkai seri: tembaga buah pertama ke paku buah kedua, dan seterusnya. Ukur lagi setiap kali buah ditambah.
5. Hubungkan LED: kaki panjang ke ujung tembaga, kaki pendek ke ujung paku. Amati di ruangan yang gelap.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Ujung paku dan kawat tajam, jadi tusukkan menjauhi tangan. Jangan pernah menyambungkan rangkaian ke stopkontak, aki, atau baterai sungguhan, dan jangan membongkar baterai apa pun. Buah yang sudah ditusuk logam mengandung ion seng dan tembaga: **jangan dimakan** dan jangan diberikan ke hewan; bungkus dengan plastik lalu buang ke tempat sampah. Cuci tangan dengan sabun setelah selesai.

Pertanyaan: Berapa buah yang diperlukan agar LED menyala? Apakah tegangannya naik sebanding dengan jumlah buah? Bagaimana jika koin diganti paku besi biasa?

RINGKASAN KILAT — Bab 30 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan susunan dan cara kerja **sel volta** (sel Daniell): **anode**, **katode**, arah elektron, dan peran **jembatan garam**
- memakai **tabel potensial reduksi standar** dan **deret volta** untuk meramalkan logam mana yang teroksidasi
- menghitung **potensial sel standar** E°_{sel} dan menentukan apakah sebuah reaksi redoks berlangsung spontan
- menulis dan membaca **notasi sel**
- menjelaskan kimia **aki**, **baterai alkalin**, **litium-ion** (dan peran nikel Indonesia), serta **sel bahan bakar hidrogen**; lalu (tingkat lanjut) memakai **persamaan Nernst** dan $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$

Istilah kunci

sel volta · Sel volta · Anode · Katode · Jembatan garam · sel Daniell · elektrode hidrogen standar · Potensial reduksi standar · deret volta · notasi sel · Sel primer · Sel sekunder · Sel bahan bakar · Sel konsentrasi

Rumus penting

$$E^\circ_{sel} = E^\circ_{katode} - E^\circ_{anode}$$

Potensial sel standar. Tegangan sel sama dengan 'ketinggian' setengah sel katode dikurangi 'ketinggian' setengah sel anode.

$$Q = \frac{m}{A_r} \times n \times F$$

Kapasitas teoretis logam anode. Muatan yang dapat dilepas = jumlah mol logam × elektron yang dilepas setiap atom × muatan satu mol elektron.

$$\Delta G^\circ = -n\,F\,E^\circ_{sel}$$

ΔG° dari E°sel. Makin banyak elektron yang dipindahkan dan makin besar tegangannya, makin besar energi bebas yang dilepaskan.

$$E_{sel} = E^\circ_{sel} - \frac{R\,T}{n\,F}\ln Q$$

Persamaan Nernst. Tegangan sel nyata = tegangan standar dikurangi 'hukuman' karena hasil reaksi sudah menumpuk (Q besar).

⚠ **Jangan sampai terjebak**

- Elektron tidak pernah berenang melalui jembatan garam atau larutan.
- Jangan mengalikan E° dengan koefisien reaksi!
- Jangan pernah membongkar baterai atau aki.

⛰ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=30

🧩 Teka-teki untuk Bab 31

Di bab ini reaksi redoks yang spontan menghasilkan listrik. Bisakah sebaliknya: listrik dari luar **memaksa** reaksi yang tidak spontan berjalan? Aluminium ($E^\circ = -1{,}66$ V) sangat enggan melepaskan oksigennya, sehingga sulit sekali dibuat dari bijihnya. Lalu bagaimana pabrik di Kuala Tanjung, Sumatra Utara, menghasilkan ratusan ribu ton aluminium setiap tahun?

▼ **Intip petunjuk**

Ya, bisa! Bila sumber listrik luar memberi tegangan lebih besar daripada $|E_{sel}|$, reaksi ber-E° negatif dapat dipaksa berjalan. Itulah **elektrolisis**. Aluminium dibuat dengan mengelektrolisis leburan Al_2O_3 dalam kriolit pada arus ratusan ribu ampere (proses Hall–Héroult). Mengisi ulang aki dan ponselmu sebenarnya juga elektrolisis kecil-kecilan. Selengkapnya di Bab 31.

BAB 31 · REDOKS & ELEKTROKIMIA

31 Elektrolisis & Korosi: Listrik yang Memaksa, Karat yang Menggerogoti

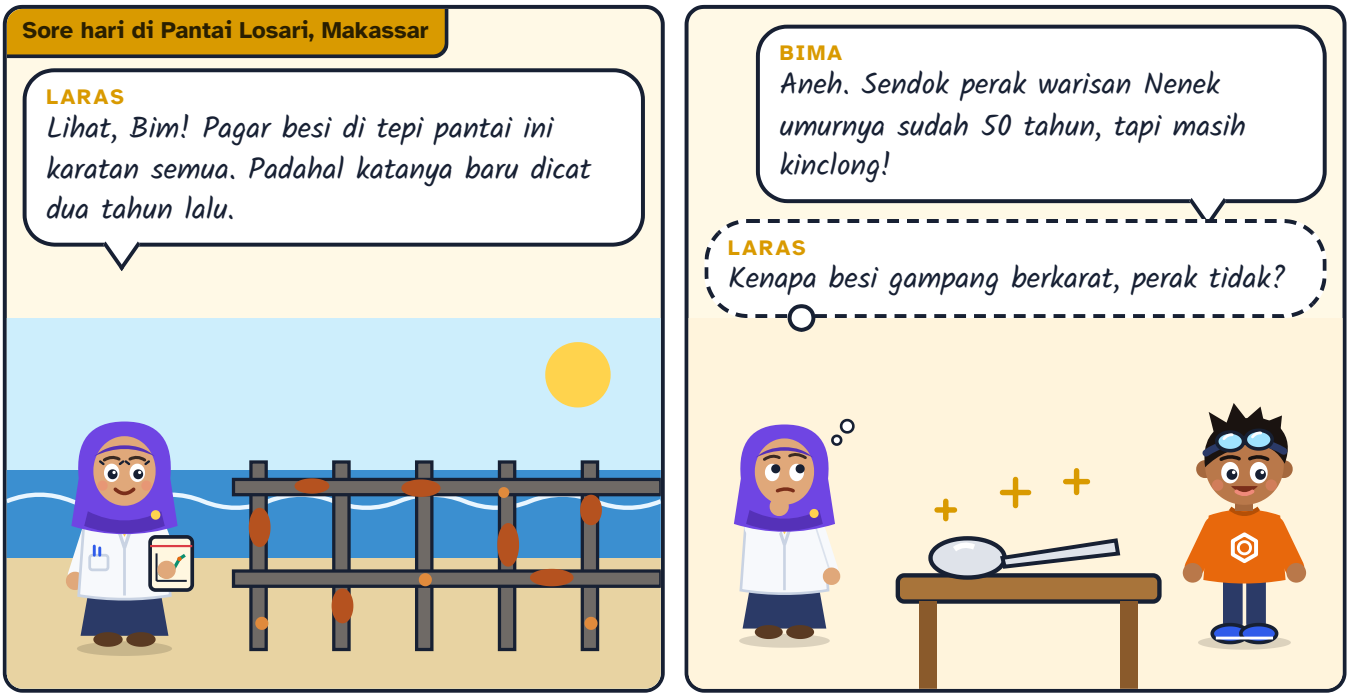
Di Bab 30, reaksi kimia menghasilkan listrik. Sekarang kita membaliknya: listrik dipakai untuk memaksa reaksi yang tidak mau berjalan sendiri, dari membuat aluminium sampai menyepuh perhiasan. Lalu kita berkenalan dengan musuh lama para insinyur, yaitu karat: sel volta mini yang diam-diam memakan besi.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **sel elektrolisis** dan sel volta dari arah energi, tanda kutub, serta tempat oksidasi dan reduksi;
- meramalkan produk elektrolisis **leburan** dan **larutan** dengan aturan katode–anode, termasuk air garam yang menghasilkan H_2, Cl_2, dan NaOH;
- menghitung muatan, massa endapan, volume gas, dan waktu dengan **hukum Faraday**;
- menjelaskan penyepuhan, pemurnian tembaga, proses **Hall–Héroult**, dan industri **klor-alkali**;
- menjelaskan **korosi besi** sebagai sel volta mini dan memilih cara pencegahannya: cat, galvanisasi, proteksi katodik, atau baja tahan karat.

PAGAR BERKARAT, SENDOK PERAK

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kak Tirta mengelektrolisis air yang diberi sedikit garam $\mathrm{Na_2SO_4}$ agar dapat menghantar listrik. Gas hidrogen terkumpul di atas katode dan gas oksigen di atas anode. Bagaimana perbandingan volume kedua gas itu?

Sama banyak, karena keduanya berasal dari air yang sama.

Oksigen dua kali lebih banyak, karena molekul $\mathrm{O_2}$ lebih besar.

Hidrogen dua kali lebih banyak daripada oksigen.

Tidak ada gas yang terbentuk, airnya hanya menjadi hangat.

Jawabannya: hidrogen dua kali lebih banyak. Rumus air $\mathrm{H_2O}$ berisi dua atom H untuk setiap satu atom O, sehingga $2\,\mathrm{H_2O} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2} + \mathrm{O_2}$. Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas sebanding dengan jumlah molekulnya (Bab 14). Dilihat dari elektronnya: membuat satu molekul $\mathrm{O_2}$ butuh 4 elektron, sedangkan satu $\mathrm{H_2}$ cukup 2. Dengan aliran elektron yang sama, $\mathrm{H_2}$ yang terbentuk dua kali lebih banyak.

31.1 Sel elektrolisis lawan sel volta

Di Bab 30, seng yang dicelup larutan tembaga sulfat melepas elektron dengan sendirinya. Reaksinya **spontan**, dan aliran elektronnya bisa menyalakan lampu. Bagaimana jika kita ingin reaksi yang **tidak** mau berjalan sendiri,

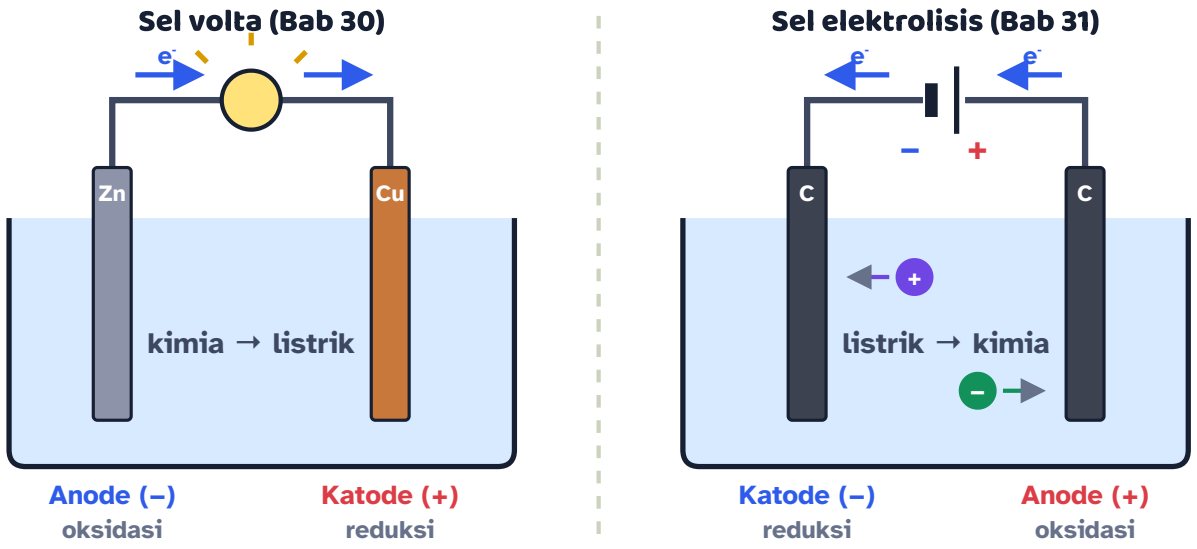
misalnya memecah garam dapur menjadi logam natrium dan gas klorin? Jawabannya: dorong dengan listrik!

Bayangkan air di rumahmu. Air mengalir sendiri dari tandon di atap ke keran: itu seperti sel volta, dan alirannya bisa memutar kincir kecil. Untuk menaikkan air dari sumur ke tandon, kamu butuh **pompa listrik**. Elektrolisis adalah "pompa" kimia: energi listrik memaksa elektron mengalir ke arah yang tidak disukainya.

Bahasa sederhana · Kata *elektrolisis* berarti "menguraikan dengan listrik". Kita mencelupkan dua batang (elektrode) ke dalam cairan yang berisi ion, lalu menyambungkannya ke baterai. Di batang yang tersambung ke kutub negatif, zat menerima elektron. Di batang yang tersambung ke kutub positif, zat melepas elektron. Hasilnya bisa berupa gelembung gas, lapisan logam, atau perubahan warna.

DEFINISI · ELEKTROLISIS

Elektrolisis adalah peruraian zat elektrolit (leburan atau larutan) oleh arus listrik searah. Alatnya disebut **sel elektrolisis**, yang mengubah **energi listrik menjadi energi kimia**. Isinya: sumber arus searah, **elektrolit** (zat yang ion-ionnya bebas bergerak), dan dua elektrode. **Katode** adalah elektrode tempat **reduksi**; pada sel elektrolisis ia disambung ke kutub negatif. **Anode** adalah elektrode tempat **oksidasi**; pada sel elektrolisis ia disambung ke kutub positif.



Pada kedua sel, elektron di kawat selalu mengalir dari anode ke katode, dan oksidasi selalu terjadi di anode. Yang berbeda adalah **tanda kutub** dan **arah energi**. Di dalam larutan, yang bergerak adalah ion: kation ke katode, anion ke anode.

Aspek	Sel volta	Sel elektrolisis
Perubahan energi	kimia → listrik	listrik → kimia
Reaksi	spontan, $E^\circ_{sel} > 0$	tidak spontan, $E^\circ_{sel} < 0$, dipaksa sumber arus
Katode (reduksi)	kutub **positif**	kutub **negatif**

Anode (oksidasi)	kutub **negatif**	kutub **positif**
Contoh	baterai senter, aki saat dipakai, sel bahan bakar	penyepuhan, pemurnian tembaga, pembuatan aluminium, aki dan baterai HP saat diisi ulang

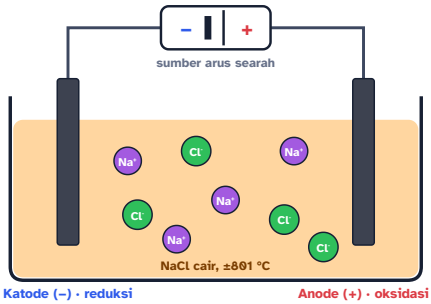
✏️ **TRIK KAK TIRTA**

Untuk semua jenis sel: **"KaRed–AnOks"**, Katode Reduksi, Anode Oksidasi. Untuk tanda kutub sel elektrolisis: **"KNAP"**, Katode Negatif, Anode Positif. Sel volta kebalikannya: **"KPAN"**. Kalau bingung, ingat saja bahwa kutub negatif sumber arus "menyemprotkan" elektron, dan zat yang menerima elektron pasti tereduksi.

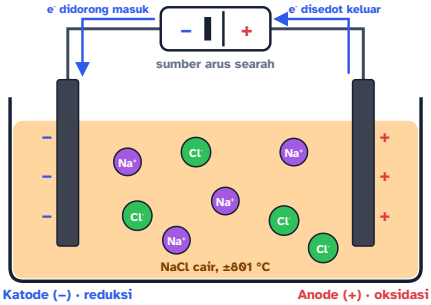
⚠️ **AWAS JEBAKAN**

"Anode selalu kutub positif" itu keliru. Yang selalu benar adalah **anode = tempat oksidasi**. Pada sel volta, anode justru kutub negatif karena di situlah elektron dilepas. Satu lagi: elektron **tidak** berenang melewati larutan. Elektron hanya mengalir di kawat dan elektrode; di dalam larutan atau leburan, muatan dibawa oleh ion.

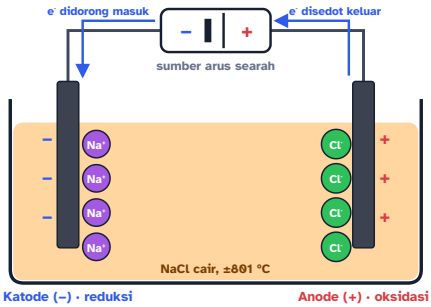
Mari kita lihat apa yang terjadi pada partikel-partikelnya, memakai contoh paling klasik: elektrolisis lelehan garam dapur.



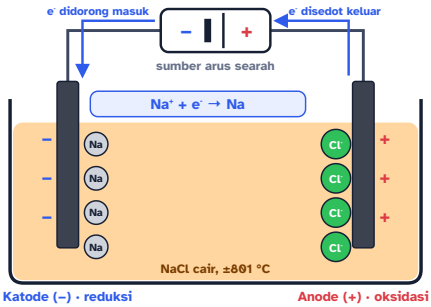
Langkah 1. Garam padat tidak menghantar listrik karena ion-ionnya terkunci di dalam kisi. Setelah dilelehkan (±801 °C), ion $\mathrm{Na^+}$ dan $\mathrm{Cl^-}$ bebas bergerak.



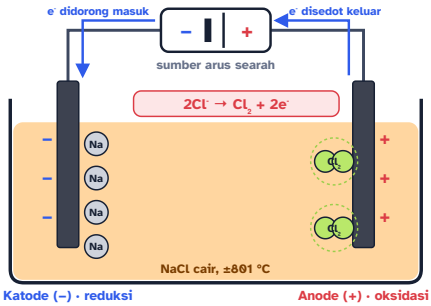
Langkah 2. Sumber arus dinyalakan. Ia mendorong elektron **masuk** ke elektrode kiri (menjadi negatif: **katode**) dan menyedot elektron **keluar** dari elektrode kanan (menjadi positif: **anode**).



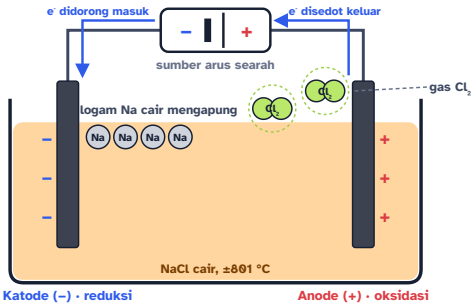
Langkah 3. Muatan berlawanan saling menarik: kation $\mathrm{Na^+}$ bergerak ke katode (–), anion $\mathrm{Cl^-}$ ke anode (+). Di dalam lelehan, yang berjalan adalah **ion**, bukan elektron.



Langkah 4. Di katode terjadi **reduksi**: $\mathrm{Na^+ + e^-} \longrightarrow \mathrm{Na}$. Setiap ion natrium menerima satu elektron dan menjadi atom natrium.



Langkah 5. Di anode terjadi **oksidasi**: $\mathrm{2\,Cl^-} \longrightarrow \mathrm{Cl_2 + 2\,e^-}$. Elektron yang dilepas ditarik kembali ke sumber arus, sehingga rangkaian tertutup.



Langkah 6. Hasilnya: logam natrium cair mengapung (lebih ringan daripada lelehan garam) dan gas klorin keluar. Reaksi totalnya $\mathrm{2\,NaCl\,(l)} \longrightarrow \mathrm{2\,Na\,(l) + Cl_2\,(g)}$. Pabrik natrium (sel Downs) memakai cara ini, dengan tambahan $\mathrm{CaCl_2}$ agar garam meleleh pada ±600 °C.

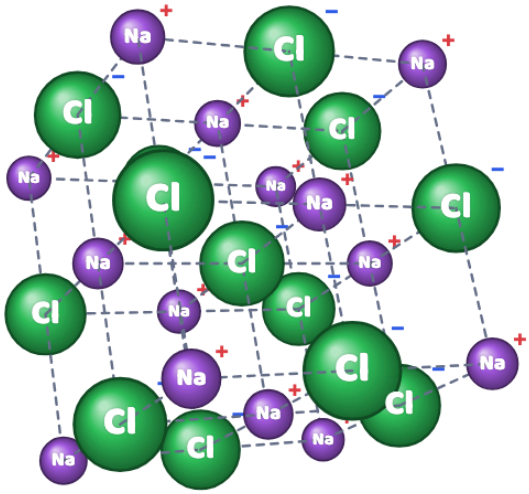
TAMU DARI MASA LALU

Pada 1807, **Humphry Davy** di London mengalirkan arus dari tumpukan baterai raksasa ke lelehan kalium hidroksida. Butiran logam mengkilap muncul, menyala, lalu terbakar: kalium, unsur yang belum pernah dilihat manusia! Beberapa hari kemudian ia mendapat natrium, dan tahun berikutnya magnesium, kalsium, stronsium, serta barium. Asisten mudanya, **Michael Faraday**, kelak menemukan hukum elektrolisis (1833–1834) dan, dibantu William Whewell, menciptakan kata-kata yang kita pakai sampai sekarang: *elektrolisis, elektrode, anode, katode, ion, anion, kation*.

31.2 Elektrolisis leburan dan larutan: siapa yang menang di elektrode?

Pada **leburan** (lelehan tanpa air), tidak ada persaingan. Kation logam pasti direduksi di katode, dan anionnya dioksidasi di anode. Lelehan $\mathrm{MgCl_2}$ memberi magnesium dan klorin; lelehan $\mathrm{Al_2O_3}$ memberi aluminium. Begitulah logam-logam yang sangat reaktif (Na, Mg, Al) dibuat, karena tidak ada reduktor kimia murah yang cukup kuat untuk merebutnya dari senyawanya.

MOLEKUL 3D Mengapa garam padat tidak bisa dielektrolisis?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Kisi natrium klorida (NaCl) NaCl

Setiap ion $\mathrm{Na^+}$ dikelilingi 6 ion $\mathrm{Cl^-}$ dan sebaliknya (bilangan koordinasi 6). Tidak ada "molekul" NaCl, yang ada kisi raksasa.

Putar kisi NaCl: setiap ion $\mathrm{Na^+}$ dikelilingi enam ion $\mathrm{Cl^-}$ dan terkunci rapat, sehingga tidak bisa berjalan ke elektrode. Setelah dilelehkan atau dilarutkan, ion-ion itu bebas. Lalu lihat molekul air: dalam larutan, air ikut "mendaftar" sebagai calon yang direduksi atau dioksidasi. Terakhir, lihat produk-produknya: $\mathrm{Cl_2}$, $\mathrm{H_2}$, dan $\mathrm{O_2}$.

Pada **larutan**, ceritanya lebih seru. Selain ion zat terlarut, ada molekul air yang juga bisa direduksi atau dioksidasi:

$$\text{katode: } 2\,\mathrm{H_2O} + 2\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{H_2} + 2\,\mathrm{OH^-} \quad (E^\circ = -0{,}83$$

$$\text{anode: } 2\,\mathrm{H_2O} \longrightarrow \mathrm{O_2} + 4\,\mathrm{H^+} + 4\,\mathrm{e^-} \quad (E^\circ_{red} = +1{,}23\ \mathrm{V}$$

Di katode, yang menang adalah zat yang **paling mudah direduksi** (E° reduksi paling positif). Di anode, yang menang adalah zat yang **paling mudah dioksidasi**. Dari perbandingan itu lahir aturan praktis berikut.

ATURAN · REAKSI DI KATODE DAN ANODE

Elektrode	Jenis ion atau elektrode	Leburan	Larutan (ada air)
Katode (reduksi)	Kation logam aktif: golongan IA, IIA, Al^{3+}, Mn^{2+}	logamnya terbentuk: $Na^+ + e^- \longrightarrow Na$	**air** yang direduksi: $2\,H_2O + 2\,e^- \longrightarrow H_2 + 2\,OH^-$
	Ion H^+ dari asam	–	$2\,H^+ + 2\,e^- \longrightarrow H_2$
	Kation logam lain: Cu^{2+}, Ag^+, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Sn^{2+}, Fe^{2+}	logamnya terbentuk	logamnya **mengendap**: $Cu^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Cu$
Anode (oksidasi)	**Anode aktif** (Cu, Ag, Ni, Zn, Fe, ...)	anodenya sendiri yang larut: $Cu \longrightarrow Cu^{2+} + 2\,e^-$	
	Anode inert (C, Pt, Au) + ion halida Cl^-, Br^-, I^-	$2\,Cl^- \longrightarrow Cl_2 + 2\,e^-$	$2\,Cl^- \longrightarrow Cl_2 + 2\,e^-$ (bila larutannya pekat)
	Anode inert + ion OH^- (larutan basa)	–	$4\,OH^- \longrightarrow O_2 + 2\,H_2O + 4\,e^-$
	Anode inert + ion sisa asam oksi (SO_4^{2-}, NO_3^-, PO_4^{3-}) atau F^-	–	**air** yang dioksidasi: $2\,H_2O \longrightarrow O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^-$

Elektrode **inert** (karbon/grafit, platina, emas) hanya menjadi tempat reaksi dan tidak ikut bereaksi. **Anode aktif** (logam selain itu) ikut teroksidasi dan larut.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Pada larutan NaCl, logam natrium **tidak pernah** terbentuk. Air jauh lebih mudah direduksi daripada $\mathrm{Na^+}$ (E° $\mathrm{Na^+/Na}$ = –2,71 V). Seandainya pun ada natrium yang terbentuk, ia akan langsung bereaksi hebat dengan air. Hal yang sama berlaku untuk $\mathrm{K^+}$, $\mathrm{Mg^{2+}}$, dan $\mathrm{Al^{3+}}$: mereka hanya bisa diperoleh dari leburan.

Contoh terpenting adalah **air garam pekat** (brine). Di katode, air direduksi menjadi $\mathrm{H_2}$ dan ion $\mathrm{OH^-}$. Di anode, $\mathrm{Cl^-}$ dioksidasi menjadi $\mathrm{Cl_2}$. Ion $\mathrm{Na^+}$ tidak berubah dan berpasangan dengan $\mathrm{OH^-}$ menjadi natrium hidroksida (soda api):

$$\mathrm{2\,NaCl\,(aq) + 2\,H_2O\,(l) \longrightarrow 2\,NaOH\,(aq) + H_2\,(g) + C}$$

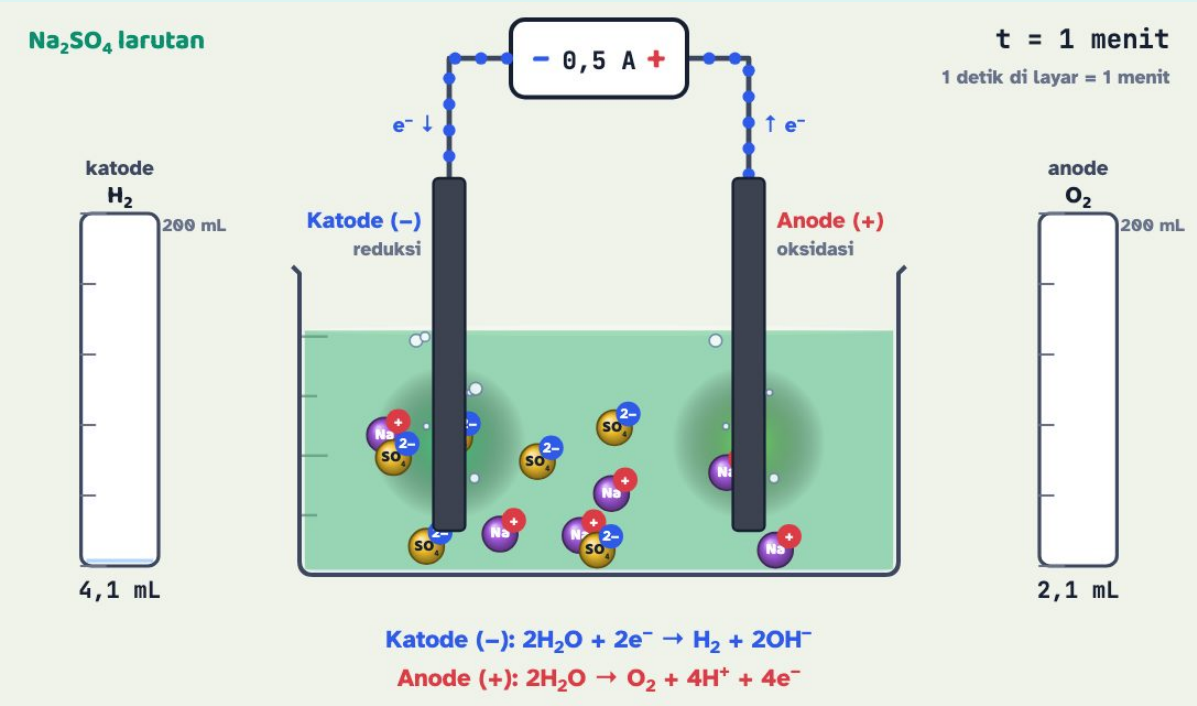
Tiga produk berharga sekaligus dari garam dan air! Jika larutannya **encer**, ion $\mathrm{Cl^-}$ terlalu sedikit sehingga di anode terbentuk terutama $\mathrm{O_2}$ (dengan sedikit $\mathrm{Cl_2}$). Berikut ringkasan elektrolisis yang paling sering muncul di soal:

Elektrolit (elektrode)	Katode (–)	Anode (+)	Perubahan larutan
NaCl leburan (C)	Na	$\mathrm{Cl_2}$	garam terurai
NaCl larutan pekat (C)	$\mathrm{H_2}$	$\mathrm{Cl_2}$	menjadi NaOH (basa)
NaCl larutan encer (C)	$\mathrm{H_2}$	$\mathrm{O_2}$ (sedikit $\mathrm{Cl_2}$)	air berkurang
$\mathrm{Na_2SO_4}$ atau $\mathrm{H_2SO_4}$ encer (C)	$\mathrm{H_2}$	$\mathrm{O_2}$	hanya air yang terurai, $\mathrm{H_2 : O_2 = 2 : 1}$
$\mathrm{CuSO_4}$ larutan (C)	Cu mengendap	$\mathrm{O_2}$	biru memudar, menjadi asam ($\mathrm{H_2SO_4}$)
$\mathrm{CuSO_4}$ larutan (Cu)	Cu mengendap	anode Cu larut	biru tetap, tembaga "pindah" dari anode ke katode
KI larutan (C)	$\mathrm{H_2}$	$\mathrm{I_2}$ (cokelat)	sekitar katode menjadi basa
$\mathrm{AgNO_3}$ larutan (C)	Ag mengendap	$\mathrm{O_2}$	menjadi asam ($\mathrm{HNO_3}$)

LAB MINI

Elektrolisis Virtual: pilih larutan, nyalakan arus

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-31



Waktu	Arus terbaca	Muatan	Katode (−)	Anode (+)
1 menit	0,5 A	36 C	gas H_2	gas O_2

Hasil
4,1 mL H_2 · 2,1 mL O_2 (perbandingan 2 : 1)

Larutan
hanya air yang terurai: katode basa, anode asam

Pilih elektrolit, tekan ▶ Jalankan, lalu amati gelembung, endapan, dan warna di sekitar setiap elektrode (1 detik di layar = 1 menit). Tambahkan indikator fenolftalein atau indikator universal: sisi mana yang menjadi basa, sisi mana yang menjadi asam? Bandingkan volume gas di kedua tabung ukur untuk Na_2SO_4. Coba juga "air murni": mengapa hampir tidak terjadi apa-apa? Lalu bandingkan $CuSO_4$ dengan elektrode karbon dan dengan elektrode tembaga: mengapa warna birunya berbeda nasib?

CONTOH

Meramalkan produk elektrolisis larutan KI

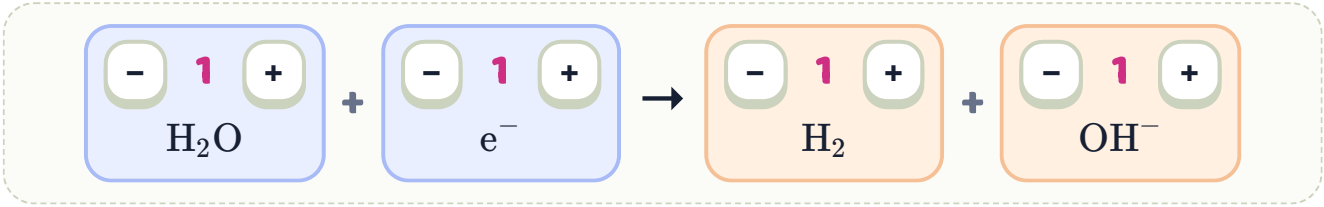
Larutan kalium iodida, KI, dielektrolisis dengan elektrode karbon. Beberapa tetes fenolftalein ditambahkan. Ramalkan produk di setiap elektrode dan perubahan warna yang teramati.

1. Ion yang ada: $\mathrm{K^+}$, $\mathrm{I^-}$, dan molekul air. Elektrodenya inert.
2. Katode: $\mathrm{K^+}$ adalah kation logam golongan IA, jadi **air** yang direduksi: $\mathrm{2\,H_2O + 2\,e^- \longrightarrow H_2 + 2\,OH^-}$. Ada gelembung $\mathrm{H_2}$, dan ion $\mathrm{OH^-}$ membuat fenolftalein merah muda.
3. Anode: $\mathrm{I^-}$ adalah ion halida, jadi $\mathrm{2\,I^- \longrightarrow I_2 + 2\,e^-}$. Iodin membuat larutan di sekitar anode cokelat kekuningan.

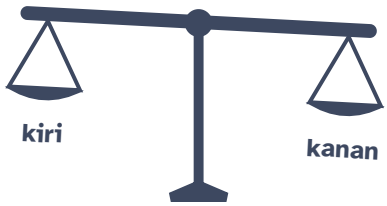
Katode: gas $\mathrm{H_2}$ + warna merah muda; anode: $\mathrm{I_2}$ dengan warna cokelat. Reaksi total: $\mathrm{2\,KI + 2\,H_2O \longrightarrow 2\,KOH + H_2 + I_2}$.

PENYETARA REAKSI

Setarakan setengah reaksi elektrolisis



Unsur	Kiri	Kanan	
H	2 ○○	3 ○○○	✗
O	1 ●	1 ●	✓
muatan	-1	-1	✓



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 9 null

Perhatikan baris **muatan**: elektron $\mathrm{e^-}$ bermuatan –1, jadi jumlah muatan kiri harus sama dengan kanan. Persamaan pertama dan kedua adalah reduksi dan oksidasi air. Persamaan keenam dan ketujuh adalah setengah reaksi di sel Hall–Héroult (subbab 31.4), dan yang terakhir adalah reaksi totalnya.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TEGANGAN MINIMUM DAN OVERPOTENSIAL

Elektrolisis adalah sel volta yang dipaksa berjalan mundur. Untuk air: $E^\circ_{sel} = E^\circ_{katode} - E^\circ_{anode} = 0 - 1{,}23 = -1{,}23$ V, sehingga $\Delta G^\circ = -nFE^\circ = -(4)(96.485)(-1{,}23) = +475$ kJ per 2 mol H_2O. Reaksi tak spontan ini butuh **minimal 1,23 V**. Kenyataannya dibutuhkan ±1,8–2 V, karena hambatan larutan dan **overpotensial**: "biaya tambahan" agar reaksi di permukaan elektrode berjalan cukup cepat.

Overpotensial menjelaskan teka-teki air garam. Secara E°, air (+1,23 V) seharusnya lebih mudah dioksidasi daripada Cl^- (+1,36 V). Akan tetapi, pembentukan O_2 punya overpotensial besar, sedangkan Cl_2 kecil. Ditambah konsentrasi Cl^- yang tinggi (persamaan Nernst, Bab 30), Cl_2 yang menang pada larutan pekat. Pada larutan encer, O_2 kembali unggul. Demikian pula, logam seng bisa diendapkan dari larutan $ZnSO_4$ walaupun E° Zn^{2+}/Zn (−0,76 V) lebih negatif daripada air, karena overpotensial H_2 pada permukaan seng sangat besar.

31.3 Hukum Faraday: menghitung elektron dengan amperemeter

Setiap ion Ag^+ butuh satu elektron untuk menjadi atom perak. Setiap Cu^{2+} butuh dua, dan setiap Al^{3+} butuh tiga. Jadi kalau kita bisa **menghitung elektron** yang mengalir, kita tahu berapa banyak logam yang terbentuk. Untungnya, elektron bisa "dihitung" dengan alat ukur listrik biasa.

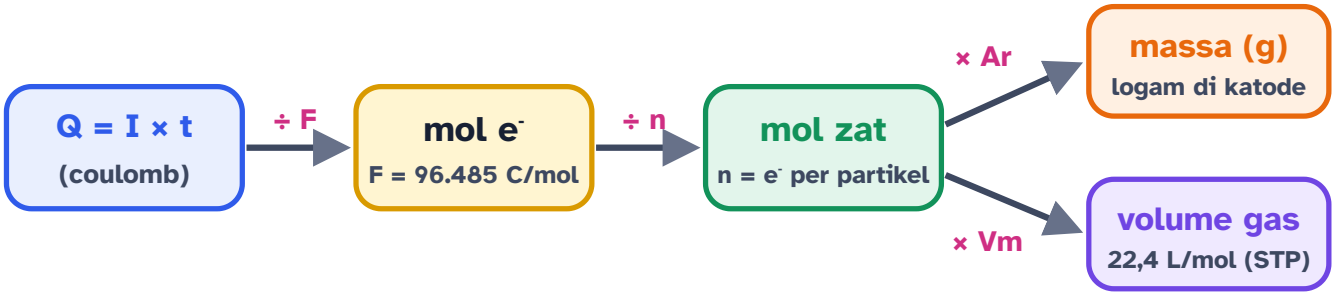
Kuat arus I (ampere) adalah banyaknya muatan yang lewat setiap detik. Muatan total yang mengalir selama t detik adalah $Q = I \times t$ (coulomb). Satu mol elektron membawa muatan $6{,}022 \times 10^{23} \times 1{,}602 \times 10^{-19}$ C $= 96.485$ C. Besaran ini disebut **tetapan Faraday**, F. Di banyak buku sekolah dibulatkan menjadi 96.500 C/mol.

HUKUM FARADAY

Hukum I: massa zat yang dihasilkan di elektrode sebanding dengan muatan listrik yang dialirkan.

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I\,t}{F} = e \cdot \frac{I\,t}{F} \qquad e = \frac{A_r}{n}\ (\text{massa ekivalen})$$

dengan n = banyaknya elektron per ion (muatan ion). **Hukum II:** bila beberapa sel dirangkai seri, muatan yang lewat sama, sehingga massa zat yang dihasilkan sebanding dengan massa ekivalennya: $\frac{m_1}{e_1} = \frac{m_2}{e_2}$.



Jembatan Faraday: semua soal elektrolisis melewati stasiun pusat yang sama, yaitu **mol elektron**. Untuk gas, n adalah elektron per molekul gas: H_2 dan Cl_2 butuh 2, O_2 butuh 4.

RUMUS HIDUP

Hukum Faraday: massa endapan

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I\,t}{F}$$

Massa logam yang menempel sama dengan mol elektron (arus kali waktu dibagi 96.485) dibagi elektron per ion, lalu dikali massa satu mol logam.

- A_r Ar logam `g/mol`
- n Elektron per ion
- I Kuat arus `A`
- t Waktu `s`
- m Massa endapan `g`

MASSA ENDAPAN

0,635

g

tembaga dari larutan $CuSO_4$

Muatan **1.930** C = **0,02** mol elektron → **0,01** mol logam → **0,635** g logam di katode.

Satuan Nusantara: ≈ 1,3 × sebutir kacang tanah (±) · ≈ 13% dari satu sendok teh gula pasir (±) · ≈ 4% dari satu sendok makan air

Cek satuan: (g/mol) × (A · s) ÷ (C/mol) = (g/mol) × mol = g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-FARADAY-MASSA-ENDAPAN

TRIK KAK TIRTA

Jangan menghafal rumus panjang. Ingat tiga langkah: **(1)** hitung mol elektron $= It/F$; **(2)** lihat setengah reaksinya untuk tahu berapa elektron per partikel; **(3)** ubah mol zat menjadi gram atau liter. Waktu selalu dalam **detik**: 1 menit = 60 s, 1 jam = 3.600 s. Angka 965 sering muncul di soal karena $965 \times 100 = 96.500$.

CONTOH

Muatan dan mol elektron

Arus 2,00 A dialirkan selama 16 menit 5 detik. Berapa muatan yang mengalir dan berapa mol elektronnya? (F = 96.500 C/mol)

1. Ubah waktu ke detik: $16 \times 60 + 5 = 965$ s.
2. Muatan: $Q = I\,t = 2{,}00 \times 965 = 1.930$ C.
3. Mol elektron: $1.930 / 96.500 = 0{,}0200$ mol.

$Q = 1.930$ **C, setara dengan 0,0200 mol elektron ($1{,}2 \times 10^{22}$ elektron).**

KERJAKAN BERSAMA

Menyepuh sendok dengan perak

Sebuah sendok disepuh perak dari larutan yang mengandung ion $\mathrm{Ag^+}$, dengan arus 0,500 A selama 30,0 menit. Berapa gram perak yang menempel? (Ar Ag = 108; F = 96.500 C/mol)

1. $Q = 0{,}500 \times (30{,}0 \times 60) = 900$ C.
2. Mol elektron $= 900 / 96.500 = 9{,}33 \times 10^{-3}$ mol.
3. Setengah reaksi $\mathrm{Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag}$: 1 elektron untuk 1 atom, jadi mol Ag $= 9{,}33 \times 10^{-3}$ mol.
4. Massa $= 9{,}33 \times 10^{-3} \times 108 = 1{,}01$ g.

Sekitar 1,01 g perak. Bila luas sendok ±40 cm², tebal lapisannya ±2,4 µm (massa jenis perak 10,5 g/cm³), kira-kira sepertiga puluh tebal rambut.

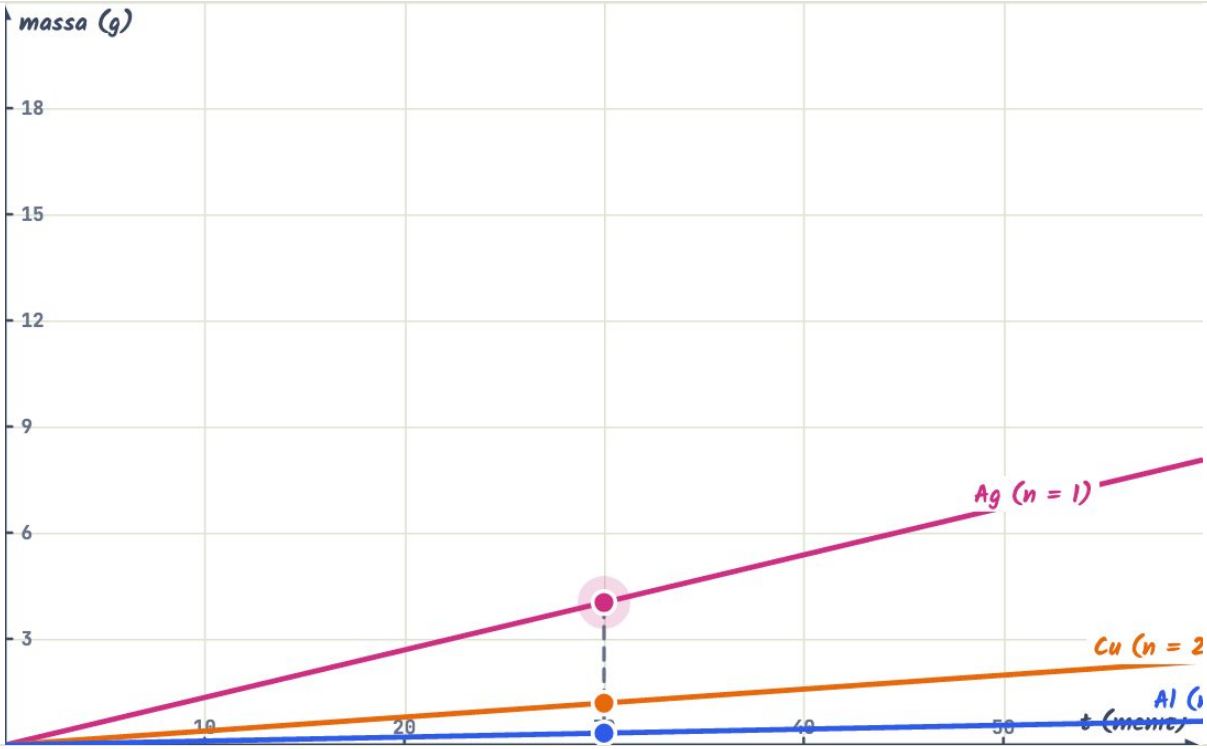
GRAFIK HIDUP

Massa endapan naik lurus terhadap waktu

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-31

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I\,t}{F}$$

$I = 2$ A, $t = 30$ menit : $m_{\mathrm{Ag}} = 4{,}03$ g, $m_{\mathrm{Cu}} = 1{,}18$ g, $m_{\mathrm{Al}} = 0{,}3$



muatan Q	mol elektron	Ag : Cu : Al (massa)
3.600 C	0,0373 mol	108 : 31,75 : 9

Seret titik magenta. Semua garis lurus melewati (0, 0): massa sebanding dengan waktu (Hukum Faraday I). Untuk muatan yang sama, perbandingan massanya selalu 108 : 31,75 : 9, yaitu perbandingan massa ekivalen A_r/n (Hukum Faraday II). Gandakan arusnya: apa yang terjadi pada kemiringan garis?

RUMUS HIDUP

Volume gas hasil elektrolisis

$$V = \frac{I\,t}{z\,F} \times V_m$$

Hitung mol elektron, bagi dengan banyaknya elektron untuk membentuk satu molekul gas, lalu kalikan dengan volume satu mol gas.

- I Kuat arus A
- t Waktu s
- z Elektron per molekul gas
- V_m Volume molar L/mol
- V Volume gas L

VOLUME GAS

0,224

L

gas H_2 (katode) atau Cl_2 (anode)

0,02 mol elektron menghasilkan **0,01** mol gas = **224,035** mL.

Satuan Nusantara: ≈ 90% dari segelas air · ≈ 15% dari botol air mineral besar · ≈ 45 × satu sendok teh

Cek satuan: (A · s) ÷ (C/mol) × (L/mol) = mol × L/mol = L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-FARADAY-VOLUME-GAS

COBA SENDIRI

Tiga sel dirangkai seri

Tiga sel dirangkai seri dan dialiri arus yang sama: sel A berisi $\mathrm{AgNO_3}$, sel B berisi $\mathrm{CuSO_4}$, dan sel C berisi $\mathrm{H_2SO_4}$ encer, semuanya dengan elektrode karbon. Setelah beberapa saat, katode sel A bertambah 1,08 g. Hitung massa tembaga di sel B dan volume gas di setiap elektrode sel C pada STP. (Ar Ag = 108, Cu = 63,5)

1. Mol Ag $= 1{,}08/108 = 0{,}0100$ mol. Karena $\mathrm{Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag}$, mol elektron $= 0{,}0100$ mol. Rangkaian seri: semua sel dilewati 0,0100 mol elektron.
2. Sel B: $\mathrm{Cu^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Cu}$, mol Cu $= 0{,}0100/2 = 0{,}00500$ mol, massa $= 0{,}00500 \times 63{,}5 = 0{,}318$ g.
3. Sel C, katode: $\mathrm{2\,H^+ + 2\,e^- \longrightarrow H_2}$, mol $\mathrm{H_2} = 0{,}00500$ mol → $0{,}00500 \times 22{,}4 = 0{,}112$ L.
4. Sel C, anode: $\mathrm{2\,H_2O \longrightarrow O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^-}$, mol $\mathrm{O_2} = 0{,}0100/4 = 0{,}00250$ mol → 0,0560 L.

Cu = 0,318 g; $\mathrm{H_2}$ = 112 mL; $\mathrm{O_2}$ = 56 mL. Perhatikan perbandingan $\mathrm{H_2 : O_2} = 2 : 1$, persis seperti tebakanmu di awal bab!

ADU CEPAT

Adu Cepat Faraday: berapa gram logamnya?

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-31

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

mol e^- = I·t/96.500; mol logam = mol e^- ÷ n; massa = mol × Ar.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENIMBANG ELEKTRON DAN EFISIENSI ARUS

Hukum Faraday menghubungkan dua bilangan raksasa: $F = N_A \times e$. Bila kamu mengukur F lewat percobaan elektrolisis tembaga (menimbang katode sebelum dan sesudahnya) dan mengetahui muatan satu elektron $e = 1{,}602 \times 10^{-19}$ C, kamu bisa menghitung bilangan Avogadro dari meja laboratorium sekolah!

Di industri, tidak semua elektron dipakai untuk reaksi yang diinginkan. Sebagian "bocor" ke reaksi samping (misalnya pembentukan H_2 saat menyepuh). Perbandingan massa nyata terhadap massa teoretis Faraday disebut **efisiensi arus**; sel aluminium modern mencapai ±95%. Energi listrik per kilogram logam juga bisa dihitung: $W = Q \times V$ dengan V tegangan sel.

RUMUS HIDUP

Energi listrik untuk 1 kg aluminium

$$W = \frac{3\,F\,V}{A_r \times \eta}$$

Setiap mol Al butuh 3 mol elektron yang didorong dengan tegangan V; bagi dengan efisiensi arus karena sebagian elektron terbuang.

V Tegangan sel `V` | η Efisiensi arus | W Energi per kg Al `kWh/kg`

ENERGI PER KG AL

13,2

kWh/kg

⚡ **setara sel smelter modern (±13–15 kWh/kg)**

Satu kilogram aluminium menelan **13,2** kWh, cukup untuk menyalakan lampu LED 10 W selama **1.317,535** jam.

Cek satuan: (C/mol × V) ÷ (kg/mol) = J/kg; ÷ 3,6 × 10^6 = kWh/kg ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENERGI-SMELTER-AL

31.4 Elektrolisis bekerja: sepuh, tembaga murni, aluminium, dan klorin

Penyepuhan (elektroplating)

Penyepuhan adalah pelapisan benda dengan logam lain secara elektrolisis, supaya lebih indah atau lebih tahan karat. Resepnya selalu sama: **benda yang disepuh dipasang sebagai katode**, **logam penyepuh sebagai anode**, dan elektrolitnya mengandung **ion logam penyepuh**. Anode larut menambah ion, katode menerima lapisan, sehingga kadar ion dalam larutan relatif tetap.

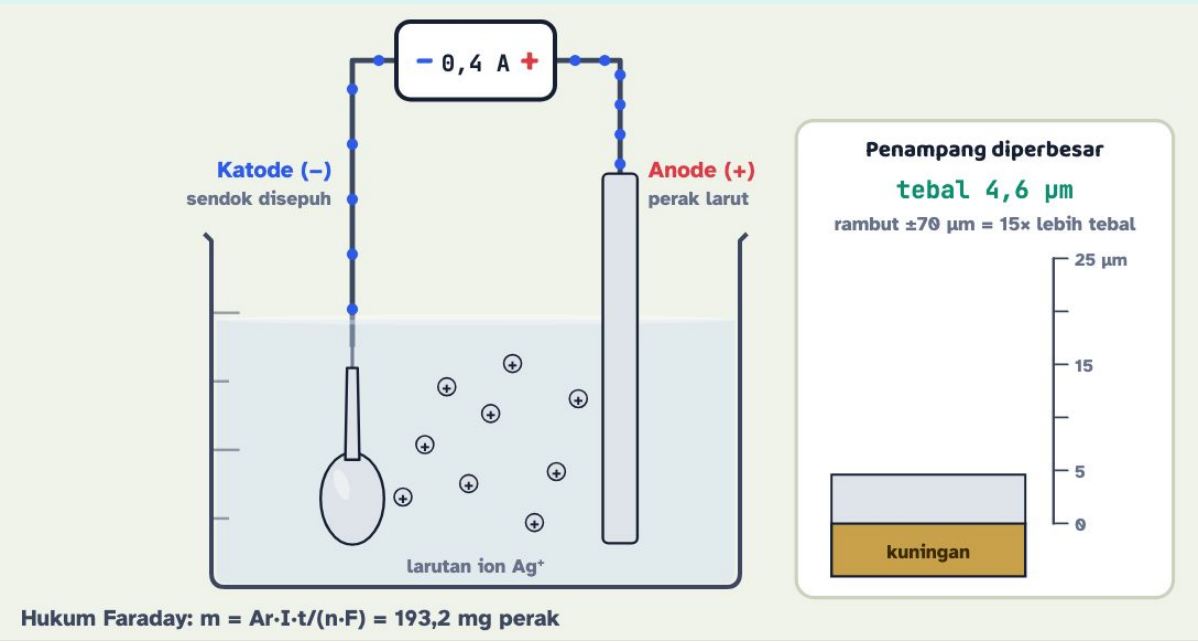
$$\text{anode (perak): } \mathrm{Ag} \longrightarrow \mathrm{Ag^+} + \mathrm{e^-} \qquad \text{katode (cincin):}$$

KIMIA NUSANTARA · PERAK KOTAGEDE

Di Kotagede, Yogyakarta, perajin perak sudah bekerja sejak zaman Kerajaan Mataram. Selain perhiasan perak murni yang diukir dengan tangan, ada kerajinan tembaga atau kuningan yang **disepuh perak**, dan perhiasan perak yang **disepuh emas** tipis supaya tampak keemasan. Lapisan sepuh emas pada perhiasan sering hanya setebal 0,5–2 mikrometer, puluhan kali lebih tipis daripada rambut. Hukum Faraday membantu perajin mengatur arus dan waktu supaya lapisannya cukup tebal tanpa memboroskan logam mulia.

LAB MINI Bengkel Sepuh: atur arus dan waktu

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-31



Waktu berjalan	Muatan	Massa lapisan	Tebal lapisan	Rapat arus
7,2 menit	173 C	193,2 mg	4,6 µm	1 A/dm²

Mutu lapisan
halus dan mengkilap · tipis

Pilih logam penyepuh dan bendanya, atur arus dan waktu, lalu tekan ▶ Jalankan. Perhatikan tebal lapisan di "penampang diperbesar". Coba buat sendok berlapis perak setebal ±20 µm. Lalu naikkan arus tinggi-tinggi pada cincin kecil: apa yang terjadi pada mutu lapisan bila **rapat arus** (arus per luas) terlalu besar? (Anggap semua elektron dipakai untuk menyepuh.)

⚠ KESELAMATAN

Penyepuhan sungguhan memakai larutan yang berbahaya: sepuh emas dan perak industri sering memakai senyawa sianida yang sangat beracun, dan pelapisan krom memakai senyawa krom(VI) penyebab kanker. Karena itu, penyepuhan hanya dikerjakan di bengkel berizin dengan pengolahan limbah. Di rumah, cukup amati penyepuhan lewat Lab Mini di atas.



Toksik akut (sianida)



Bahaya kesehatan (krom(VI))



Bahaya lingkungan

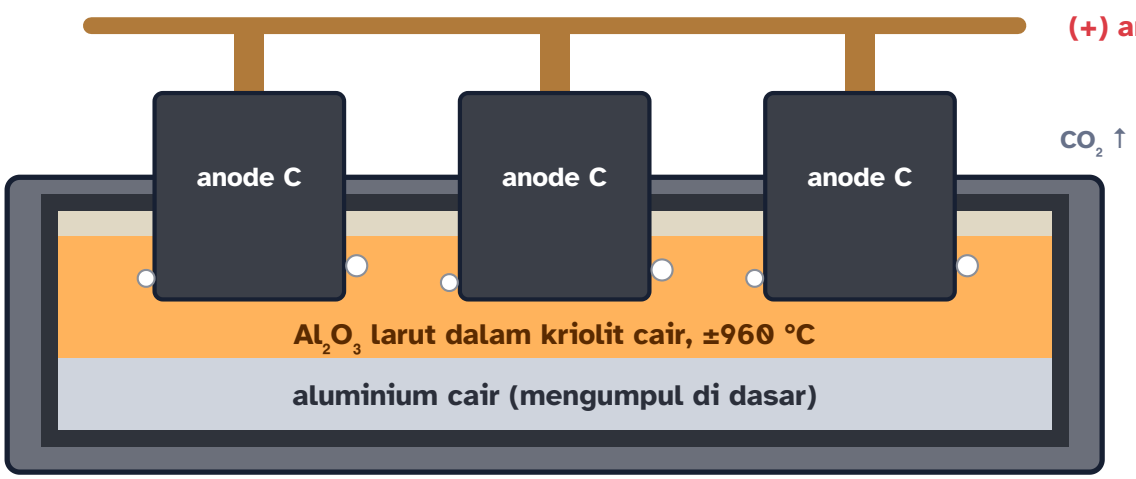
Pemurnian tembaga

Kabel listrik butuh tembaga dengan kemurnian 99,99%, karena sedikit pengotor saja sudah menaikkan hambatan listrik. Tembaga hasil peleburan bijih (±99%) dijadikan **anode**, lempeng tipis tembaga murni menjadi **katode**, dan elektrolitnya larutan $\mathrm{CuSO_4}$ yang diasamkan. Tembaga dari anode larut lalu menempel di katode.

Ke mana pengotornya? Logam yang lebih reaktif daripada tembaga (Fe, Zn, Ni) ikut larut tetapi tetap tinggal di larutan, karena lebih sulit direduksi. Logam yang kurang reaktif (Ag, Au, Pt) tidak larut dan jatuh ke dasar sebagai **lumpur anode**, yang ternyata harta karun! Konsentrat tembaga dari tambang Grasberg di Papua dimurnikan di smelter Gresik, Jawa Timur, dan lumpur anodenya diolah menjadi emas dan perak.

Aluminium: proses Hall–Héroult

Al adalah logam paling melimpah di kerak Bumi, tetapi sangat reaktif sehingga tidak bisa direduksi dengan karbon seperti besi. Bahan bakunya adalah alumina ($\mathrm{Al_2O_3}$) dari bijih bauksit, yang banyak ditambang di Kalimantan Barat dan Kepulauan Riau. Masalahnya, $\mathrm{Al_2O_3}$ baru meleleh pada ±2.070 °C. Kuncinya: alumina dilarutkan dalam lelehan **kriolit** ($\mathrm{Na_3AlF_6}$), sehingga campuran bisa dielektrolisis pada ±960 °C saja.



lapisan karbon di dasar sel tersambung ke kutub (–): katode

Gelembung di sekitar anode adalah $\mathrm{CO_2}$: oksigen yang dilepas di anode langsung membakar karbonnya, sehingga anode karbon harus diganti secara berkala.

$$\text{katode: } \mathrm{Al^{3+} + 3\,e^- \longrightarrow Al\,(l)} \qquad \text{anode: } \mathrm{2\,O^{2-} \longrightarrow O}$$

$$\text{total: } \mathrm{2\,Al_2O_3 + 3\,C \longrightarrow 4\,Al + 3\,CO_2}$$

TAMU DARI MASA LALU

Sebelum 1886, aluminium lebih mahal daripada perak. Konon Kaisar Napoleon III menjamu tamu paling terhormat dengan sendok-garpu aluminium, sementara tamu biasa cukup memakai emas! Pada 1886, dua pemuda yang tidak saling kenal, **Charles Martin Hall** di Amerika Serikat dan **Paul Héroult** di Prancis, menemukan cara yang sama: melarutkan alumina dalam kriolit cair lalu mengelektrolisisnya. Kebetulannya lengkap: keduanya lahir pada 1863 dan wafat pada 1914. Dalam beberapa puluh tahun, aluminium berubah dari logam mewah menjadi bahan panci dan kaleng minuman.

KIMIA NUSANTARA · SMELTER KUALA TANJUNG

Di Kuala Tanjung, Kabupaten Batu Bara, Sumatera Utara, berdiri smelter aluminium yang beroperasi sejak 1982 dengan kapasitas sekitar 250 ribu ton per tahun. Listriknya berasal dari PLTA di Sungai Asahan, yang airnya mengalir dari Danau Toba. Lokasinya bukan kebetulan: setiap kilogram aluminium butuh ±13–15 kWh listrik, jadi smelter selalu dibangun dekat sumber listrik murah dan besar. Mendaur ulang kaleng aluminium hanya butuh ±5% energi itu, karena tidak perlu elektrolisis lagi.

COBA SENDIRI **Sehari di sel smelter**

Satu sel Hall–Héroult bekerja dengan arus 200 kA selama 24 jam. Hitung massa aluminium yang dihasilkan jika efisiensi arusnya 95%. (Ar Al = 27; F = 96.500 C/mol)

1. $Q = 2{,}00 \times 10^5 \times 86.400 = 1{,}728 \times 10^{10}$ C.
2. Mol elektron $= 1{,}728 \times 10^{10} / 96.500 = 1{,}791 \times 10^5$ mol.
3. $\mathrm{Al^{3+}} + 3\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{Al}$: mol Al (teoretis) $= 1{,}791 \times 10^5 / 3 = 5{,}969 \times 10^4$ mol → $\times 27 = 1{,}61 \times 10^6$ g = 1,61 ton.
4. Dengan efisiensi 95%: $0{,}95 \times 1{,}61 = 1{,}53$ ton.

±1,53 ton aluminium per hari dari satu sel. Sebuah smelter berisi ratusan sel seperti ini yang berjajar dalam gedung sepanjang ratusan meter.

Industri klor-alkali

Ingat elektrolisis air garam pekat? Di industri **klor-alkali**, reaksi itu dijalankan dalam skala raksasa. Anode dan katode dipisahkan oleh **membran penukar kation** yang hanya bisa dilewati ion $\mathrm{Na^+}$. Klorin terbentuk di ruang anode, sedangkan $\mathrm{H_2}$ dan NaOH di ruang katode. Membran mencegah $\mathrm{Cl_2}$ bertemu NaOH (keduanya akan bereaksi membentuk natrium hipoklorit, bahan pemutih pakaian). Sel raksa yang dulu dipakai kini ditinggalkan karena mencemari lingkungan, sejalan dengan Konvensi Minamata yang juga diratifikasi Indonesia.

Produk	Terbentuk di	Kegunaan
Klorin, $\mathrm{Cl_2}$	anode	bahan pipa PVC, disinfeksi air PDAM dan kolam renang, HCl, pemutih
Natrium hidroksida (soda api), NaOH	katode	sabun dan deterjen, kertas, tekstil, pengolahan bauksit menjadi alumina
Hidrogen, $\mathrm{H_2}$	katode	bahan bakar, pembuatan HCl, hidrogenasi minyak nabati menjadi margarin

Pabrik klor-alkali beroperasi di kawasan industri seperti Cilegon, Banten. Dari garam (sebagian dari tambak garam Madura dan NTT) lahir pipa PVC di rumahmu dan air bersih yang mengalir dari keran PDAM.

31.5 Korosi besi: sel volta mini yang tidak diundang

Tebak Dulu!

Empat paku baru disimpan selama seminggu: (1) di udara kering bersama silika gel, (2) di air yang sudah dididihkan lalu ditutup minyak, (3) di air keran, (4) di air garam. Paku mana yang paling banyak berkarat?

- Paku (1), karena paling banyak terkena oksigen udara.
- Paku (2), karena air yang pernah dipanaskan mempercepat karat.
- Paku (4), di air garam.
- Semuanya sama, karena semuanya besi yang sama.

Jawabannya: paku di air garam. Karat butuh **air dan oksigen sekaligus**. Paku (1) punya oksigen tetapi tidak ada air; paku (2) punya air tetapi oksigennya sudah diusir oleh pendidihan dan dihalangi minyak. Paku (3) dan (4) punya keduanya, tetapi garam membuat air menjadi penghantar yang baik bagi "sel volta mini" di permukaan besi, sehingga karatnya jauh lebih cepat.

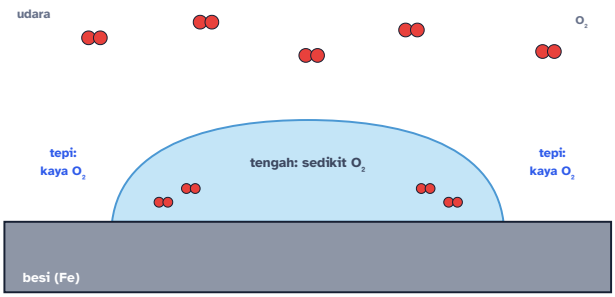
Korosi adalah kerusakan logam karena bereaksi dengan lingkungannya, biasanya lewat oksidasi. Korosi besi disebut **perkaratan**, dan hasilnya, karat, adalah besi(III) oksida terhidrasi, $\mathrm{Fe_2O_3 \cdot \mathit{x}\, H_2O}$. Korosi bukan masalah kecil: sebuah studi internasional tahun 2016 memperkirakan kerugian akibat korosi di seluruh dunia sekitar 3% PDB dunia setiap tahun.

Bahasa sederhana · Karat muncul bila besi bertemu **air** dan **udara** sekaligus. Di tepi pantai, angin membawa butiran air laut yang asin, sehingga pagar, tiang, dan kapal berkarat jauh lebih cepat daripada di pegunungan yang sejuk dan kering. Karat berwarna cokelat kemerahan, rapuh, dan mudah mengelupas.

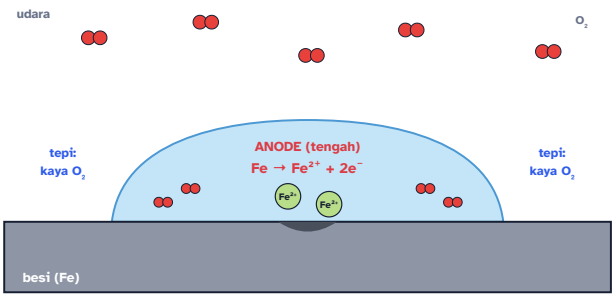
DEFINISI · KOROSI SEBAGAI SEL VOLTA

Korosi besi adalah reaksi redoks **spontan** yang berlangsung seperti sel volta mini. Bagian besi yang menjadi **anode** teroksidasi ($\mathrm{Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2\,e^-}$), elektron mengalir di dalam besi, dan di bagian **katode** oksigen direduksi ($\mathrm{O_2 + 2\,H_2O + 4\,e^- \longrightarrow 4\,OH^-}$). Air yang menempel berperan sebagai elektrolit. Reaksi totalnya:

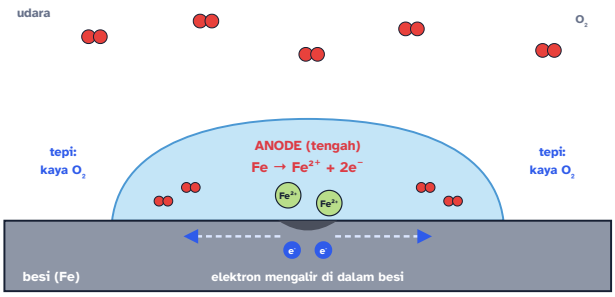
$$\mathrm{4\,Fe + 3\,O_2 + 2x\,H_2O \longrightarrow 2\,Fe_2O_3 \cdot x\,H_2O}$$



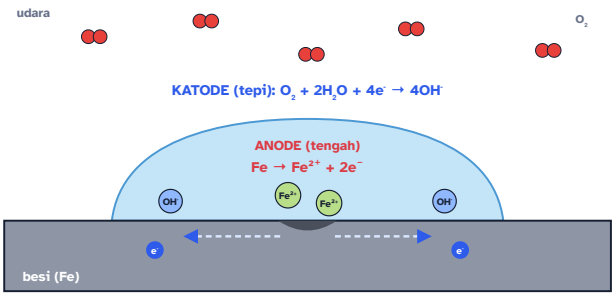
Langkah 1. Setetes air (embun, hujan, atau cipratan ombak) menempel di besi. Oksigen dari udara lebih mudah masuk ke **tepi** tetesan yang tipis daripada ke **tengah**nya.



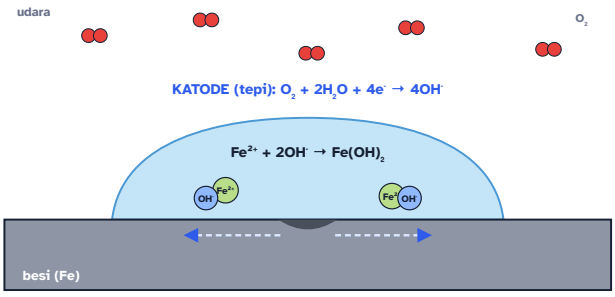
Langkah 2. Di tengah tetesan yang miskin O_2, besi menjadi **anode** dan teroksidasi: $\mathrm{Fe} \longrightarrow \mathrm{Fe}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^-$. Di sinilah besi terkikis dan membentuk lubang kecil.



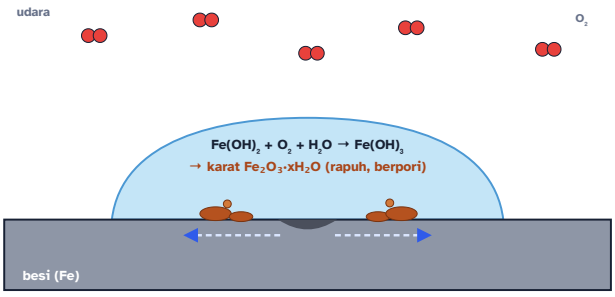
Langkah 3. Elektron tidak bisa berjalan di air, tetapi dengan mudah mengalir **di dalam besi** menuju tepi tetesan. Besi sekaligus berperan sebagai kawat penghubung sel volta mini.



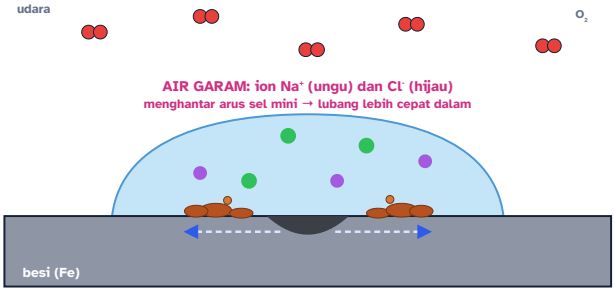
Langkah 4. Di tepi tetesan yang kaya O_2 terjadi **reduksi**: $\mathrm{O_2} + 2\,\mathrm{H_2O} + 4\,\mathrm{e}^- \longrightarrow 4\,\mathrm{OH}^-$. Bagian ini menjadi **katode**.



Langkah 5. Ion Fe^{2+} dan OH^- bergerak di dalam air lalu bertemu: $\mathrm{Fe}^{2+} + 2\,\mathrm{OH}^- \longrightarrow \mathrm{Fe(OH)_2}$.



Langkah 6. Oksigen mengoksidasi lebih lanjut: $4\,\mathrm{Fe(OH)_2} + \mathrm{O_2} + 2\,\mathrm{H_2O} \longrightarrow 4\,\mathrm{Fe(OH)_3}$, yang kemudian kehilangan sebagian air menjadi **karat** cokelat $\mathrm{Fe_2O_3 \cdot \mathit{x}\,H_2O}$. Karat menumpuk seperti cincin di antara anode dan katode, bukan di dalam lubangnya!



Langkah 7. Di air laut, ion Na^+ dan Cl^- membuat air jauh lebih mudah menghantar arus sel mini, sehingga lubang di anode makin cepat dalam. Ion Cl^- juga merusak lapisan oksida tipis di permukaan besi. Itulah sebabnya pagar di tepi pantai cepat keropos.

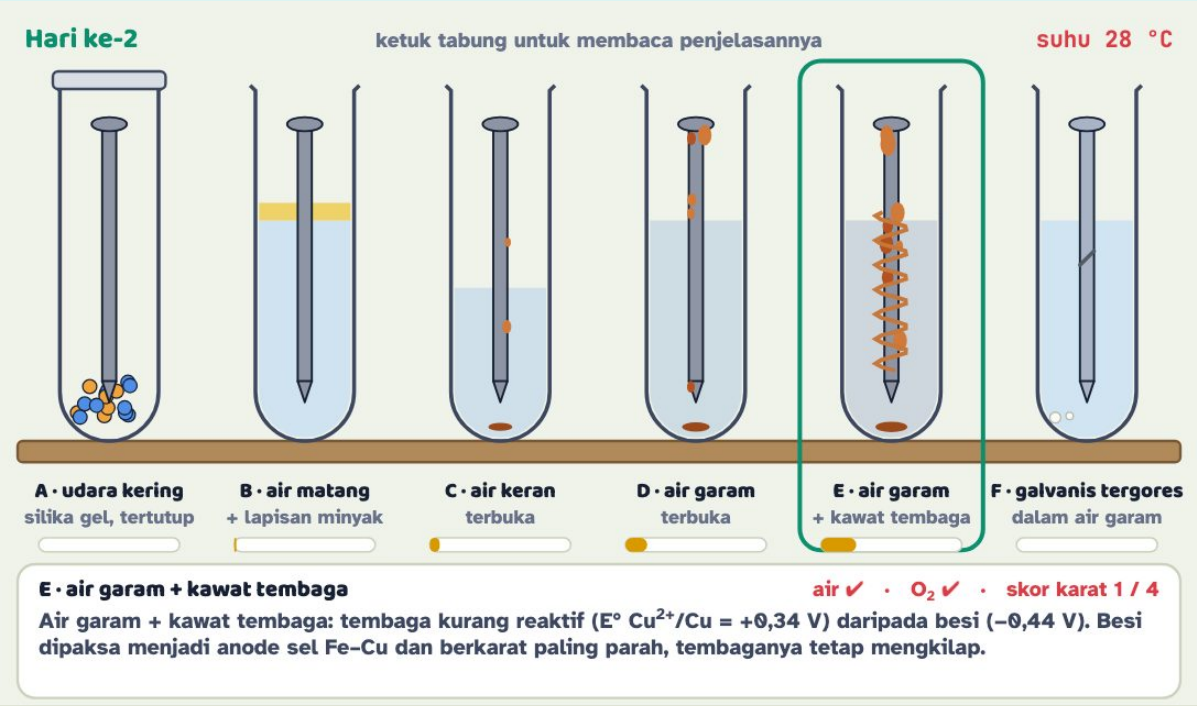
Apa saja yang mempercepat karat?

- **Air dan oksigen**: keduanya wajib ada. Tanpa salah satunya, korosi hampir berhenti.
- **Garam** (udara laut, garam jalan): ion-ionnya membuat air menjadi elektrolit yang baik.
- **Asam** (hujan asam, asap pabrik): ion $\mathrm{H^+}$ menambah reaksi katode $2\,\mathrm{H^+} + 2\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{H_2}$ dan melarutkan lapisan pelindung.
- **Kontak dengan logam yang kurang reaktif** (Cu, Sn): besi dipaksa menjadi anode, seperti seng di sel Daniell.
- **Suhu tinggi dan lembap**, seperti udara tropis pesisir Indonesia, serta goresan atau bagian yang tertekuk.

LAB MINI

Uji Korosi Paku: minggu demi minggu

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-31



Hari ke-	Minggu ke-	Paling berkarat
2	1	E (air garam + tembaga)

Tabung dipilih
E (air garam + tembaga): skor 1 / 4

Tekan ▶ Jalankan untuk mempercepat waktu, satu detik kira-kira dua hari. Ketuk sebuah tabung untuk membaca penjelasannya. Tabung mana yang punya air **dan** oksigen? Mengapa paku yang dililit kawat tembaga berkarat paling parah, padahal kondisinya sama dengan tabung D? Lalu ganti isi tabung F: bandingkan paku galvanis yang tergores dengan paku berlapis timah yang tergores.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi korosi



$$\mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Fe^{2+}} + \mathrm{e^-}$$

Unsur	Kiri	Kanan	
Fe	1 ●	1 ●	✓
muatan	0	+1	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 8 null

Enam persamaan pertama adalah perjalanan besi menjadi karat, dari anode, katode, sampai karat $\mathrm{Fe_2O_3 \cdot H_2O}$ (di sini $x = 1$). Dua persamaan terakhir adalah "pengorbanan" seng dan magnesium yang melindungi besi (subbab 31.6).

MITOS

"Karat melindungi besi di bawahnya, seperti cat."

FAKTA

Karat besi rapuh, berpori, dan volumenya jauh lebih besar sehingga mengelupas. Air dan oksigen terus masuk, dan besi di bawahnya terus termakan. Yang benar-benar melindungi adalah lapisan oksida rapat, seperti $\mathrm{Al_2O_3}$ pada aluminium.

MITOS

"Elektrolisis air menghasilkan hidrogen dan oksigen sama banyak."

FAKTA

Volumenya 2 : 1. Membentuk satu $\mathrm{O_2}$ butuh 4 elektron, sedangkan satu $\mathrm{H_2}$ cukup 2. Dengan muatan yang sama, hidrogen yang terbentuk dua kali lebih banyak.

MITOS

"Air murni menghantar listrik dengan baik."

FAKTA

Air murni hampir tidak menghantar listrik, karena ionnya sangat sedikit. Yang menghantar adalah ion-ion terlarut. Itulah sebabnya elektrolisis air butuh sedikit elektrolit, misalnya Na_2SO_4 atau H_2SO_4 encer.

31.6 Melawan karat: cat, seng, dan logam yang rela berkorban

Semua cara mencegah korosi memakai salah satu dari tiga strategi: **menghalangi** air dan oksigen, **mengorbankan** logam lain yang lebih reaktif, atau **mengubah** logamnya sendiri menjadi paduan yang tahan.

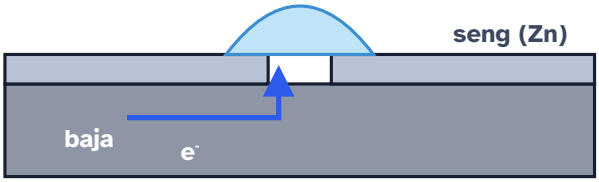
Cara	Prinsip kerja	Contoh	Kelemahan
Cat, minyak, gemuk, plastik, email	penghalang air dan O_2	pagar, rantai sepeda, peralatan dapur berlapis email	bila tergores, karat merambat di bawah lapisan
Lapisan timah (Sn)	penghalang; timah tidak beracun	kaleng makanan dari baja berlapis timah	bila tergores, besi menjadi anode dan berkarat **lebih cepat**
Galvanisasi (lapisan seng)	penghalang **dan** seng yang lebih reaktif berkorban	atap seng, pipa air galvanis, pagar, baut	lapisan seng habis pelan-pelan
Proteksi katodik dengan **anode korban** (Mg, Zn, Al)	logam yang lebih reaktif disambung ke besi sehingga besi menjadi katode	lambung kapal, tiang pancang dermaga, pipa bawah tanah, tangki	anode harus diganti berkala
Proteksi katodik arus paksa	sumber arus searah menjadikan baja katode	pipa transmisi panjang, kerangka beton jembatan pesisir	butuh listrik terus-menerus

Baja tahan karat (≥10,5% Cr, sering ditambah Ni)	Cr membentuk lapisan Cr_2O_3 rapat yang memperbaiki diri (**pasivasi**)	sendok, wastafel, peralatan rumah sakit	mahal; ion Cl^- dapat membuat bintik karat

Kunci untuk memahami lapisan logam adalah deret potensial reduksi dari Bab 30: E° **Mg** = −2,37 V, **Zn** = −0,76 V, **Fe** = −0,44 V, **Sn** = −0,14 V, **Cu** = +0,34 V. Logam yang E°-nya **lebih negatif** daripada besi akan menjadi anode dan melindungi besi. Logam yang E°-nya lebih positif justru menjadikan besi anode.

Baja berlapis seng, tergores

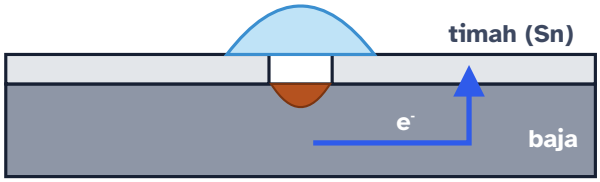
seng berkorban:
$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$



besi di goresan = katode → aman ✔

Baja berlapis timah, tergores

timah = katode



besi = anode: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ ✘

Goresan menentukan nasib. Seng lebih reaktif daripada besi, jadi seng yang teroksidasi dan besi aman. Timah kurang reaktif, jadi justru besi yang menjadi anode dan cepat berlubang. Itulah sebabnya kaleng makanan yang penyok dan tergores jangan disimpan lama.

KERJAKAN BERSAMA **Berapa seng yang habis di lambung kapal?**

Lambung sebuah kapal nelayan dilindungi balok seng (anode korban). Arus rata-rata dari seng ke baja adalah 0,200 A. Berapa kilogram seng yang habis dalam satu tahun (365 hari)? (Ar Zn = 65; F = 96.500 C/mol)

1. $t = 365 \times 24 \times 3.600 = 3{,}154 \times 10^7$ s.
2. $Q = 0{,}200 \times 3{,}154 \times 10^7 = 6{,}307 \times 10^6$ C, mol elektron $= 6{,}307 \times 10^6 / 96.500 = 65{,}4$ mol.
3. $Zn \longrightarrow Zn^{2+} + 2\,e^-$: mol Zn $= 65{,}4/2 = 32{,}7$ mol → $32{,}7 \times 65 = 2.124$ g.

±2,1 kg seng per tahun. Karena itu, petugas galangan memeriksa dan mengganti balok seng setiap kali kapal naik dok.

MITOS

"Atap seng terbuat dari logam seng murni."

FAKTA

Atap "seng" adalah lembaran baja tipis yang dilapisi seng (galvanis), kini sering juga lapisan paduan aluminium–seng. Lapisan seng itu rela teroksidasi lebih dulu untuk melindungi bajanya.

MITOS

"Baja tahan karat tidak pernah berkarat."

FAKTA

Di udara pantai yang asin, ion Cl^- bisa menembus lapisan Cr_2O_3 dan menimbulkan bintik karat (korosi sumuran). Untuk daerah pesisir dipilih mutu yang mengandung molibdenum.

MENGAPA ALUMINIUM TIDAK "BERKARAT"?

Aluminium sebenarnya jauh lebih reaktif daripada besi ($E^\circ = -1{,}66$ V). Namun begitu terkena udara, permukaannya langsung tertutup lapisan Al_2O_3 setebal beberapa nanometer yang rapat dan melekat erat. Lapisan ini menghentikan oksidasi lebih lanjut. Industri bahkan sengaja menebalkannya secara elektrolisis (anodisasi), dengan aluminium sebagai **anode**, untuk kusen jendela dan panci berwarna.

Kimia di sekitarmu

Kapal & dermaga

Balok seng atau aluminium dibaut ke lambung kapal dan tiang pancang dermaga. Balok itu habis pelan-pelan, sedangkan bajanya selamat.

Atap seng

Lembaran baja berlapis seng. Saat goresan terkena hujan, seng di sekitarnya berkorban, sehingga atap tetap awet bertahun-tahun.

Kaleng & timah Bangka

Kaleng makanan adalah baja berlapis timah tipis. Timah dari Bangka Belitung dipakai untuk melapisi kaleng di seluruh dunia.

Pipa PDAM

Air PDAM didisinfeksi dengan klorin hasil industri klor-alkali. Pipa baja transmisi yang panjang dilindungi cat, pembungkus, dan proteksi katodik.

Jembatan pesisir

Jembatan di tepi laut dicat berlapis-lapis dan kerangka bajanya bisa diberi proteksi katodik, karena udara asin mempercepat karat berkali-kali lipat.

Mengisi baterai HP

Saat diisi, reaksi di dalam baterai dipaksa berjalan mundur oleh listrik dari pengisi daya. Baterai sedang bekerja sebagai sel elektrolisis!

Cek Cepat

Pada elektrolisis larutan $\mathrm{CuSO_4}$ dengan elektrode karbon, apa yang terjadi di katode?

- Terbentuk gas oksigen.
- Terbentuk gas hidrogen.
- Tembaga mengendap.
- Elektrode karbon larut.

Mengapa atap seng (baja berlapis seng) tetap tidak berkarat walaupun tergores?

- Seng lebih reaktif, sehingga seng yang teroksidasi, bukan besi.
- Seng menolak air sehingga goresan tetap kering.
- Goresan segera tertutup karat yang melindungi.
- Seng kurang reaktif daripada besi.

Arus 1,00 A dialirkan selama 96.485 s. Berapa mol elektron yang mengalir?

- 0,5 mol
- 2 mol
- 96.485 mol
- 1 mol

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: lima paku, satu minggu

Bahan: 5 paku besi baru yang sama (jangan paku galvanis), 5 gelas plastik bening atau botol bekas, air keran, air matang yang didinginkan dalam wadah tertutup, garam dapur, minyak goreng, sachet silika gel dari kotak sepatu, plastik pembungkus, spidol, senter HP.

1. Beri label gelas A–E. A: paku + silika gel, tutup rapat dengan plastik (udara kering). B: paku direndam air matang, lalu tuang minyak goreng setebal ±1 cm di atasnya.
2. C: paku setengah terendam air keran, gelas dibiarkan terbuka. D: sama seperti C, tetapi airnya diberi 1 sendok teh garam. E: paku dalam air garam, dililit kawat tembaga dari sisa kabel.
3. Letakkan semua gelas di tempat yang sama. Foto setiap hari pada jam yang sama selama 7 hari.
4. Beri skor karat 0 (mengkilap) sampai 4 (karat tebal) dan catat warna airnya.

Keselamatan: kerjakan bersama orang dewasa. Hati-hati ujung paku yang tajam; luka tertusuk paku berkarat harus segera dibersihkan dan diperiksakan. Air dididihkan oleh orang dewasa. Silika gel jangan dibuka atau dimakan, dan jauhkan dari adik kecil. Jangan mencicipi air rendaman. Setelah selesai, buang cairan ke wastafel sambil dialiri air, bungkus paku dengan kertas sebelum dibuang, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Gelas mana yang punya air **dan** oksigen? Mengapa karat di gelas C paling banyak di dekat permukaan air? Mengapa paku E lebih parah daripada D, padahal airnya sama-sama asin?

Tantangan Rumah (bersama guru): elektrolisis mini 9 volt

Bahan: baterai 9 V, dua kabel berpenjepit buaya, dua pensil kayu 2B yang diraut di kedua ujungnya (isinya grafit), segelas air, 1 sendok teh soda kue, beberapa tetes air rebusan kubis ungu sebagai indikator.

1. Larutkan soda kue dalam air, lalu teteskan air kubis ungu sampai larutan berwarna biru keunguan.
2. Jepit ujung atas pensil dengan kabel, lalu celupkan ujung bawahnya ke larutan. Jaga agar kedua pensil tidak bersentuhan.
3. Sambungkan kabel ke baterai selama 3–5 menit. Amati: pensil mana yang gelembungnya lebih banyak? Warna apa yang muncul di sekitar setiap pensil?
4. Lepaskan kabel dari baterai sebelum mengangkat pensil.

Keselamatan: pakai **hanya baterai 9 V**, jangan pernah listrik PLN atau aki. Jangan menyentuhkan kedua ujung kabel (baterai bisa panas). Pakai **soda kue**, bukan garam: elektrolisis air garam menghasilkan gas klorin yang beracun. Bila guru ingin menunjukkan versi air garam, gunakan larutan sangat encer, hanya beberapa menit, di ruang berventilasi baik, dan jangan menghirup gasnya. Gelembung $\mathrm{H_2}$ dan $\mathrm{O_2}$ mudah terbakar, jadi jauhkan dari api. Jangan meminum larutan; buang ke wastafel sambil dialiri air.

Pertanyaan: Pensil yang tersambung ke kutub negatif berperan sebagai apa? Mengapa gelembungnya lebih banyak? Warna kubis ungu di sekitar pensil itu menjadi hijau: apa artinya, dan dari setengah reaksi mana ion penyebabnya?

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 31 dalam 3 menit

☑️ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **sel elektrolisis** dan sel volta dari arah energi, tanda kutub, serta tempat oksidasi dan reduksi
- meramalkan produk elektrolisis **leburan** dan **larutan** dengan aturan katode–anode, termasuk air garam yang menghasilkan H_2, Cl_2, dan NaOH
- menghitung muatan, massa endapan, volume gas, dan waktu dengan **hukum Faraday**
- menjelaskan penyepuhan, pemurnian tembaga, proses **Hall–Héroult**, dan industri **klor-alkali**
- menjelaskan **korosi besi** sebagai sel volta mini dan memilih cara pencegahannya: cat, galvanisasi, proteksi katodik, atau baja tahan karat

🔑 Istilah kunci

Elektrolisis · sel elektrolisis · elektrolit · Katode · Anode · inert · Anode aktif · overpotensial · tetapan Faraday · efisiensi arus · Penyepuhan · lumpur anode · kriolit · klor-alkali · Korosi · perkaratan

🧮 Rumus penting

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I\,t}{F}$$

Hukum Faraday: massa endapan. Massa logam yang menempel sama dengan mol elektron (arus kali waktu dibagi 96.485) dibagi elektron per ion, lalu dikali massa satu mol logam.

$$V = \frac{I\,t}{z\,F} \times V_m$$

Volume gas hasil elektrolisis. Hitung mol elektron, bagi dengan banyaknya elektron untuk membentuk satu molekul gas, lalu kalikan dengan volume satu mol gas.

$$W = \frac{3\,F\,V}{A_r \times \eta}$$

Energi listrik untuk 1 kg aluminium. Setiap mol Al butuh 3 mol elektron yang didorong dengan tegangan V; bagi dengan efisiensi arus karena sebagian elektron terbuang.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- "Anode selalu kutub positif" itu keliru.
- Pada larutan NaCl, logam natrium tidak pernah terbentuk.
- Penyepuhan sungguhan memakai larutan yang berbahaya: sepuh emas dan perak industri sering memakai senyawa sianida yang sangat beracun, dan pelapisan krom memakai senyawa krom(VI) penyebab kanker.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=31

Teka-teki untuk Bab 32

Anode karbon di smelter Kuala Tanjung dibuat dari kokas, sisa padat pengolahan minyak bumi. Dari minyak bumi yang sama, kilang juga menghasilkan gas LPG, bensin yang cair, dan lilin parafin yang padat. Semuanya tersusun hanya dari karbon dan hidrogen. Kenapa ada yang gas, ada yang cair, dan ada yang padat?

▼ **Intip petunjuk**

Hitung atom karbonnya! LPG berisi molekul dengan 3–4 atom C, bensin ±5–10 atom C, dan lilin lebih dari 20 atom C. Makin panjang rantai karbon, makin kuat gaya London antarmolekul (Bab 13), sehingga titik didihnya makin tinggi. Di Bab 32 kita akan mengenal keluarga besar **hidrokarbon** dan cara kilang memisahkannya.

BAB 32 · KIMIA KARBON & KEHIDUPAN

32 Hidrokarbon & Minyak Bumi: Karbon Bermain Ular Naga

Gas di tabung 3 kg, bensin di tangki motor, dan lilin saat mati lampu ternyata bersaudara. Semuanya hanya rantai karbon dan hidrogen dari perut bumi; yang membedakan hanyalah panjang dan bentuk rantainya.

Setelah bab ini, kamu bisa

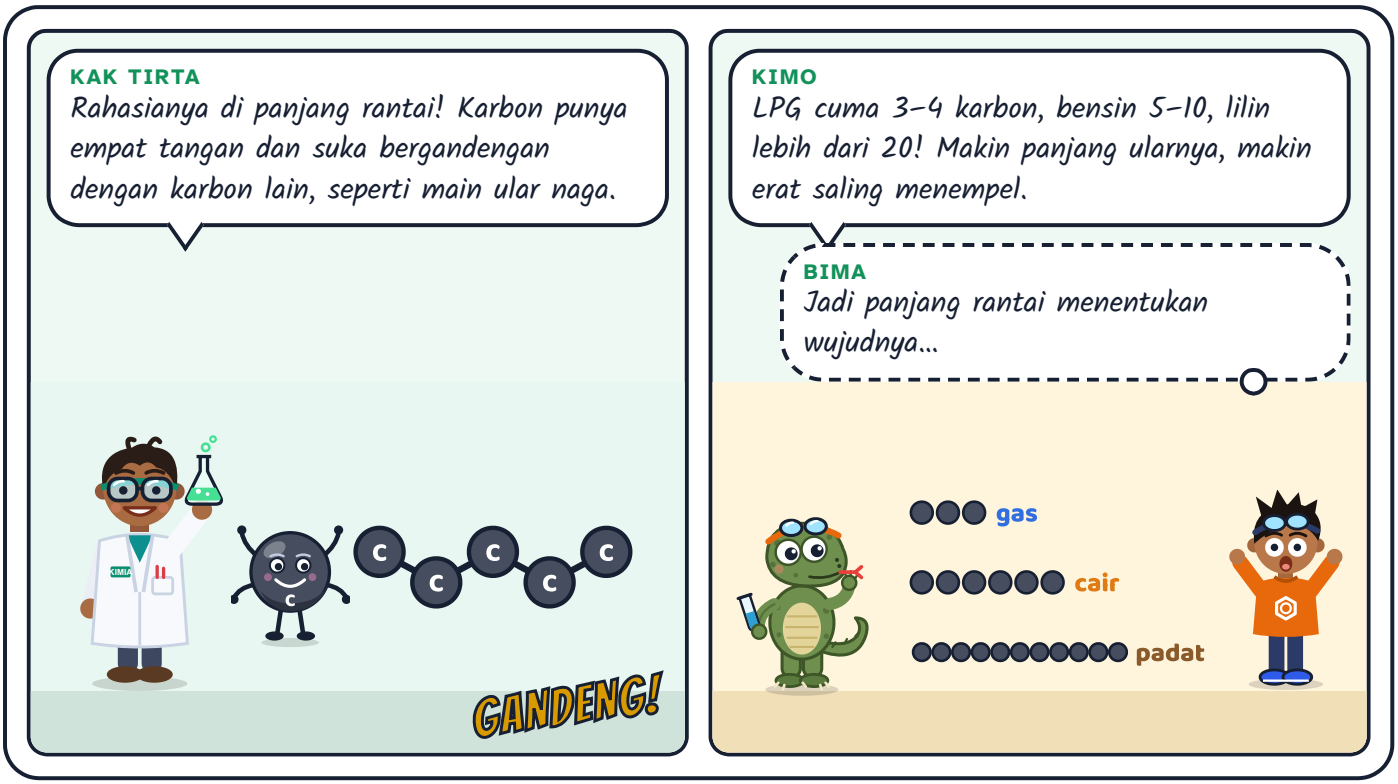
- menjelaskan **kekhasan atom karbon** dan membedakan atom C **primer, sekunder, tersier, dan kuarterner**;
- memberi **nama IUPAC** alkana, alkena, dan alkuna, serta menggambar strukturnya dari nama;
- mengenali **isomer struktur** dan **isomer geometri (cis–trans)**, lalu menjelaskan pengaruhnya pada titik didih;
- menuliskan reaksi **pembakaran, substitusi, dan adisi** yang setara dan menghitung kebutuhan oksigen;
- menjelaskan **distilasi bertingkat minyak bumi**, **bilangan oktan**, dampak lingkungannya, dan keistimewaan **benzena**.

ULAR NAGA KARBON

KOMIK · 4 PANEL







Tebak Dulu!

Dari puluhan juta senyawa yang sudah dicatat ilmuwan, kira-kira berapa bagian yang mengandung karbon?

- Sedikit, sekitar 10%, karena karbon hanya satu dari 118 unsur.
- Kira-kira separuhnya, sama banyak dengan senyawa unsur lain.
- Sebagian besar, jauh melebihi gabungan senyawa semua unsur lain.
- Hampir tidak ada, karena karbon di alam kebanyakan berupa arang.

Jawabannya: sebagian besar. Senyawa karbon jumlahnya puluhan juta dan merupakan bagian terbesar dari semua senyawa yang tercatat. Rahasianya, atom karbon bisa bergandengan dengan sesamanya membentuk rantai, cabang, dan cincin hampir tanpa batas. Satu unsur, kemungkinan tak terhingga!

32.1 Kekhasan atom karbon

Lihat sekelilingmu: nasi, minyak goreng, kaus, sandal jepit, bensin, kayu, bahkan tubuhmu sendiri. Semuanya dibangun di atas kerangka atom karbon. Cabang ilmu yang mempelajari senyawa karbon disebut **kimia organik**.

Bahasa sederhana · Bayangkan atom karbon sebagai anak yang punya **empat tangan**. Setiap tangan bisa menggandeng atom hidrogen atau anak karbon lain. Karena tangannya banyak dan genggamannya kuat, anak-

anak karbon bisa membuat barisan ular naga yang panjang, bercabang, bahkan melingkar seperti cincin.

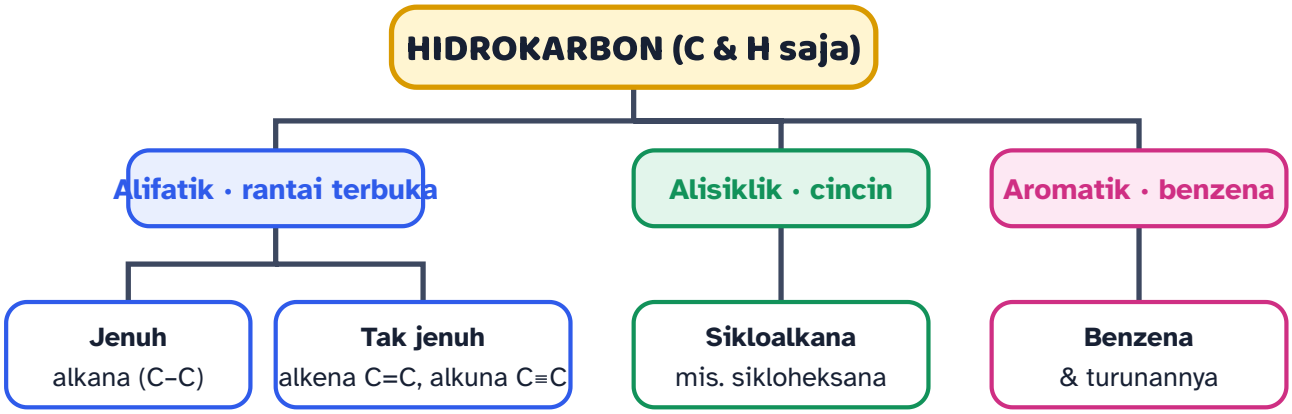
Atom C (nomor atom 6) berkonfigurasi elektron 2, 4. Empat elektron valensinya terlalu banyak untuk dilepas dan terlalu sedikit untuk ditangkap, sehingga karbon memilih **berbagi**: ia membentuk empat ikatan kovalen (Bab 11). Pasangannya yang paling sering adalah H.

KEKHASAN ATOM KARBON

1. **Tetravalen:** selalu membentuk 4 ikatan kovalen.
2. **Berantai (katenasi):** ikatan C–C kuat (±348 kJ/mol), jauh lebih kuat daripada Si–Si (±226 kJ/mol), sehingga rantai karbon tidak mudah putus.
3. **Ikatan beragam:** tunggal (C–C), rangkap dua (C=C), atau rangkap tiga (C≡C).
4. **Bentuk beragam:** rantai lurus, bercabang, atau cincin.

DEFINISI · HIDROKARBON

Hidrokarbon adalah senyawa yang **hanya** tersusun atas atom karbon dan hidrogen. Contohnya metana CH_4, propana C_3H_8, etena C_2H_4, dan benzena C_6H_6. Gula $C_6H_{12}O_6$ bukan hidrokarbon, karena mengandung oksigen.



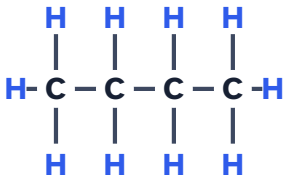
Peta keluarga hidrokarbon. "Jenuh" berarti semua ikatan C–C tunggal, sehingga setiap karbon sudah "kenyang" hidrogen.

Satu molekul bisa ditulis dengan beberapa cara. Kimiawan memilih cara yang paling praktis untuk keperluannya:

Rumus molekul

C_4H_{10}

Struktur lengkap



Struktur singkat

$CH_3–CH_2–CH_2–CH_3$

atau $CH_3(CH_2)_2CH_3$

Rumus kerangka

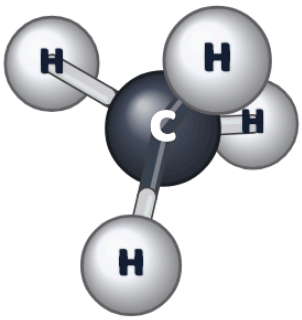


tiap sudut & ujung = 1 C, H tidak digambar

Empat wajah butana. Struktur lengkap paling jelas untuk pemula; rumus kerangka paling cepat untuk molekul besar.

MOLEKUL 3D

Karbon bertangan empat: tunggal, rangkap dua, rangkap tiga



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Metana CH_4 Mr ≈ 16,04 PubChem ↗

Tetrahedral sempurna (109,5°). Gas rumah kaca dari sawah, sampah, dan peternakan; komponen utama gas alam.

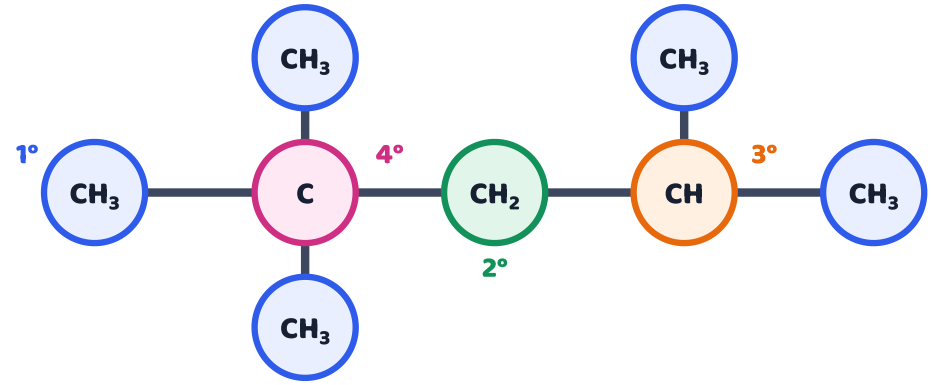
Ketuk tiga atom untuk mengukur sudut di sekitar karbon. Pada etana sudutnya ±109,5° (tetrahedral), pada etena ±120° (segitiga datar), dan pada etuna 180° (lurus). Ukur juga panjang ikatan C–C, C=C, dan C≡C: makin banyak ikatan, makin pendek!

Karbon primer, sekunder, tersier, kuarterner

Tidak semua karbon dalam satu molekul punya "kedudukan" yang sama. Kita menggolongkannya dari jumlah **karbon lain** yang diikatnya langsung.

DEFINISI · JENIS ATOM KARBON

- **C primer** (1°): mengikat 1 atom C lain.
- **C sekunder** (2°): mengikat 2 atom C lain.
- **C tersier** (3°): mengikat 3 atom C lain.
- **C kuarterner** (4°): mengikat 4 atom C lain.



primer: 5 · sekunder: 1 · tersier: 1 · kuarterner: 1

Isooktana (2,2,4-trimetilpentana), bintang bensin oktan tinggi, punya keempat jenis karbon sekaligus.

TRIK KAK TIRTA

"Hitung tetangga karbonnya, abaikan hidrogennya." Cara cepat dari rumus singkat: CH_3 di ujung pasti primer, CH_2 di tengah rantai pasti sekunder, CH bercabang pasti tersier, dan C tanpa H pasti kuarterner. Banyaknya H + banyaknya tetangga C selalu 4.

CONTOH **Menghitung jenis karbon**

Tentukan jumlah atom C primer, sekunder, tersier, dan kuarterner dalam $CH_3-CH(CH_3)-CH_2-CH_2-CH_3$ (2-metilpentana).

1. Tiga gugus CH_3 (dua di ujung rantai, satu cabang) masing-masing mengikat 1 C → 3 C primer.
2. CH di posisi 2 mengikat tiga C (dua di rantai + cabang) → 1 C tersier.
3. Dua CH_2 di tengah rantai masing-masing mengikat 2 C → 2 C sekunder. Tidak ada C tanpa H → 0 kuarterner.

Primer 3, sekunder 2, tersier 1, kuarterner 0. Cek: 3 + 2 + 1 = 6 atom C, cocok dengan rumus C_6H_{14} ✔

TAMU DARI MASA LALU

Dulu orang percaya senyawa organik hanya bisa dibuat makhluk hidup karena butuh "daya hidup" (*vis vitalis*). Pada 1828, **Friedrich Wöhler** dari Jerman memanaskan amonium sianat, garam anorganik, dan terkejut mendapat **urea**, zat yang biasanya ada di air seni. Teori daya hidup pun runtuh. Tiga dasawarsa kemudian, **August Kekulé** dan Archibald Couper mengusulkan bahwa karbon selalu bervalensi empat dan bisa membentuk rantai: lahirlah kimia organik modern.

32.2 Alkana: deret homolog, tata nama, dan sifat

Alkana adalah hidrokarbon jenuh: semua ikatan C–C tunggal. Setiap karbon mengikat atom sebanyak mungkin, sehingga rumusnya selalu $\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2}$. Nama alkana berakhiran **-ana**.

n	Nama	Rumus	Struktur singkat	Mr	Titik didih (°C)	Wujud (25 °C)
1	metana	$\mathrm{CH_4}$	$\mathrm{CH_4}$	16	−162	gas
2	etana	$\mathrm{C_2H_6}$	$\mathrm{CH_3CH_3}$	30	−89	gas
3	propana	$\mathrm{C_3H_8}$	$\mathrm{CH_3CH_2CH_3}$	44	−42	gas
4	butana	$\mathrm{C_4H_{10}}$	$\mathrm{CH_3(CH_2)_2CH_3}$	58	−0,5	gas
5	pentana	$\mathrm{C_5H_{12}}$	$\mathrm{CH_3(CH_2)_3CH_3}$	72	36	cair
6	heksana	$\mathrm{C_6H_{14}}$	$\mathrm{CH_3(CH_2)_4CH_3}$	86	69	cair
7	heptana	$\mathrm{C_7H_{16}}$	$\mathrm{CH_3(CH_2)_5CH_3}$	100	98	cair
8	oktana	$\mathrm{C_8H_{18}}$	$\mathrm{CH_3(CH_2)_6CH_3}$	114	126	cair
9	nonana	$\mathrm{C_9H_{20}}$	$\mathrm{CH_3(CH_2)_7CH_3}$	128	151	cair
10	dekana	$\mathrm{C_{10}H_{22}}$	$\mathrm{CH_3(CH_2)_8CH_3}$	142	174	cair

DEFINISI · DERET HOMOLOG

Deret homolog adalah kelompok senyawa dengan rumus umum yang sama, yang anggota berurutannya berbeda satu gugus $-\mathrm{CH_2}-$ (Mr selisih 14). Sifat kimianya mirip, sedangkan sifat fisiknya (titik didih, massa jenis) berubah secara teratur.

RUMUS HIDUP **Rumus umum alkana**

$$C_nH_{2n+2} \qquad M_r = 12n + (2n + 2) = 14n + 2$$

Setiap tambahan satu karbon membawa dua hidrogen, jadi Mr naik 14 setiap kali rantai bertambah satu gugus CH_2.

n Jumlah atom C

M_r Massa molekul relatif

MASSA MOLEKUL RELATIF

58

gas pada suhu kamar

isi tabung LPG

Alkana dengan **4** atom C punya **10** atom H, Mr = **58**. Perkiraan titik didihnya ≈ **-0,5** °C.

Cek satuan: Ar C = 12, H = 1 · titik didih dari rumus empiris Egloff (cocok untuk n ≥ 2)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ALKANA-UMUM

Mengapa titik didih naik? Alkana adalah molekul nonpolar. Satu-satunya "lem" di antara molekulnya adalah **gaya London** (Bab 13). Makin panjang rantai, makin banyak elektron dan makin luas permukaan sentuhnya, sehingga gaya London makin kuat dan dibutuhkan suhu lebih tinggi untuk memisahkan molekul-molekulnya.

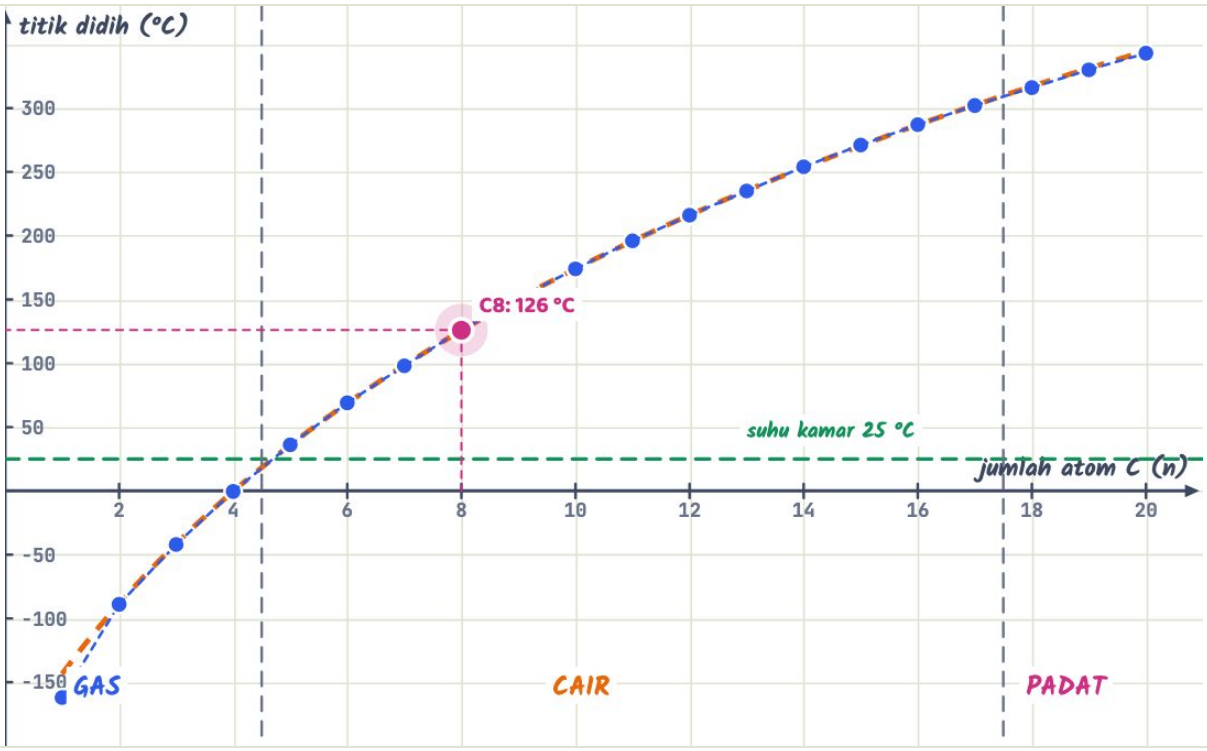
GRAFIK HIDUP

Titik didih alkana rantai lurus vs jumlah atom C

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-32

$$T_d = f(n)$$

$$n = 8: \quad T_d = 126\ ^\circ\text{C}$$



cair pada suhu kamar

titik didih (data)	perkiraan rumus	naik bila +1 C
126 °C	125,6 °C	25 °C

Titik biru adalah data; garis jingga putus-putus adalah rumus perkiraan (Egloff). Seret titik magenta. Perhatikan: kenaikan titik didih paling besar di awal (metana → etana naik 73 °C), lalu makin kecil (C19 → C20 hanya naik 13 °C). Di mana garis hijau 25 °C memotong kurva? Itulah batas gas dan cair.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Saat alkana mendidih, yang putus adalah **gaya antarmolekul** (gaya London), bukan ikatan kovalen C–C atau C–H di dalam molekul. Uap bensin tetap berisi molekul oktana yang utuh. Kalau ikatan kovalennya putus, itu sudah reaksi kimia (misalnya perengkahan), bukan pendidihan.

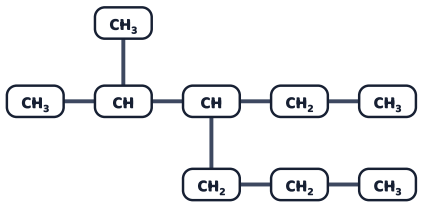
Tata nama IUPAC: memberi nama seperti memberi alamat

Nama IUPAC bekerja seperti alamat rumah: **nama jalan** (rantai induk), **nomor rumah** (posisi cabang), dan **nama penghuni** (jenis cabang). Cabang alkana disebut **gugus alkil**: alkana yang kehilangan satu atom H, berakhiran **-il**.

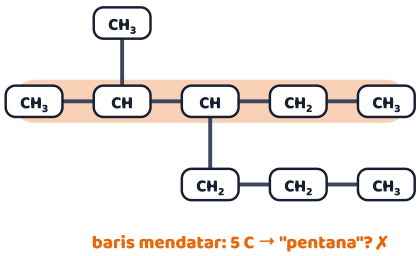
Gugus alkil	Rumus	Asal
metil	$-\mathrm{CH_3}$	metana
etil	$-\mathrm{CH_2CH_3}$	etana
propil	$-\mathrm{CH_2CH_2CH_3}$	propana (lewat C ujung)
isopropil	$-\mathrm{CH(CH_3)_2}$	propana (lewat C tengah)
tert-butil	$-\mathrm{C(CH_3)_3}$	isobutana (lewat C tersier)

ATURAN IUPAC · MENAMAI ALKANA BERCABANG

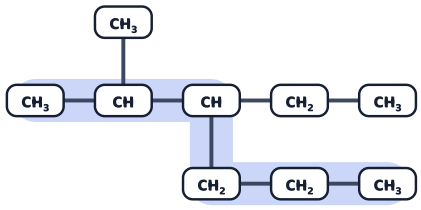
1. **Rantai induk** = rantai karbon **terpanjang** (boleh berbelok di gambar!). Jika ada beberapa yang sama panjang, pilih yang **cabangnya paling banyak**.
2. **Beri nomor** dari ujung yang membuat posisi cabang **sekecil mungkin** (bandingkan angka pertama yang berbeda).
3. **Namai cabang** beserta nomornya. Cabang sejenis digabung dengan awalan **di-, tri-, tetra-**: 2,2,4-trimetil.
4. **Urutkan cabang menurut abjad** (etil sebelum metil); awalan di-, tri-, *tert*- tidak ikut diabjadkan, tetapi iso- ikut.
5. **Tulis**: angka dipisah koma, angka dan huruf dipisah tanda hubung, cabang terakhir menyatu dengan nama induk: **3-etil-2-metilheksana**.



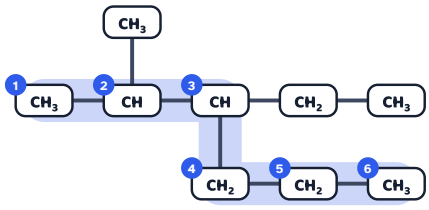
Langkah 1. Alkana C_9H_{20} ini akan kita beri nama. Bima langsung membaca baris mendatar dari kiri ke kanan...



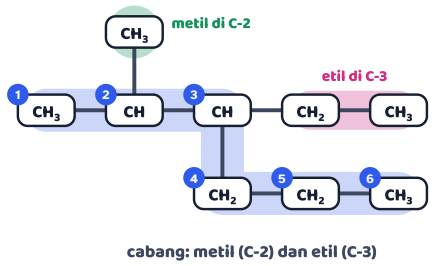
Langkah 2. Baris mendatar hanya berisi 5 atom C. Rantai di gambar boleh berbelok, jadi jangan tertipu bentuk gambarnya!



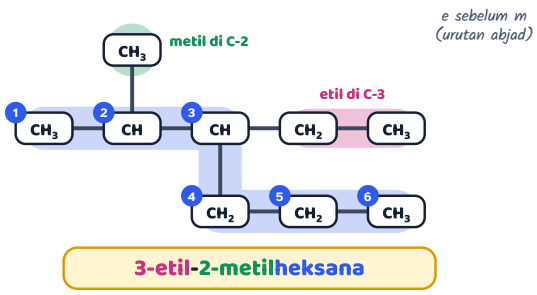
Langkah 3. Rantai terpanjang berisi **6 atom C** dan berbelok ke bawah: rantai induknya **heksana**. (Rantai lewat gugus etil juga 6 C, tetapi cabangnya hanya satu; pilih yang cabangnya paling banyak.)



Langkah 4. Beri nomor dari ujung yang paling dekat dengan cabang. Cabang berada di C-2 dan C-3, lebih kecil daripada C-4 dan C-5 bila dinomori dari ujung lain.



Langkah 5. Kenali cabangnya: $-CH_3$ di C-2 adalah **metil**, $-CH_2CH_3$ di C-3 adalah **etil**.



Langkah 6. Susun cabang menurut abjad (etil sebelum metil), lalu gabungkan dengan nama induk: **3-etil-2-metilheksana**.

TRIK KAK TIRTA

Hafalkan empat awalan pertama dengan kalimat **"Mau Es Pakai Buah"**: **met**-, **et**-, **prop**-, **but**- (1–4). Sisanya mirip bahasa sehari-hari: **pent**agon (5), **heks**agon (6), **hept**agon (7), **okt**opus berkaki 8, **non**agon (9), **dek**ade (10). Dan ingat: kalau namamu memuat "2-etil" atau "1-metil", rantai induknya pasti belum terpanjang!

KERJAKAN BERSAMA

Nama ilmiah si bintang bensin

Beri nama IUPAC isooktana: $(CH_3)_3C-CH_2-CH(CH_3)_2$.

1. Tulis lengkap: $CH_3-C(CH_3)_2-CH_2-CH(CH_3)-CH_3$. Rantai terpanjang berisi 5 C → induk **pentana**.
2. Nomori dari kiri: cabang di C-2, C-2, dan C-4 → {2, 2, 4}. Dari kanan: {2, 4, 4}. Angka pertama sama (2), angka kedua 2 < 4, jadi dari kiri yang benar.
3. Tiga cabang metil → **trimetil** dengan nomor 2,2,4.

2,2,4-trimetilpentana. Nomor 2 ditulis dua kali karena ada dua metil di C-2: setiap cabang wajib punya nomornya sendiri.

COBA SENDIRI

Jebakan rantai yang menyamar

Bima menamai $CH_3-CH(CH_3)-CH_2-CH(C_2H_5)-CH_3$ sebagai "2-metil-4-etilpentana". Periksa dan perbaiki namanya.

1. Gugus etil $-C_2H_5$ bisa menjadi bagian rantai! Rantai $CH_3-CH(CH_3)-CH_2-CH-CH_2-CH_3$ berisi **6 C** → induk heksana, bukan pentana.
2. Cabang yang tersisa: dua metil. Nomori dari ujung terdekat cabang: metil di C-2 dan C-4 (dari ujung lain: C-3 dan C-5).
3. Dua metil → dimetil. Selain itu, Bima juga keliru urutan: seharusnya abjad (etil sebelum metil) seandainya keduanya memang cabang.

Nama yang benar: 2,4-dimetilheksana (C_8H_{18}). Coba rakit di Lab Mini di bawah dengan contoh "Jebakan": sorotan kuning akan berbelok mengikuti rantai terpanjang.

LAB MINI Perakit Alkana: sambung karbon, dapatkan namanya

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-32



Rumus	Mr	Nama IUPAC	Isomer ditemukan
CH_4	16	metana	1/1

Ketuk titik kosong di sebelah karbon terpilih (bercincin jingga) untuk menyambung karbon baru, termasuk arah diagonal. Ketuk karbon lain untuk memilihnya; ketuk karbon ujung yang terpilih sekali lagi untuk melepasnya. Rumus, Mr, titik didih, jenis karbon, dan **nama IUPAC** muncul otomatis. Misi: temukan kelima isomer C_6H_{14} dan kesembilan isomer C_7H_{16}. Kalau kamu merakit molekul yang sama dengan gambar berbeda, perakit akan memberi tahu!

Sifat alkana yang lain mudah ditebak dari strukturnya. Karena nonpolar, alkana **tidak larut dalam air** tetapi larut dalam pelarut nonpolar (misalnya heksana melarutkan minyak sayur). Massa jenisnya lebih kecil daripada air, sehingga minyak tanah mengapung. Alkana juga cukup "malas" bereaksi; nama lamanya *parafin* berasal dari bahasa Latin yang berarti "kurang berminat".

MITOS

"Alkana bercabang punya titik didih lebih tinggi karena bentuknya rumit."

FAKTA

Justru sebaliknya. Cabang membuat molekul lebih bulat dan bidang sentuhnya sempit, sehingga gaya London melemah. Neopentana (9,5 °C) mendidih jauh di bawah n-pentana (36 °C).

MITOS

"Minyak tanah bisa dicuci dengan air karena sama-sama cair."

FAKTA

Alkana nonpolar tidak bercampur dengan air yang polar. Air justru menyebarkan tumpahan minyak. Itulah sebabnya api minyak tidak boleh disiram air.

32.3 Alkena, alkuna, dan isomer

Bila dua atom C berbagi dua pasang elektron, terbentuk ikatan rangkap dua (C=C). Hidrokarbon dengan satu ikatan rangkap dua disebut **alkena** (akhiran **-ena**, rumus $\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n}$). Hidrokarbon dengan satu ikatan rangkap tiga (C≡C) disebut **alkuna** (akhiran **-una**, rumus $\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n-2}$). Keduanya **tak jenuh**: masih "lapar" dan bisa menampung atom tambahan.

	Alkana	Alkena	Alkuna
Rumus umum	$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2}$	$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n}$	$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n-2}$
Ikatan khas	C–C tunggal	C=C rangkap dua	C≡C rangkap tiga
Akhiran nama	-ana	-ena	-una
Anggota pertama	metana CH_4	etena $\mathrm{C}_2\mathrm{H}_4$	etuna $\mathrm{C}_2\mathrm{H}_2$
Bentuk di sekitar C	tetrahedral, 109,5°	segitiga datar, 120°	lurus, 180°
Reaksi khas	substitusi	adisi	adisi
Contoh sehari-hari	LPG, bensin	etena pematang buah, bahan plastik	gas las karbit

ATURAN IUPAC · ALKENA DAN ALKUNA

Rantai induk adalah rantai terpanjang yang **memuat ikatan rangkap**. Nomori dari ujung yang membuat ikatan rangkap mendapat nomor **sekecil mungkin**, lalu tulis nomor itu sebelum nama induk. Contoh: $\mathrm{CH_2{=}CH{-}CH_2{-}CH_3}$ adalah 1-butena, $\mathrm{CH_3{-}CH{=}CH{-}CH_3}$ adalah 2-butena, $\mathrm{CH_3{-}C(CH_3){=}CH{-}CH_3}$ adalah 2-metil-2-butena, dan $\mathrm{CH_3{-}C{\equiv}C{-}CH_3}$ adalah 2-butuna. (Gaya IUPAC terbaru menyisipkan nomornya: but-1-ena, but-2-una; keduanya diterima.)

KIMIA NUSANTARA · PISANG DAN KARBIT

Buah yang matang melepaskan gas **etena** (etilena), hormon yang mempercepat pematangan buah di sekitarnya. Itu sebabnya pisang mentah yang dibungkus koran bersama pisang matang cepat menguning. Pedagang di pasar dulu sering memeram buah dengan **karbit** (kalsium karbida): bila terkena air, karbit melepaskan gas etuna (asetilena) yang meniru kerja etena. Karbit juga dipakai tukang las, tetapi hanya boleh ditangani orang dewasa terlatih karena gasnya mudah meledak.

Isomer: kembar rumus, beda wajah

Tebak Dulu!

Butana dan isobutana sama-sama C_4H_{10} dengan Mr 58. Bagaimana titik didihnya?

- Sama persis, karena rumus molekul dan Mr-nya sama.
- Isobutana lebih tinggi, karena cabangnya membuat molekul lebih padat.
- Isobutana lebih rendah (−12 °C, sedangkan butana −0,5 °C).
- Tidak bisa dibandingkan, karena keduanya gas.

Jawabannya: isobutana lebih rendah. Rumus sama tidak berarti zatnya sama. Isobutana lebih bulat dan kompak, sehingga bidang sentuh antarmolekulnya kecil dan gaya London-nya lebih lemah. Dua zat berbeda dengan rumus molekul sama disebut **isomer**.

DEFINISI · ISOMER

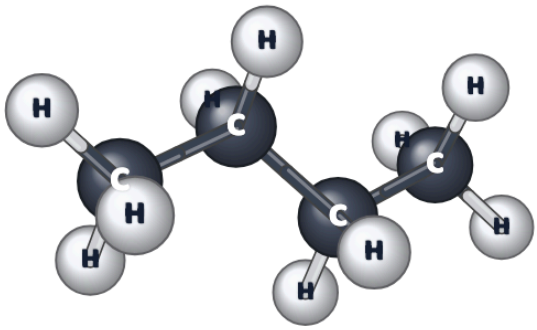
Isomer adalah senyawa-senyawa yang rumus molekulnya sama tetapi susunan atomnya berbeda, sehingga sifatnya juga berbeda. **Isomer struktur** berbeda dalam urutan sambungan atom: isomer **kerangka** (rantai lurus vs bercabang), isomer **posisi** (1-butena vs 2-butena), dan isomer **fungsi** (1-butena vs siklobutana). **Isomer geometri** punya sambungan yang sama tetapi letak gugusnya di ruang berbeda (cis vs trans).

Isomer C_5H_{12}	Struktur singkat	Bentuk	Titik didih (°C)
pentana (n-pentana)	$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_3$	rantai lurus, memanjang	36
2-metilbutana (isopentana)	$CH_3CH(CH_3)CH_2CH_3$	satu cabang	28

2,2-dimetilpropana (neopentana)	$C(CH_3)_4$	hampir bulat seperti bola	9,5

MOLEKUL 3D

Kembar rumus, beda bentuk



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

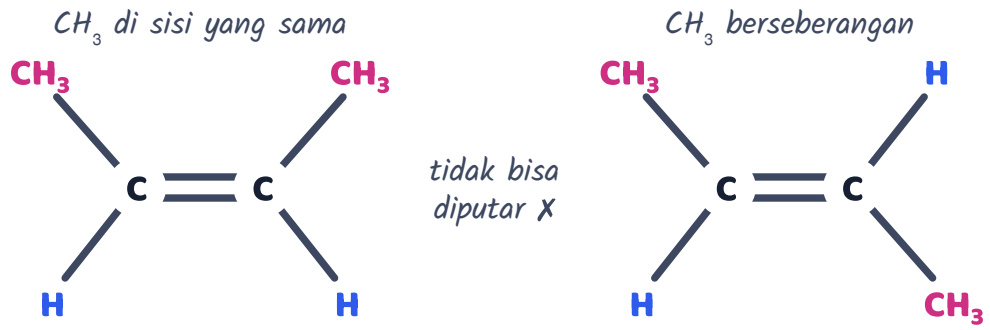
Butana (n-butana) C_4H_{10}

Mr ≈ 58,12 PubChem ↗

Isi korek gas dan LPG. Isomernya: isobutana.

Bandingkan butana yang memanjang dengan isobutana yang membulat: hitung atomnya, rumusnya sama-sama C_4H_{10}. Lalu bandingkan cis- dan trans-2-butena: di mana letak kedua gugus CH_3 terhadap ikatan rangkap? Ukur jarak antara kedua atom C metilnya pada masing-masing isomer.

Ikatan tunggal C–C bisa berputar bebas seperti poros roda. Ikatan rangkap C=C **tidak bisa berputar**, karena ikatan π-nya akan putus. Akibatnya, gugus yang terpasang di ikatan rangkap "terkunci" posisinya.



cis-2-butena · td 3,7 °C **trans-2-butena · td 0,9 °C**

Isomer geometri 2-butena. Trans lebih simetris dan meleleh pada −106 °C, sedangkan cis pada −139 °C.

SYARAT ISOMER CIS–TRANS

(1) Ada ikatan yang tidak bisa berputar, misalnya C=C. (2) **Setiap** atom C pada ikatan rangkap itu mengikat **dua gugus yang berbeda**. Karena itu 2-butena punya isomer cis–trans, sedangkan 1-butena ($CH_2{=}$: dua H sama) dan 2-metil-2-butena (dua CH_3 pada satu C) tidak punya.

MITOS

"Isomer itu molekul yang sama, cuma digambar berbeda."

FAKTA

Isomer adalah **zat berbeda** dengan titik didih, titik leleh, bahkan bau yang berbeda. Yang sama hanyalah rumus molekulnya. Molekul yang sama yang digambar berbeda bukan isomer.

MITOS

"Cis-2-butena bisa berubah jadi trans-2-butena dengan sendirinya, cukup diputar."

FAKTA

Ikatan π pada C=C mengunci rotasi. Untuk mengubah cis menjadi trans, ikatan π harus diputus dulu, misalnya dengan cahaya ultraviolet atau katalis.

MITOS

"Rantai lurus yang digambar berbelok adalah isomer baru."

FAKTA

Ikatan tunggal bisa berputar, jadi rantai lurus boleh ditekuk sesukamu. Selama urutan sambungannya sama, molekulnya tetap sama. Uji dengan Perakit Alkana di subbab 32.2!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DERAJAT KETIDAKJENUHAN DAN ATURAN E/Z

Setiap ikatan π **atau** setiap cincin "mencuri" dua atom H dibandingkan alkana dengan jumlah C yang sama. Jadi dari rumus molekul saja kita bisa menghitung jumlah ikatan π + cincin, disebut **derajat ketidakjenuhan** (*double bond equivalent*, DBE). Halogen dihitung seperti H.

RUMUS HIDUP **Derajat ketidakjenuhan**

$$DBE = \frac{2C + 2 - H}{2}$$

Bandingkan jumlah H molekulmu dengan alkana yang jumlah C-nya sama; setiap kekurangan dua H berarti satu ikatan π atau satu cincin.

- C Jumlah atom C
- H Jumlah atom H
- DBE Ikatan π + cincin

IKATAN Π + CINCIN

4

benzena: satu cincin + tiga ikatan π

Alkana dengan **6** atom C punya **14** atom H. Molekul ini kekurangan **8** atom H, jadi punya **4** ikatan π dan/atau cincin.

Cek satuan: tanpa satuan

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KETIDAKJENUHAN

Untuk alkena yang gugusnya beragam, cis–trans bisa ambigu. IUPAC memakai aturan **E/Z**: beri prioritas pada atom bernomor atom lebih besar di setiap C ikatan rangkap. Bila kedua gugus berprioritas tinggi sepihak, isomernya **Z** (*zusammen*, bersama); bila berseberangan, **E** (*entgegen*, berlawanan).

32.4 Reaksi hidrokarbon: membakar, mengganti, menambah

Pembakaran

Semua hidrokarbon terbakar. Pada **pembakaran sempurna** (oksigen cukup), semua karbon menjadi CO_2 dan semua hidrogen menjadi H_2O, disertai banyak kalor. Itulah yang terjadi di kompor gas yang nyalanya biru.

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 \longrightarrow x\,CO_2 + \frac{y}{2}\,H_2O$$

RUMUS HIDUP **Oksigen untuk pembakaran sempurna**

$$n_{O_2} = x + \frac{y}{4}$$

Setiap atom C butuh satu molekul O_2 untuk menjadi CO_2, dan setiap empat atom H butuh satu molekul O_2 untuk menjadi dua H_2O.

x Jumlah atom C

y Jumlah atom H

n_{O_2} O_2 per mol bahan bakar mol

O_2 PER MOL BAHAN BAKAR

5

mol

alkana

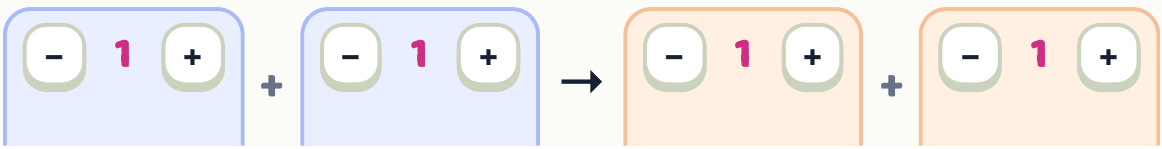
propana (LPG)

1 mol C**3**H**8** + **5** mol O_2 → **3** mol CO_2 + **4** mol H_2O. Udara hanya ±21% O_2, jadi butuh ±**533** L udara (STP).

Cek satuan: mol O_2 per mol bahan bakar

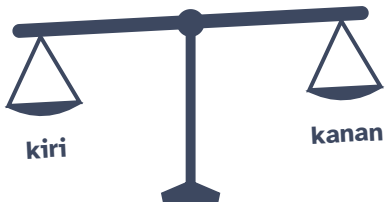
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-OKSIGEN-BAKAR

PENYETARA REAKSI **Setarakan pembakaran hidrokarbon**



CH_4 O_2 CO_2 H_2O

Unsur	Kiri	Kanan	
C	1 ●	1 ●	✓
H	4 ○○○○	2 ○○	✗
O	2 ●●	3 ●●●	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 7 null

Urutan jitu: setarakan C dulu, lalu H, dan O paling akhir (karena O ada di dua produk). Bila koefisien O_2 jadi pecahan (misalnya 13/2 untuk butana), kalikan semuanya dengan 2. Persamaan terakhir adalah pembakaran **tidak sempurna**: bandingkan kebutuhan oksigennya!

Bila oksigen kurang, terjadi **pembakaran tidak sempurna**. Sebagian karbon menjadi gas karbon monoksida, CO, atau butiran karbon padat (jelaga) yang membuat nyala berwarna kuning dan pantat panci menghitam:

$$2\,CH_4 + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,CO + 4\,H_2O \qquad CH_4 + O_2 \longrightarrow C$$

⚠ **KESELAMATAN · GAS TAK BERBAU YANG MEMATIKAN**

Karbon monoksida tidak berwarna dan tidak berbau, tetapi mengikat hemoglobin darah ±200 kali lebih kuat daripada oksigen. Jangan menyalakan genset, kompor arang, atau mesin kendaraan di ruang tertutup. Nyala kompor yang kuning dan berjelaga tandanya udara kurang: bersihkan lubang udara kompor dan pastikan dapur berventilasi.


Mudah menyala


Gas bertekanan


CO: toksik

KERJAKAN BERSAMA **Sebuah tabung LPG menjadi berapa kilogram CO_2?**

Anggap isi tabung LPG 3 kg seluruhnya butana, C_4H_{10}. Berapa kilogram O_2 yang dibutuhkan dan berapa kilogram CO_2 yang terbentuk bila semuanya terbakar sempurna? (Ar C = 12, H = 1, O = 16)

1. Persamaan setara: $2\,C_4H_{10} + 13\,O_2 \longrightarrow 8\,CO_2 + 10\,H_2O$.
2. Mol butana: $n = 3000/58 = 51{,}7$ mol.
3. Mol $O_2 = \frac{13}{2} \times 51{,}7 = 336{,}2$ mol → massa $= 336{,}2 \times 32 = 10.759$ g ≈ 10,8 kg.
4. Mol $CO_2 = 4 \times 51{,}7 = 206{,}9$ mol → massa $= 206{,}9 \times 44 = 9.103$ g ≈ 9,1 kg.

Butuh ±10,8 kg oksigen dan menghasilkan ±9,1 kg CO_2, tiga kali massa gasnya! Massa bertambah karena setiap atom C "menggandeng" dua atom O dari udara.

ADU CEPAT **Oksigen untuk alkana**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-32

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Rumus cepat x + y/4. Contoh: propana C_3H_8 butuh 3 + 8/4 = 5 mol O_2.

Substitusi: mengganti H dengan halogen

Alkana yang "malas" baru mau bereaksi dengan klorin atau bromin bila ada **cahaya** (ultraviolet) atau panas. Satu atom H diganti satu atom halogen, sehingga reaksi ini disebut **substitusi** (penggantian):

$$CH_4 + Cl_2 \xrightarrow{\text{cahaya}} CH_3Cl + HCl$$

Bila klorin berlebih, penggantian berlanjut menjadi CH_2Cl_2, $CHCl_3$ (kloroform), dan CCl_4. Hasilnya campuran, sehingga di industri reaksi ini diatur dengan perbandingan pereaksi yang cermat.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MEKANISME RADIKAL BEBAS

Substitusi alkana berlangsung lewat **radikal bebas** (atom atau gugus dengan elektron tak berpasangan, ditandai titik):

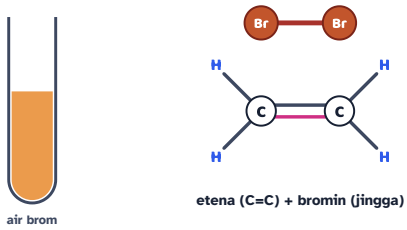
- **Inisiasi:** $\mathrm{Cl_2} \xrightarrow{\mathrm{UV}} 2\,\mathrm{Cl^\bullet}$ (pemutusan homolitik).
- **Propagasi:** $\mathrm{Cl^\bullet} + \mathrm{CH_4} \longrightarrow \mathrm{HCl} + \mathrm{CH_3^\bullet}$ lalu $\mathrm{CH_3^\bullet} + \mathrm{Cl_2} \longrightarrow \mathrm{CH_3Cl} + \mathrm{Cl^\bullet}$. Radikal Cl lahir kembali, sehingga satu foton bisa memicu ribuan reaksi: **reaksi berantai**.
- **Terminasi:** dua radikal bertemu, misalnya $\mathrm{CH_3^\bullet} + \mathrm{Cl^\bullet} \longrightarrow \mathrm{CH_3Cl}$ atau $2\,\mathrm{CH_3^\bullet} \longrightarrow \mathrm{C_2H_6}$ (etana sebagai hasil samping adalah bukti mekanisme ini).

Pada 25 °C, laju relatif penggantian H primer : sekunder : tersier oleh klorin ±1 : 3,8 : 5,0, karena radikal tersier paling stabil.

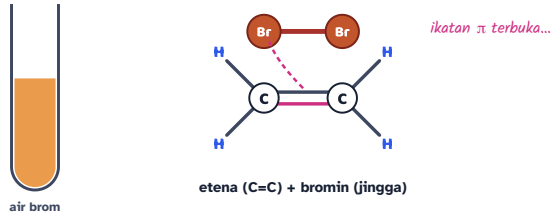
Adisi: ikatan rangkap membuka diri

Alkena dan alkuna punya ikatan π yang kaya elektron dan lebih lemah daripada ikatan σ. Ikatan π mudah terbuka sehingga dua atom baru bisa "menumpang". Reaksi penambahan tanpa ada atom yang lepas ini disebut **adisi**:

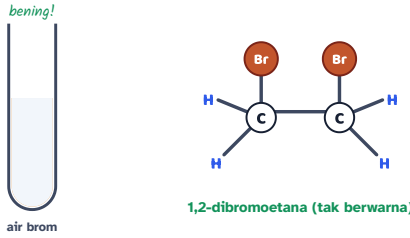
Pereaksi	Contoh reaksi	Kegunaan
Hidrogen (katalis Ni, panas)	$\mathrm{CH_2{=}CH_2 + H_2 \xrightarrow{Ni} CH_3{-}CH_3}$	hidrogenasi minyak nabati menjadi margarin
Bromin (air brom)	$\mathrm{CH_2{=}CH_2 + Br_2 \longrightarrow CH_2Br{-}CH_2Br}$	uji ikatan rangkap: warna jingga hilang
Hidrogen halida	$\mathrm{CH_2{=}CH{-}CH_3 + HBr \longrightarrow CH_3{-}CHBr{-}CH_3}$	membuat haloalkana
Air (katalis asam, panas)	$\mathrm{CH_2{=}CH_2 + H_2O \xrightarrow{H^+} CH_3{-}CH_2OH}$	membuat etanol industri



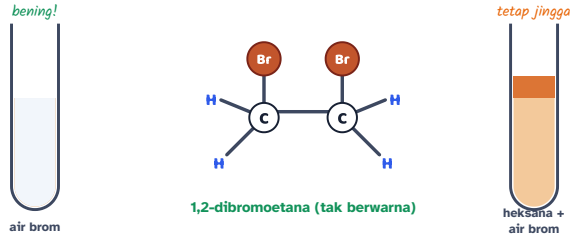
Langkah 1. Air brom berwarna jingga-cokelat karena molekul Br_2. Kita meneteskan etena (atau alkena lain) ke dalamnya.



Langkah 2. Molekul bromin mendekati ikatan rangkap yang kaya elektron. Ikatan π, yang lebih lemah, mulai terbuka...



Langkah 3. ...dan setiap atom C mengikat satu atom Br. Terbentuk 1,2-dibromoetana yang tak berwarna, sehingga warna jingga hilang. Tidak ada atom yang lepas: inilah ciri **adisi**.



Langkah 4. Heksana (alkana) dikocok dengan air brom dalam gelap: warna jingga **tidak hilang**, karena tidak ada ikatan π yang bisa dibuka. Bromin malah pindah ke lapisan heksana di atas, yang menjadi jingga tua. Uji cepat untuk membedakan alkana dari alkena!

ATURAN MARKOVNIKOV

Pada adisi HX ke alkena yang tidak simetris, atom H menempel pada karbon ikatan rangkap yang **sudah mengikat lebih banyak H**, sedangkan X menempel pada karbon yang lain. "Yang kaya makin kaya." Contoh: propena + HBr menghasilkan **2-bromopropana** sebagai produk utama, bukan 1-bromopropana.

Adisi juga bisa terjadi berulang-ulang antara molekul alkena sendiri: ribuan molekul etena bergandengan menjadi polietena (plastik kantong kresek). Reaksi **polimerisasi adisi** ini akan kita bahas di Bab 35.

32.5 Minyak bumi: dari sup purba ke tangki motor

Bahasa sederhana · Minyak bumi adalah "sup purba". Jutaan tahun lalu, makhluk laut mungil (plankton dan ganggang) mati dan mengendap di dasar laut bersama lumpur. Lapisan demi lapisan menimbunnya, tekanan dan panas bumi perlahan "memasaknya", dan sisa makhluk hidup itu berubah menjadi cairan hitam kental: minyak bumi dan gas alam.

Selama jutaan tahun, sisa organisme laut yang terkubur dalam batuan sedimen berubah menjadi **kerogen**. Pada suhu sekitar 60–120 °C kerogen terurai menjadi minyak bumi; pada suhu yang lebih tinggi terbentuk gas alam. Keduanya bergerak naik melalui batuan berpori sampai tertahan oleh lapisan batuan kedap (misalnya serpih) dan terkumpul sebagai **reservoir**. Minyak mentah adalah campuran ratusan hidrokarbon (alkana, sikloalkana, aromatik) dengan sedikit senyawa belerang, nitrogen, dan oksigen.

KIMIA NUSANTARA · DARI WONOCOLO SAMPAI CILACAP

Di Desa Wonocolo, Bojonegoro (Jawa Timur), warga masih menimba minyak dari sumur-sumur tua peninggalan zaman Belanda dengan tali dan mesin sederhana, sehingga kawasannya dijuluki "Texas van Java". Sebagian minyak itu disuling secara tradisional di dalam drum yang dipanaskan, cara yang berisiko kebakaran dan pencemaran. Minyak bumi skala besar diolah di **kilang**: Kilang Balikpapan (Kalimantan Timur) yang mulai beroperasi pada 1920-an, Kilang Dumai (Riau), dan Kilang Cilacap (Jawa Tengah) yang berkapasitas terbesar di Indonesia.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1885, **Aeilko Jans Zijlker**, seorang Belanda pengelola perkebunan tembakau, berhasil mengebor sumur minyak **Telaga Said** di Langkat, Sumatra Utara. Sumur itu menjadi tonggak awal industri minyak bumi di Indonesia, yang kemudian tumbuh ke Jawa, Kalimantan, dan Sumatra bagian tengah.

Distilasi bertingkat

Minyak mentah tidak bisa langsung dipakai. Di kilang, minyak dipanaskan dalam tungku sampai ±350–400 °C sehingga sebagian besar menguap, lalu uapnya dialirkan ke dasar **menara distilasi bertingkat**. Menara itu panas di bawah dan dingin di atas. Uap naik melewati sekat-sekat (*tray*); setiap komponen mengembun di ketinggian yang suhunya sedikit di bawah titik didihnya. Zat bertitik didih tinggi (rantai panjang) mengembun di bawah, zat bertitik didih rendah (rantai pendek) naik sampai ke atas. Campuran yang dipisahkan berdasarkan rentang titik didih disebut **fraksi**.

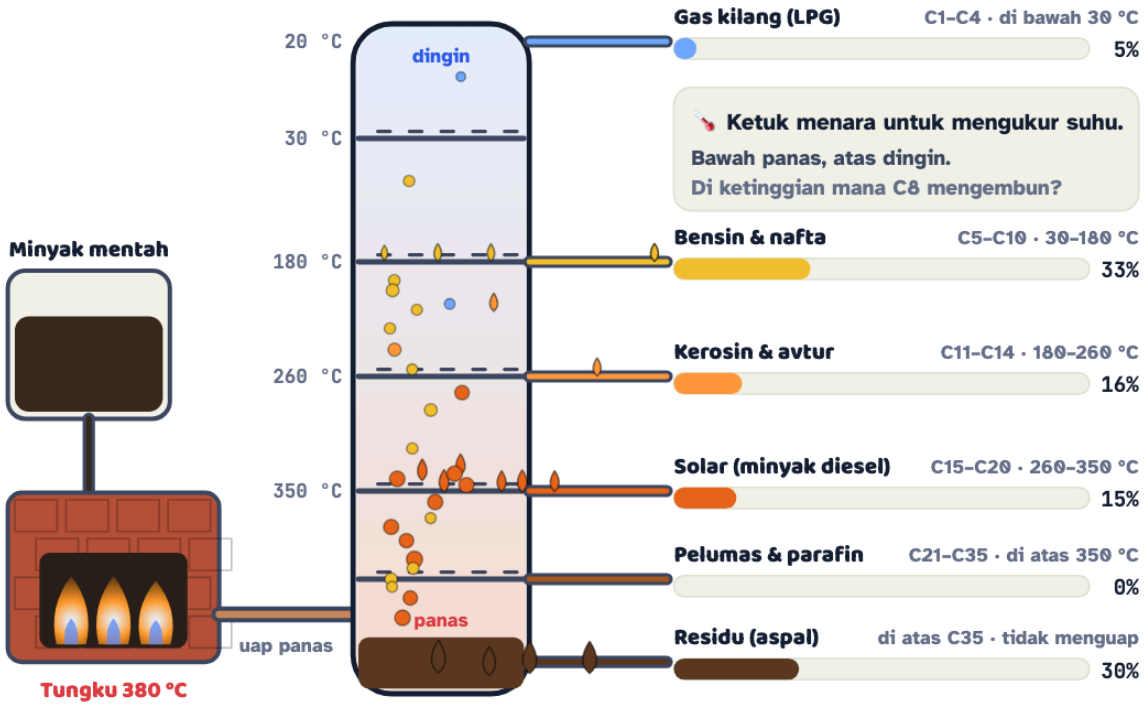
Fraksi	Jumlah C	Titik didih (± °C)	Kegunaan
Gas kilang	C1–C4	di bawah 30	LPG (propana + butana), bahan baku plastik
Bensin (gasolin) & nafta	C5–C10	30–180	bahan bakar motor dan mobil; nafta untuk industri petrokimia
Kerosin & avtur	C11–C14	180–260	bahan bakar pesawat jet, minyak tanah
Solar (minyak diesel)	C15–C20	260–350	truk, bus, kapal, kereta, genset
Minyak pelumas & parafin	C21–C35	di atas 350	oli mesin, lilin, krayon, vaselin
Residu	di atas C35	tidak menguap	aspal jalan, bahan bakar kapal

Rentang di atas adalah perkiraan; setiap kilang punya batas sendiri. Fraksi yang sangat berat tidak menguap pada ±400 °C dan malah terurai bila dipanaskan lebih tinggi, sehingga residu disuling ulang pada tekanan rendah

(**distilasi vakum**) agar titik didihnya turun.

LAB MINI Menara Distilasi: ke mana perginya setiap molekul?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-32



Gas	Bensin	Kerosin	Solar	Pelumas	Residu	Molekul diolah
5 %	33 %	16 %	15 %	0 %	30 %	73

Setiap bulatan adalah molekul alkana; warnanya menunjukkan fraksinya. Ketuk menara untuk mengukur suhu di ketinggian itu dan melihat alkana apa yang mengembun di sana. Coba turunkan **suhu tungku** ke 200 °C: apa yang terjadi pada bagian residu? Bandingkan juga minyak mentah ringan dan berat: mana yang menghasilkan bensin paling banyak?

BENSIN KURANG? POTONG RANTAINYA!

Permintaan bensin jauh lebih besar daripada jumlah bensin di minyak mentah. Kilang lalu memotong rantai panjang menjadi rantai pendek dengan panas dan katalis. Proses ini disebut **perengkahan** (*cracking*), dan selalu menghasilkan alkena sebagai bonus: $\mathrm{C_{16}H_{34}} \longrightarrow \mathrm{C_8H_{18}} + \mathrm{C_8H_{16}}$. Alkena itu (misalnya etena dan propena) menjadi bahan baku plastik.

Bilangan oktan

Tebak Dulu!

Motor bebek biasa yang dianjurkan memakai bensin oktan 90 diisi bensin oktan 98. Apa yang terjadi?

- Tenaganya naik hampir 10%, karena oktannya 8 angka lebih tinggi.
- Tenaganya hampir sama; oktan tinggi hanya berguna untuk mesin berkompresi tinggi.
- Mesinnya rusak, karena bensin oktan tinggi terlalu "keras".
- Bensinnya lebih cepat menguap, sehingga lebih boros.

Jawabannya: tenaganya hampir sama. Bilangan oktan bukan ukuran energi, melainkan ukuran **ketahanan bensin terhadap ketukan**. Energi yang dilepas per liter bensin oktan 90 dan 98 hampir sama. Oktan tinggi baru bermanfaat pada mesin yang memang dirancang dengan rasio kompresi tinggi.

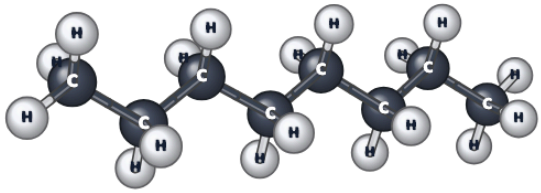
Di dalam silinder mesin, campuran uap bensin dan udara dimampatkan oleh piston, lalu dinyalakan oleh percikan busi. Bila bensin terlalu mudah terbakar, campuran itu bisa **meledak sendiri sebelum waktunya** karena panas pemampatan. Ledakan dini ini terdengar sebagai bunyi "tik-tik" logam yang disebut **ketukan** (*knocking*): tenaga terbuang dan mesin bisa rusak.

DEFINISI · BILANGAN OKTAN

Bilangan oktan adalah persen volume isooktana (2,2,4-trimetilpentana) dalam campuran isooktana dan n-heptana yang ketukannya sama dengan bensin yang diuji. Isooktana yang tahan ketukan diberi nilai **100**; n-heptana yang mudah mengetuk diberi nilai **0**. Bensin oktan 92 berperilaku seperti campuran 92% isooktana dan 8% n-heptana.

MOLEKUL 3D

Si pengetuk dan si tenang



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

n-Oktana C_8H_{18} Mr ≈ 114,23 PubChem ↗

Rantai lurus; justru mudah mengetuk (bilangan oktan sekitar –20).

n-Oktana dan isooktana sama-sama C_8H_{18}, tetapi oktannya berbeda jauh (±–20 vs 100). Perhatikan bentuknya: rantai lurus yang panjang lebih mudah "tersulut" sendiri, sedangkan molekul yang bercabang rapat lebih tahan. MTBE adalah zat aditif peningkat oktan.

RUMUS HIDUP

Bilangan oktan campuran

$$ON \approx \frac{V_A\,ON_A + V_B\,ON_B}{V_A + V_B}$$

Oktan campuran kira-kira sama dengan rata-rata oktan kedua bensin, ditimbang menurut volumenya.

- V_A Volume bensin A L
- ON_A Oktan bensin A
- V_B Volume bensin B L
- ON_B Oktan bensin B
- ON Oktan campuran

OKTAN CAMPURAN

92,7

setara bensin oktan 92

20 L oktan **90** + **10** L oktan **98** → **30** L campuran dengan oktan ≈ **92,7**.

Cek satuan: (L × oktan) ÷ L = oktan ✔ · perkiraan linear; campuran nyata bisa sedikit menyimpang

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-OKTAN-CAMPURAN

COBA SENDIRI

Meracik oktan 92

Sebuah bengkel punya 20 L bensin oktan 90. Berapa liter bensin oktan 98 yang harus ditambahkan agar campurannya beroktan 92? (Anggap pencampuran linear.)

1. Misalkan volume oktan 98 = V. Syarat: $\frac{20(90) + V(98)}{20 + V} = 92$.
2. $1800 + 98V = 1840 + 92V \rightarrow 6V = 40 \rightarrow V = 6{,}67$ L.
3. Cek: $\frac{1800 + 6{,}67 \times 98}{26{,}67} = \frac{2453{,}3}{26{,}67} = 92{,}0$ ✔

Perlu ±6,7 L bensin oktan 98. Coba buktikan dengan Rumus Hidup di atas!

Agar oktan naik, kilang memperbanyak alkana bercabang dan senyawa aromatik (lewat proses *reforming*), atau menambahkan zat aditif. Dulu dipakai **tetraetil timbal**, $\mathrm{Pb(C_2H_5)_4}$, yang ternyata meracuni udara dengan timbal; Indonesia menghentikan bensin bertimbal pada 2006. Kini dipakai aditif seperti MTBE atau etanol.

MITOS

"Bilangan oktan tinggi selalu memberi tenaga lebih besar di semua mesin."

FAKTA

Oktan mengukur ketahanan terhadap ketukan, bukan energi. Pakailah oktan sesuai anjuran pabrik mesin: lebih rendah bisa mengetuk, lebih tinggi tidak menambah tenaga.

MITOS

"Bensin oktan 92 berisi 92% oktana."

FAKTA

Bensin adalah campuran ratusan hidrokarbon. Angka 92 hanya berarti ketukannya **setara** campuran patokan 92% isooktana dan 8% n-heptana.

Dampak lingkungan

- **Gas rumah kaca:** pembakaran bahan bakar fosil melepas $\mathrm{CO_2}$ yang terkubur jutaan tahun, sehingga menghangatkan iklim (Bab 38).
- **Pencemar udara:** CO (beracun), jelaga dan partikel halus (penyakit paru), serta oksida nitrogen dan $\mathrm{SO_2}$ dari pengotor belerang (hujan asam).
- **Tumpahan minyak:** pada 2018, pipa minyak bawah laut yang patah mencemari Teluk Balikpapan dan merusak hutan bakau. Minyak yang mengapung menghalangi oksigen dan melapisi bulu burung serta insang ikan.

Solusinya beragam: **konverter katalitik** di knalpot mengubah gas beracun, $\mathrm{2\,CO + 2\,NO \longrightarrow 2\,CO_2 + N_2}$; bahan bakar rendah belerang; kendaraan listrik; dan **biosolar**, solar yang dicampur biodiesel dari minyak sawit (program B35, lalu B40).

32.6 Benzena dan senyawa aromatik

Benzena, $\mathrm{C_6H_6}$, adalah cincin enam atom karbon yang masing-masing mengikat satu atom H. Dari rumusnya (DBE = 4), benzena tampak sangat tak jenuh: satu cincin plus tiga ikatan rangkap. Anehnya, benzena **tidak** menghilangkan warna air brom dan enggan mengalami adisi. Ada yang istimewa!

TAMU DARI MASA LALU

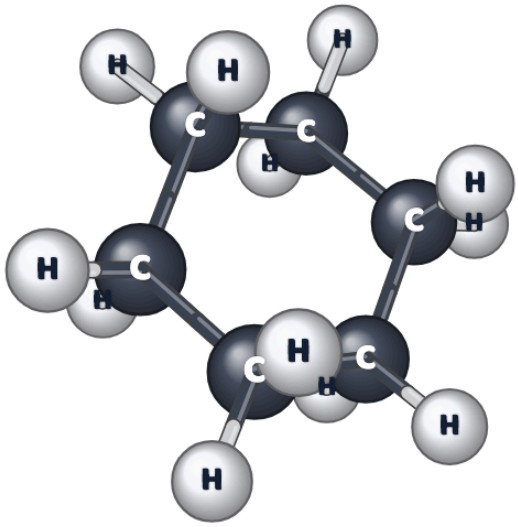
Michael Faraday menemukan benzena pada 1825 di dalam endapan minyak gas penerangan London. Strukturnya baru terpecahkan pada 1865 oleh **August Kekulé**. Menurut ceritanya sendiri, ia terkantuk-kantuk di depan perapian dan bermimpi melihat rantai atom menari seperti ular, lalu seekor ular menggigit ekornya sendiri. Ia terbangun dengan gagasan: rantai karbon benzena membentuk cincin!

Kekulé menggambar benzena dengan ikatan tunggal dan rangkap bergantian. Namun pengukuran menunjukkan bahwa keenam ikatan C–C benzena **sama panjang**, ±139 pm, di antara panjang ikatan tunggal (154 pm) dan rangkap (134 pm). Enam elektron π tidak menetap di tiga ikatan tertentu, tetapi **terdelokalisasi** mengelilingi

cincin seperti awan berbentuk donat di atas dan di bawah bidang cincin. Karena itu benzena sering digambar sebagai segi enam dengan lingkaran di dalamnya.

MOLEKUL 3D

Cincin karbon: kursi dan segi enam datar



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Sikloheksana C_6H_{12} Mr ≈ 84,16 PubChem ↗

Cincin enam karbon berbentuk kursi, bukan datar.

Putar sikloheksana dan lihat dari samping: cincinnya berbentuk **kursi**, bukan datar, sehingga sudut C–C–C tetap ±109,5°. Sekarang putar benzena: cincinnya datar sempurna dengan sudut 120°. Ukur keenam ikatan C–C benzena; apakah ada yang lebih pendek?

Delokalisasi membuat cincin benzena sangat stabil. Benzena lebih suka **substitusi** (mengganti H, cincinnya utuh) daripada adisi (merusak cincin), misalnya dengan bromin dan katalis besi(III) bromida:

$$C_6H_6 + Br_2 \xrightarrow{FeBr_3} C_6H_5Br + HBr$$

Turunan benzena disebut **senyawa aromatik**, karena banyak di antaranya berbau harum. Contohnya toluena (metilbenzena, pelarut cat), naftalena (dua cincin), dan stirena (bahan styrofoam). Campuran benzena, toluena, dan xilena (BTX) dihasilkan kilang dari nafta dan menjadi bahan baku serat poliester, plastik, dan obat.

KAPUR BARUS YANG BUKAN DARI BARUS

Nama "kapur barus" berasal dari Barus, bandar kuno di pesisir barat Sumatra Utara yang sejak lama terkenal sebagai pengekspor kamper dari pohon kapur. Kapur barus yang dijual sekarang untuk mengusir ngengat di lemari umumnya bukan kamper alami, melainkan senyawa aromatik seperti naftalena. Simpan jauh dari jangkauan anak-anak dan jangan dimakan.

AWAS JEBAKAN

Jangan menyebut benzena "sikloheksatriena" yang ikatan rangkapnya meloncat-loncat. Elektron π-nya terdelokalisasi permanen, bukan bergantian cepat. Ingat juga keselamatannya: benzena bersifat **karsinogen** (pemicu kanker), dan menghirup uap pelarut atau lem (toluena) sangat merusak otak dan saraf. Pelarut organik hanya digunakan di ruang berventilasi baik.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BUKTI ENERGI, KONFORMASI, DAN ISOMER OPTIK

Energi stabilisasi benzena. Hidrogenasi sikloheksena (satu C=C) melepas ΔH = −120 kJ/mol. Bila benzena benar-benar punya tiga C=C terpisah, hidrogenasinya akan melepas 3 × (−120) = −360 kJ/mol. Kenyataannya hanya −208 kJ/mol. Selisih ±150 kJ/mol adalah **energi delokalisasi** (resonansi): benzena lebih stabil daripada struktur Kekulé.

Konformasi. Karena ikatan tunggal bisa berputar, etana punya bentuk *goyang* (staggered, H saling berselang) dan *gerhana* (eclipsed, H saling menutupi) yang selisih energinya ±12 kJ/mol. Sikloheksana nyaman dalam bentuk **kursi**, dengan H aksial (tegak) dan ekuatorial (mendatar).

Isomer optik. Atom C yang mengikat **empat gugus berbeda** disebut C kiral. Molekulnya punya pasangan bayangan cermin yang tidak bisa ditumpuk, seperti tangan kiri dan kanan. Alkana kiral terkecil punya 7 atom C, misalnya 3-metilheksana: C-3 mengikat H, metil, etil, dan propil. Perakit Alkana menandai C kiral dengan bintang (*).

Kimia di sekitarmu

LPG 3 kg

Campuran propana dan butana yang dicairkan dengan tekanan. Gas aslinya tidak berbau; zat merkaptan ditambahkan supaya kebocoran tercium.

Lilin parafin

Alkana C20–C40 yang padat. Saat lilin menyala, parafin meleleh, naik lewat sumbu, menguap, lalu terbakar.

Aspal jalan

Residu paling berat dari distilasi minyak bumi, dicampur kerikil untuk melapisi jalan raya dari Sabang sampai Merauke.

Pemeraman buah

Etena, alkena paling sederhana, adalah hormon pematang buah. Pisang di gudang pedagang dimatangkan dengan mengatur kadar etena.

Avtur

Fraksi kerosin yang dimurnikan untuk pesawat jet. Titik bekunya harus sangat rendah karena di ketinggian 10 km suhu udara ±−50 °C.

Biosolar

Solar yang dicampur biodiesel dari minyak sawit. Indonesia mewajibkan campuran ini untuk mengurangi impor solar dan emisi karbon.

Cek Cepat

Nama IUPAC $CH_3-CH_2-CH(CH_3)-CH_3$ adalah ...

- 3-metilbutana
- 2-metilbutana
- pentana
- 2-etilpropana

Zat manakah yang dapat menghilangkan warna jingga air brom?

- heksana
- sikloheksana
- metana
- 1-heksena

Bensin beroktan 98 berarti bensin itu ...

- ketahanan ketukannya setara campuran 98% isooktana dan 2% n-heptana
- mengandung 98% oktana
- memberi tenaga 98% lebih besar
- mendidih pada suhu 98 °C

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: kembar butana dan rahasia nyala lilin

Bahan: plastisin dua warna (gelap untuk C, terang untuk H), tusuk gigi, lilin di atas piring keramik, korek api, sendok logam, penjepit jemuran kayu atau serbet tebal, segelas air.

1. Bentuk 4 bola gelap (C) dan 10 bola kecil terang (H). Rakit **butana**: empat C berderet, lalu lengkapi setiap C sampai punya 4 tusuk gigi.
2. Bongkar, lalu rakit **isobutana**: tiga C mengelilingi satu C pusat. Hitung lagi: apakah rumusnya tetap C_4H_{10}? Gulirkan kedua model di meja: mana yang lebih bulat?
3. Bersama orang dewasa, nyalakan lilin di atas piring. Amati warnanya: biru di bagian bawah dekat sumbu, kuning terang di atasnya.
4. Jepit gagang sendok dengan penjepit jemuran. Tahan bagian cekungnya di **nyala kuning** selama 3 detik, lalu angkat dan biarkan dingin. Ulangi di dekat bagian **biru** bawah dengan sendok yang bersih.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa, ikat rambut panjang, jauhkan kertas dan kain dari api, dan jangan meninggalkan lilin menyala. Sendok cepat panas: selalu pegang dengan penjepit atau serbet dan tunggu dingin sebelum disentuh. Siapkan segelas air di dekatmu. Tusuk gigi tajam, dan plastisin jangan dimasukkan ke mulut. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Bagian nyala mana yang meninggalkan jelaga hitam di sendok? Apa artinya tentang kecukupan oksigen di bagian itu? Mengapa model isobutanamu lebih "bulat", dan bagaimana bentuk itu memengaruhi titik didihnya?

RINGKASAN KILAT — Bab 32 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **kekhasan atom karbon** dan membedakan atom C **primer, sekunder, tersier, dan kuarterner**
- memberi **nama IUPAC** alkana, alkena, dan alkuna, serta menggambar strukturnya dari nama
- mengenali **isomer struktur** dan **isomer geometri (cis–trans)**, lalu menjelaskan pengaruhnya pada titik didih
- menuliskan reaksi **pembakaran, substitusi, dan adisi** yang setara dan menghitung kebutuhan oksigen
- menjelaskan **distilasi bertingkat minyak bumi**, **bilangan oktan**, dampak lingkungannya, dan keistimewaan **benzena**

Istilah kunci

kimia organik · Hidrokarbon · C primer · C sekunder · C tersier · C kuarterner · Alkana · Deret homolog · gaya London · gugus alkil · alkena · alkuna · Isomer · Isomer struktur · Isomer geometri · pembakaran sempurna

Rumus penting

$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2}$ $\quad M_r = 12n + (2n+2) = 14n + 2$

Rumus umum alkana. Setiap tambahan satu karbon membawa dua hidrogen, jadi Mr naik 14 setiap kali rantai bertambah satu gugus CH_2.

$$DBE = \frac{2C + 2 - H}{2}$$

Derajat ketidakjenuhan. Bandingkan jumlah H molekulmu dengan alkana yang jumlah C-nya sama; setiap kekurangan dua H berarti satu ikatan π atau satu cincin.

$$n_{O_2} = x + \frac{y}{4}$$

Oksigen untuk pembakaran sempurna. Setiap atom C butuh satu molekul O_2 untuk menjadi CO_2, dan setiap empat atom H butuh satu molekul O_2 untuk menjadi dua H_2O.

$$ON \approx \frac{V_A\,ON_A + V_B\,ON_B}{V_A + V_B}$$

Bilangan oktan campuran. Oktan campuran kira-kira sama dengan rata-rata oktan kedua bensin, ditimbang menurut volumenya.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Saat alkana mendidih, yang putus adalah gaya antarmolekul (gaya London), bukan ikatan kovalen C–C atau C–H di dalam molekul.
- Karbon monoksida tidak berwarna dan tidak berbau, tetapi mengikat hemoglobin darah ±200 kali lebih kuat daripada oksigen.
- Jangan menyebut benzena "sikloheksatriena" yang ikatan rangkapnya meloncat-loncat.

⛰ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=32

Teka-teki untuk Bab 33

Etanol dan dimetil eter punya rumus molekul yang sama, $\mathrm{C_2H_6O}$. Yang satu ada di minuman (tetapi berbahaya bagi tubuh), yang lain dipakai sebagai bahan bakar dan pendorong semprotan aerosol. Etanol mendidih pada 78 °C, dimetil eter pada –24 °C. Apa bedanya?

▼ **Intip petunjuk**

Keduanya isomer, tetapi atom O-nya "berwajah" berbeda. Pada etanol, O mengikat sebuah H (gugus –OH) sehingga molekulnya bisa membentuk ikatan hidrogen; pada dimetil eter, O diapit dua karbon (C–O–C). Kelompok atom yang menentukan sifat seperti ini disebut **gugus fungsi**, tokoh utama Bab 33.

33 Gugus Fungsi: Wajah Molekul di Balik Aroma Nusantara

Cengkeh, kayu manis, pisang ambon, dan cuka baunya sangat berbeda, padahal semuanya dirangkai dari karbon, hidrogen, dan oksigen saja. Rahasianya ada pada segelintir atom yang menjadi "wajah" sebuah molekul: gugus fungsi.

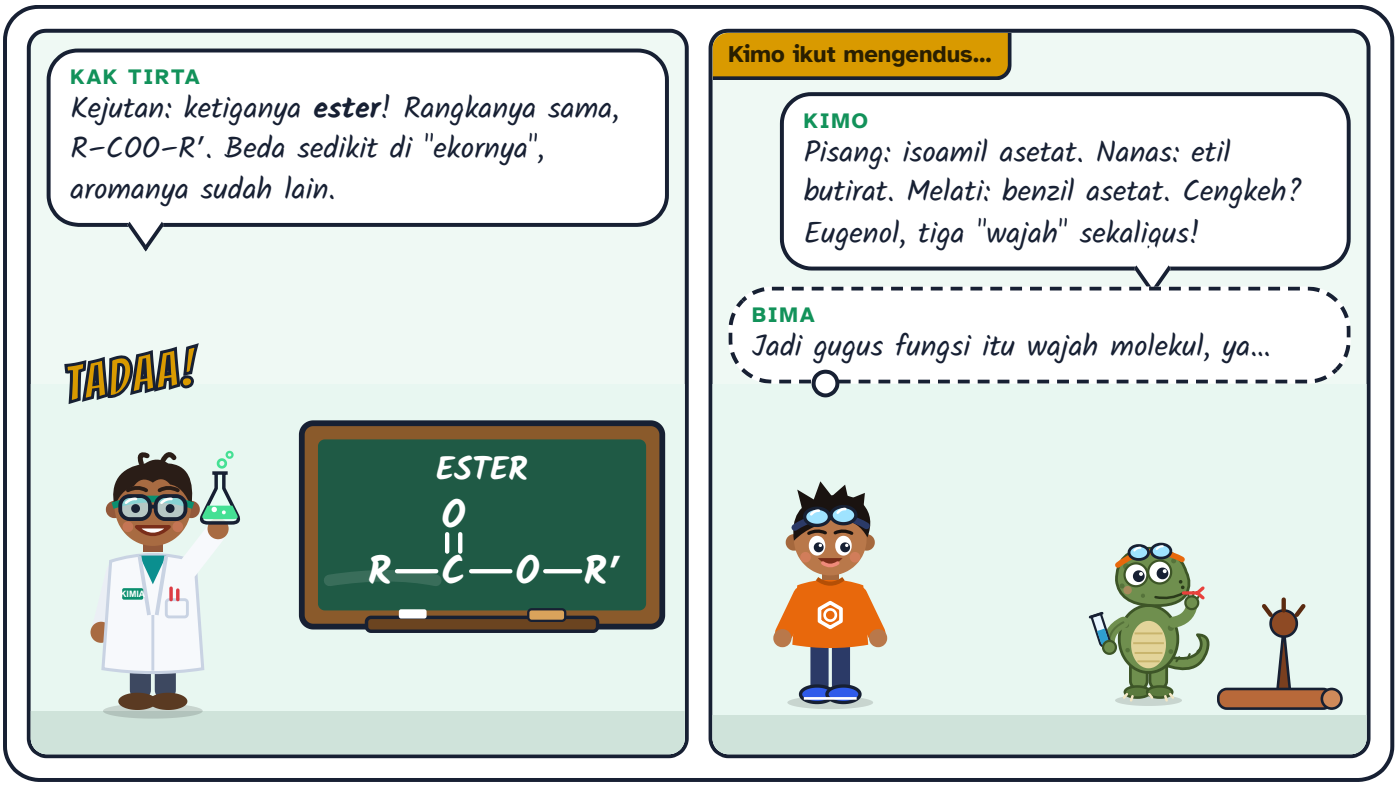
Setelah bab ini, kamu bisa

- mengenali **gugus fungsi** utama (hidroksil, eter, karbonil, karboksil, ester, halo, amino, amida) beserta rumus umum **deret homolog**-nya;
- memberi **nama IUPAC** alkanol, alkoksialkana, alkanal, alkanon, asam alkanoat, alkil alkanoat, haloalkana, amina, dan amida sederhana;
- menjelaskan perbedaan **titik didih dan kelarutan** dengan ikatan hidrogen, serta mengenali **isomer fungsi**;
- membedakan golongan senyawa dengan **uji Tollens, Fehling, dikromat**, soda kue, dan iodoform;
- menuliskan reaksi **esterifikasi** dan **saponifikasi**, lalu menemukan gugus fungsi pada **molekul rempah Nusantara**.

PASAR AROMA

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Etanol, C_2H_5OH, punya gugus –OH seperti natrium hidroksida, $NaOH$. Bila etanol dilarutkan dalam air, larutannya bersifat...

- Basa kuat, karena ada gugus OH seperti pada NaOH.
- Basa lemah, karena hanya sebagian OH yang lepas.
- Netral, karena –OH pada etanol tidak lepas sebagai ion OH^-.
- Asam kuat, karena etanol menyengat di kulit.

Jawabannya: netral. Pada NaOH, ion OH^- terikat secara *ionik* pada Na^+, sehingga lepas begitu larut. Pada etanol, –OH terikat *kovalen* pada atom karbon dan tidak terlepas menjadi ion. Coba cek sendiri dengan kertas lakmus atau air kubis ungu: alkohol pembersih tidak mengubah warnanya. Rumus yang mirip belum tentu sifatnya mirip!

33.1 Gugus fungsi: "wajah" sebuah molekul

Di Bab 32 kamu berkenalan dengan **hidrokarbon**, molekul yang hanya berisi C dan H. Rangka C–H itu "pendiam": tidak larut dalam air, nyaris tidak berbau tajam, dan reaksinya sedikit. Tetapi begitu satu atom H diganti sekelompok atom lain, sifatnya berubah drastis. Etana adalah gas tak berbau. Ganti satu H-nya dengan –OH,

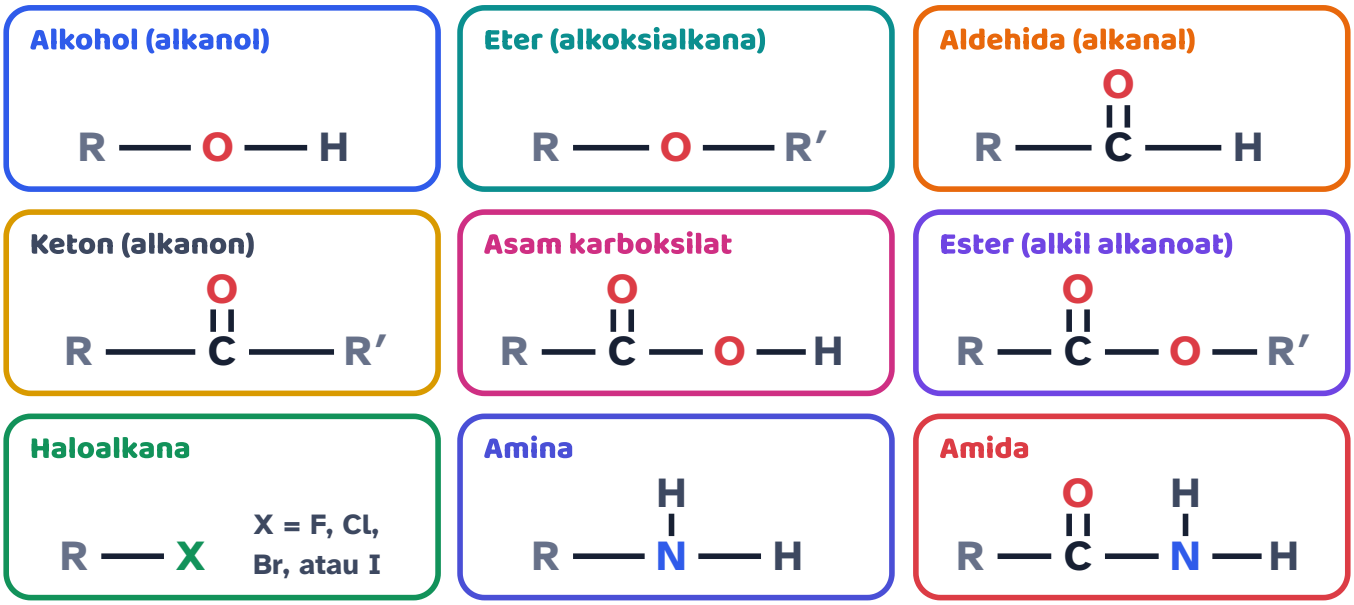
jadilah etanol: cairan yang bercampur sempurna dengan air dan ada di tapai. Ganti dengan –COOH, jadilah asam asetat yang membuat cuka terasa masam.

Bahasa sederhana · Bayangkan wayang kulit. Badan banyak wayang hampir sama, tetapi dari **wajahnya** penonton langsung tahu: ini Arjuna, itu Bima, yang ini Semar. Molekul organik juga begitu. "Badannya" rantai karbon, "wajahnya" sekelompok kecil atom yang disebut gugus fungsi. Wajah itulah yang menentukan bau, rasa, dan sifat molekul.

DEFINISI · GUGUS FUNGSI & DERET HOMOLOG

Gugus fungsi adalah atom atau kelompok atom dalam molekul organik yang menentukan sifat khas dan reaksi senyawa itu. Senyawa dengan gugus fungsi yang sama membentuk satu golongan, misalnya golongan alkohol. Anggota satu golongan yang berurutan hanya berbeda satu gugus –CH_2– (Mr berbeda 14) dan disebut **deret homolog**. Mereka punya **rumus umum** yang sama, sifat kimia yang mirip, dan sifat fisika (misalnya titik didih) yang berubah bertahap.

Kimiawan menulis bagian rangka yang "tidak penting" sebagai **R** (singkatan dari *radikal* atau *rest*, yaitu gugus alkil seperti $CH_3{}^-$ atau $C_2H_5{}^-$). Jadi semua alkohol dapat ditulis $R{-}OH$. Inilah sembilan wajah yang paling sering kamu temui:



Sembilan "wajah" molekul organik. R dan R′ adalah rangka hidrokarbon (gugus alkil); garis rangkap di atas C adalah ikatan rangkap C=O, yang disebut **gugus karbonil**.

Golongan	Gugus fungsi	Rumus umum	Tata nama IUPAC	Contoh (nama IUPAC · nama sehari-hari)
Alkohol	hidroksil, –OH	$R{-}OH$ $C_nH_{2n+2}O$	alkan**ol**	C_2H_5OH: etanol · alkohol tapai
Eter	oksi, –O–	$R{-}O{-}R'$ $C_nH_{2n+2}O$	**alkoksi**alkana	CH_3OCH_3: metoksimetana · dimetil eter

Aldehida	formil, –CHO	$\mathrm{R{-}CHO}$ $\mathrm{C_nH_{2n}O}$	alkan**al**	HCHO: metanal · formaldehida
Keton	karbonil, –CO–	$\mathrm{R{-}CO{-}R'}$ $\mathrm{C_nH_{2n}O}$	alkan**on**	$\mathrm{CH_3COCH_3}$: propanon · aseton
Asam karboksilat	karboksil, –COOH	$\mathrm{R{-}COOH}$ $\mathrm{C_nH_{2n}O_2}$	asam alkan**oat**	$\mathrm{CH_3COOH}$: asam etanoat · asam asetat (cuka)
Ester	–COO–	$\mathrm{R{-}COO{-}R'}$ $\mathrm{C_nH_{2n}O_2}$	**alkil** alkan**oat**	$\mathrm{CH_3COOC_2H_5}$: etil etanoat · etil asetat
Haloalkana	halo, –X	$\mathrm{R{-}X}$ $\mathrm{C_nH_{2n+1}X}$	**halo**alkana	$\mathrm{C_2H_5Cl}$: kloroetana · etil klorida
Amina (primer)	amino, –NH_2	$\mathrm{R{-}NH_2}$ $\mathrm{C_nH_{2n+3}N}$	alkan**amina**	$\mathrm{CH_3NH_2}$: metanamina · metilamina
Amida	–$CONH_2$	$\mathrm{R{-}CONH_2}$ $\mathrm{C_nH_{2n+1}NO}$	alkan**amida**	$\mathrm{CH_3CONH_2}$: etanamida · asetamida

✏️ **TRIK KAK TIRTA · "OL, AL, ON, OAT"**

Hafalkan akhiran nama sebagai lagu pendek: **-ol** (alkohol), **-al** (aldehida), **-on** (keton), **-oat** (asam & ester). Lalu perhatikan rumus umumnya: ternyata golongan-golongan ini **berpasangan**. Alkohol dan eter sama-sama $\mathrm{C_nH_{2n+2}O}$; aldehida dan keton sama-sama $\mathrm{C_nH_{2n}O}$; asam karboksilat dan ester sama-sama $\mathrm{C_nH_{2n}O_2}$. Pasangan yang rumus molekulnya sama tetapi gugus fungsinya beda disebut **isomer fungsi**.

Karena setiap anggota deret homolog bertambah satu –CH_2–, Mr-nya naik 14 secara teratur. Coba geser jumlah karbon dan "wajahnya" di bawah ini:

RUMUS HIDUP

Rumus umum dan Mr deret homolog

$$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2-2u}\mathrm{O}_x \quad \Rightarrow \quad M_r = 14n + 2 - 2u + 16x$$

Setiap tambahan satu gugus –CH₂– menambah Mr sebesar 14; jumlah atom O dan ikatan rangkap C=O menentukan 'keluarga' molekulnya.

- n Jumlah atom C
- u Ikatan rangkap (C=O atau C=C)
- x Jumlah atom O
- M_r Massa molekul relatif

MASSA MOLEKUL RELATIF

46

alkanol atau alkoksialkana (eter)

C₂H₆O: etanol atau dimetil eter

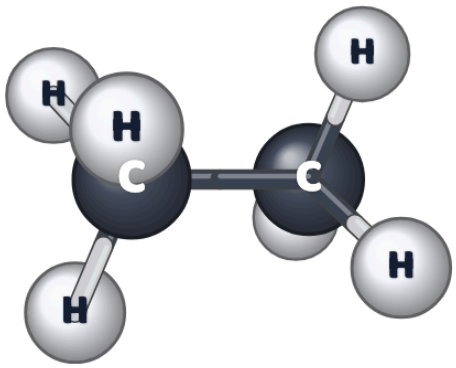
Rumus molekul: C**2** H**6** O**1** → Mr = **46**. Anggota berikutnya dalam deret (tambah –CH_2–): Mr **60**.

Cek satuan: tanpa satuan; massa molar = Mr dalam g/mol

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-DERET-HOMOLOG

MOLEKUL 3D

Satu rangka dua karbon, banyak wajah



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etana C_2H_6 Mr ≈ 30,07 PubChem ↗

Alkana dengan dua karbon; komponen gas alam.

Mulai dari etana, lalu ganti molekulnya satu per satu. Bagian mana yang berubah? Cari atom O (merah), N (biru), dan Cl (hijau): di situlah "wajah" setiap molekul. Ketuk dua atom untuk mengukur panjang ikatan C–O dan C=O. Mana yang lebih pendek?

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Rumus molekul yang sama belum tentu zat yang sama. C_2H_6O bisa etanol (cair, mendidih 78 °C) atau dimetil eter (gas, mendidih −24 °C). Karena itu kimia organik memakai **rumus struktur** (CH_3CH_2OH vs CH_3OCH_3), bukan hanya rumus molekul.

33.2 Alkohol & eter: saudara kembar beda sifat

Alkohol adalah senyawa dengan gugus hidroksil (–OH) yang terikat pada atom karbon jenuh. Yang paling terkenal adalah etanol: dihasilkan ragi saat membuat tapai, tuak, dan bioetanol, lalu dipakai di cairan pembersih tangan. Atom O pada –OH sangat elektronegatif, sehingga ikatan O–H sangat polar.

☆ **ATURAN · TATA NAMA ALKANOL (IUPAC)**

1. Pilih **rantai induk**: rantai karbon terpanjang yang mengikat gugus –OH.
2. Beri nomor dari ujung yang **paling dekat dengan –OH**.
3. Nama = (nomor & nama cabang) + nomor letak –OH + nama alkana dengan akhiran **-a** diganti **-ol**.

Contoh: $CH_3CH_2CH_2OH$ = 1-propanol; $CH_3CH(OH)CH_3$ = 2-propanol; $(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$ = 3-metil-1-butanol (alkohol isoamil, bahan aroma pisang). Penulisan IUPAC terbaru menaruh nomor di depan akhiran: propan-2-ol, 3-metilbutan-1-ol. Keduanya diterima di buku ini.

Alkohol digolongkan menurut atom C yang mengikat –OH. Pada **alkohol primer** atom C itu terikat pada satu atom C lain (1-propanol), pada **alkohol sekunder** pada dua atom C (2-propanol), dan pada **alkohol tersier** pada tiga atom C (2-metil-2-propanol). Penggolongan ini penting, sebab ketiganya bereaksi berbeda dengan oksidator.

CONTOH **Memberi nama alkohol dan eter**

Beri nama IUPAC dan golongkan: (a) $CH_3CH_2CH_2CH_2OH$; (b) $CH_3CH(OH)CH_2CH_3$; (c) $(CH_3)_3COH$; (d) $CH_3CH_2OCH_2CH_3$.

1. (a) Rantai 4 C, –OH di C-1: **1-butanol**. Atom C pengikat –OH hanya terikat pada satu C lain: alkohol **primer**.
2. (b) Rantai 4 C, –OH di C-2 (dinomori dari ujung terdekat): **2-butanol**, alkohol **sekunder**.
3. (c) Rantai induk 3 C, –OH dan satu metil di C-2: **2-metil-2-propanol**. Atom C-2 terikat pada tiga C: alkohol **tersier**.
4. (d) Tidak ada –OH; atom O diapit dua gugus etil: eter. Gugus yang lebih pendek (atau salah satu, bila sama) menjadi *alkoksi*: **etoksietana** (dietil eter).

(a) 1-butanol, primer · (b) 2-butanol, sekunder · (c) 2-metil-2-propanol, tersier · (d) etoksietana, sebuah eter. Keempatnya berumus $C_4H_{10}O$: semuanya isomer!

Eter punya atom O yang diapit dua gugus alkil, $R{-}O{-}R'$. Namanya disusun sebagai **alkoksialkana**: gugus alkil yang lebih pendek ditambah O menjadi awalan *alkoksi*. Contoh: $CH_3{-}O{-}CH_2CH_3$ adalah metoksietana. Nama umumnya menyebut kedua alkil lalu kata "eter": etil metil eter.

Tebak Dulu!

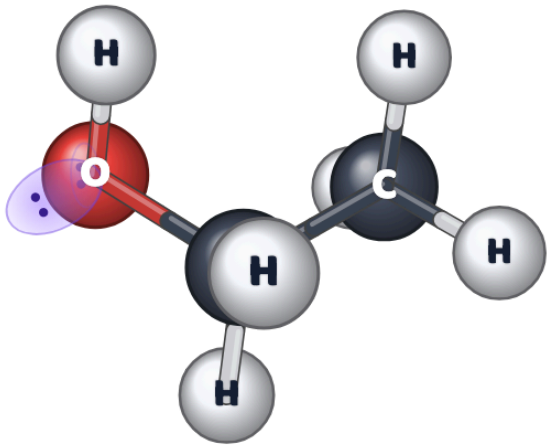
Etanol dan dimetil eter sama-sama C_2H_6O (Mr 46). Pada suhu kamar (±27 °C), wujud keduanya...

- Sama-sama cair, karena Mr-nya sama.
- Sama-sama gas, karena molekulnya kecil.
- Etanol cair, dimetil eter gas.
- Etanol gas, dimetil eter cair.

Jawabannya: etanol cair (mendidih 78 °C), dimetil eter gas (mendidih –24 °C). Selisihnya lebih dari 100 °C! Etanol punya atom H yang terikat langsung pada O, sehingga molekul-molekulnya saling bergandengan lewat **ikatan hidrogen** (Bab 13). Pada dimetil eter semua H terikat pada C, sehingga ikatan hidrogen antarmolekulnya tidak ada.

MOLEKUL 3D

Isomer: atomnya sama, susunannya beda



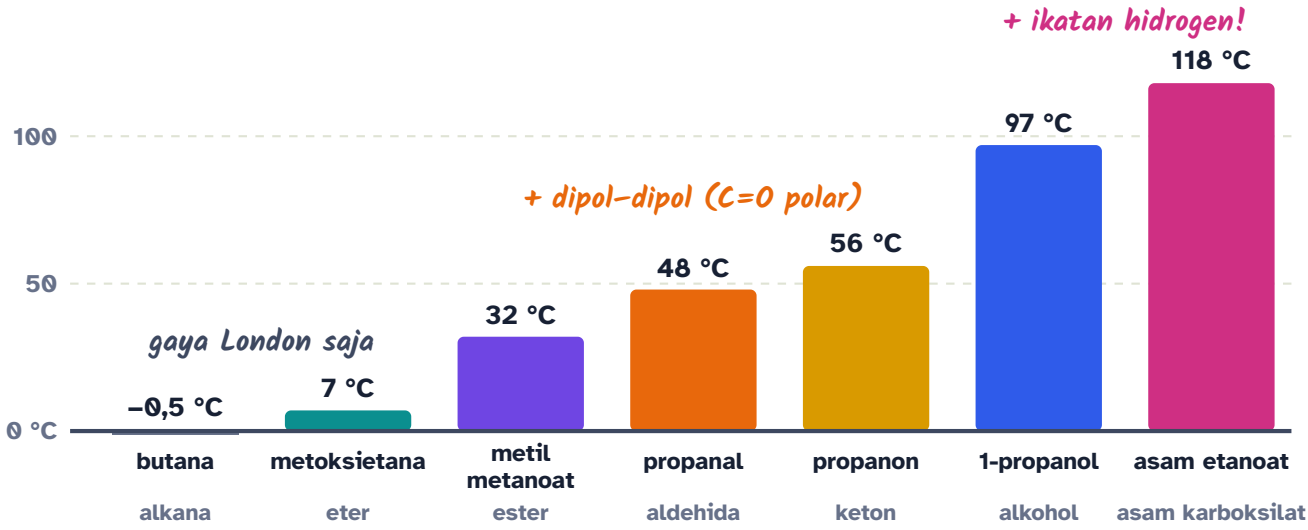
Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etanol C_2H_6O Mr ≈ 46,07 PubChem ↗

Alkohol pada tapai dan hand sanitizer; juga campuran bensin (bioetanol).

Bandingkan etanol dengan dimetil eter: hitung atomnya (sama!), lalu cari atom H yang menempel pada O. Hanya H seperti itu yang bisa membentuk ikatan hidrogen. Bandingkan juga 1-propanol dan 2-propanol: –OH berpindah dari ujung ke tengah. Ketuk C–O–C pada dimetil eter untuk mengukur sudutnya.

Ikatan hidrogen juga menjelaskan **kelarutan**. Metanol, etanol, dan propanol bercampur dengan air dalam perbandingan berapa pun, karena –OH-nya bisa bergandengan dengan molekul air. Makin panjang ekor hidrokarbonnya, makin "berminyak" molekulnya: kelarutan 1-butanol hanya ±7,7 g per 100 mL air, 1-pentanol ±2,2 g, dan 1-heksanol tinggal ±0,6 g.



Tujuh zat dengan Mr hampir sama (butana, propanal, propanon: 58; yang lain: 60), tetapi titik didihnya berbeda jauh. Yang menentukan adalah gugus fungsinya: tanpa gugus polar hanya ada gaya London; gugus C=O menambah gaya dipol–dipol; gugus O–H menambah ikatan hidrogen. Asam karboksilat paling tinggi karena dua molekulnya berpasangan lewat dua ikatan hidrogen (dimer).

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Alkohol **bukan basa**, walaupun rumusnya mengandung OH. Basa seperti NaOH melepas ion OH^- karena ikatannya ionik; gugus –OH alkohol terikat kovalen pada C dan tidak terlepas di dalam air. Larutan etanol dalam air bersifat netral (pH ±7).

MITOS

"Alkohol bersifat basa karena punya gugus OH."

FAKTA

–OH alkohol terikat kovalen pada karbon, jadi tidak melepas ion OH^-. Larutannya netral; uji dengan air kubis ungu, warnanya tetap ungu.

MITOS

"Alkohol 96% pasti lebih ampuh membunuh kuman daripada alkohol 70%."

FAKTA

Justru campuran ±70% lebih efektif. Air membantu alkohol merusak (mendenaturasi) protein kuman dan memperlambat penguapan, sehingga waktu kontaknya lebih lama.

Eter tidak punya H pada O, sehingga titik didihnya rendah dan mudah menguap. Dietil eter (etoksietana) mendidih pada 35 °C, sedikit di atas suhu tubuh, dan uapnya **sangat mudah terbakar**. Eter juga pelarut yang baik untuk zat organik, misalnya untuk mengekstrak minyak dari biji.

TAMU DARI MASA LALU · HARI ETER

Pada 16 Oktober 1846 di Boston, Amerika Serikat, dokter gigi **William Morton** memperagakan pembiusan dengan uap dietil eter dalam sebuah operasi pengangkatan benjolan di leher pasien. Pasien tidak merasakan sakit. Hari itu dikenang sebagai "Ether Day", awal anestesi modern. Kini dietil eter tidak dipakai lagi untuk membius karena mudah terbakar dan membuat mual; penggantinya adalah senyawa haloalkana dan eter berfluor yang lebih aman.

Mengenali alkohol dengan uji dikromat

Larutan kalium dikromat yang diasamkan, $\mathrm{K_2Cr_2O_7}$ + $\mathrm{H_2SO_4}$, berwarna **jingga**. Bila dipanaskan bersama alkohol primer atau sekunder, alkohol itu teroksidasi dan ion dikromat tereduksi menjadi ion $\mathrm{Cr^{3+}}$ yang berwarna **hijau**. Alkohol tersier tidak punya atom H pada karbon pengikat –OH, sehingga tidak teroksidasi: warnanya tetap jingga.

$$\text{alkohol primer} \xrightarrow{[\mathrm{O}]} \text{aldehida} \xrightarrow{[\mathrm{O}]} \text{asam karboksilat}$$

Perubahan jingga → hijau ini dulu dipakai pada alat uji napas pengemudi generasi awal: napas yang mengandung uap etanol membuat kristal dikromat berubah hijau. Mekanisme oksidasi alkohol dibahas lebih dalam di Bab 34.

KIMIA NUSANTARA · TUAK, TAPAI, DAN BAHAYA OPLOSAN

Ragi mengubah gula dalam nira, ketan, atau singkong menjadi etanol: $\mathrm{C_6H_{12}O_6} \xrightarrow{\text{ragi}} 2\,\mathrm{C_2H_5OH} + 2\,\mathrm{CO_2}$. Itulah yang terjadi pada tapai dan tuak. Etanol dalam jumlah kecil diolah tubuh, tetapi dalam jumlah besar tetap merusak hati dan otak.

Jauh lebih berbahaya adalah **metanol**, $\mathrm{CH_3OH}$, yang sering dicampurkan pada minuman keras oplosan karena murah. Hati mengubah metanol menjadi formaldehida lalu asam format, yang merusak saraf mata dan membuat darah terlalu asam. Sekitar 10 mL metanol murni dapat menyebabkan kebutaan permanen, dan sekitar 30 mL dapat mematikan orang dewasa. Kasus keracunan oplosan berulang kali memakan banyak korban jiwa di Indonesia. Metanol tidak bisa dibedakan dari etanol dengan bau atau rasa; hanya uji laboratorium yang bisa.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SPEKTRUM IR MEMBEDAKAN ISOMER FUNGSI

Bagaimana kimiawan membedakan etanol dan dimetil eter tanpa mencium atau mencicipinya? Dengan **spektroskopi inframerah (IR)**. Setiap ikatan bergetar pada frekuensi khas dan menyerap sinar IR pada bilangan gelombang tertentu:

- O–H alkohol: pita **lebar** di 3200–3600 cm^{-1} (lebar karena ikatan hidrogen).
- C=O aldehida, keton, asam, ester: pita **tajam dan kuat** di sekitar 1680–1750 cm^{-1}.
- O–H asam karboksilat: pita sangat lebar di 2500–3300 cm^{-1}.
- C–O alkohol, eter, ester: 1050–1300 cm^{-1}.

Spektrum etanol menunjukkan pita lebar O–H; spektrum dimetil eter tidak. Spektrum propanal dan propanon sama-sama punya pita C=O, sehingga untuk membedakannya dipakai uji kimia (subbab berikut) atau spektroskopi NMR (Bab 39).

33.3 Aldehida & keton: keluarga karbonil

Aldehida dan keton sama-sama punya **gugus karbonil**, C=O. Bedanya hanya letak: pada **aldehida** gugus karbonil berada di **ujung** rantai dan mengikat satu atom H (–CHO); pada **keton** gugus karbonil berada di **tengah** dan diapit dua atom C (–CO–).

Bahasa sederhana · Bayangkan gugus C=O sebagai lampu. Pada aldehida, lampunya dipasang di ujung tiang, mudah dijangkau, sehingga aldehida mudah bereaksi (mudah dioksidasi). Pada keton, lampunya terjepit di tengah, jadi keton lebih "tenang".

ATURAN · TATA NAMA ALKANAL & ALKANON

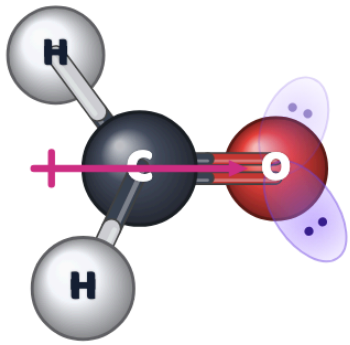
- **Alkanal**: rantai induk mengandung –CHO, dan atom C pada –CHO **selalu nomor 1** (tidak perlu ditulis). Akhiran -a diganti **-al**. CH_3CH_2CHO = propanal; $(CH_3)_2CHCHO$ = 2-metilpropanal.
- **Alkanon**: rantai induk mengandung C=O, dinomori dari ujung terdekat dengan C=O. Akhiran **-on**. $CH_3COCH_2CH_3$ = 2-butanon (butanon); $CH_3CH_2COCH_2CH_3$ = 3-pentanon. Pada propanon dan butanon nomornya boleh dihilangkan karena letaknya pasti.

AWAS JEBAKAN

Satu huruf saja bisa mengubah golongan! **Propanal** (CH_3CH_2CHO, aldehida), **propanol** ($CH_3CH_2CH_2OH$, alkohol), dan **propanon** (CH_3COCH_3, keton) adalah tiga zat berbeda. Propanal dan propanon adalah isomer fungsi (C_3H_6O), sedangkan propanol punya dua atom H lebih banyak (C_3H_8O).

Gugus C=O bersifat polar, tetapi aldehida dan keton tidak punya H pada O, sehingga molekulnya tidak bisa saling membentuk ikatan hidrogen. Akibatnya titik didihnya berada di antara alkana dan alkohol (lihat diagram di 33.2). Namun atom O karbonil bisa *menerima* ikatan hidrogen dari air, sehingga aldehida dan keton yang kecil larut baik dalam air. Aseton bahkan bercampur sempurna.

MOLEKUL 3D **Gugus karbonil yang polar**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Formaldehida CH_2O Mr ≈ 30,03 PubChem ↗

Segitiga datar. Larutannya (formalin) mengawetkan jenazah dan DILARANG untuk makanan.

Nyalakan panah dipol: ke mana arah tarikan elektron pada C=O? Ukur sudut di sekitar atom C karbonil (ketuk O, C, lalu atom ketiga). Sudutnya mendekati 120°, karena C karbonil berbentuk segitiga datar.

Dua keton dan aldehida terkenal di sekitar kita:

- **Formaldehida (metanal)**, $HCHO$: gas berbau menusuk. Larutannya dalam air (±37%) disebut **formalin**, dipakai untuk mengawetkan spesimen biologi dan jenazah, serta untuk membuat lem resin kayu lapis.
- **Aseton (propanon)**, CH_3COCH_3: pelarut penghapus cat kuku dan pengencer. Tubuh juga membuat sedikit aseton saat kekurangan gula (misalnya ketika berpuasa lama), sehingga napas bisa berbau "buah".

⚠ **AWAS JEBAKAN · FORMALIN BUKAN PENGAWET MAKANAN**

Formalin **dilarang** dipakai pada makanan; peraturan Menteri Kesehatan tentang bahan tambahan pangan memasukkannya ke daftar bahan terlarang. Formaldehida bereaksi dengan protein sehingga ikan dan tahu tampak "segar" lebih lama, tetapi zat itu beracun, merusak saluran cerna, dan bersifat karsinogen (pemicu kanker). Ciri yang sering disebut (tahu terlalu kenyal, ikan tidak dihinggapi lalat) tidak selalu pasti; cara yang tepat adalah uji dengan kit formalin seperti yang dipakai petugas BPOM.

Uji Tollens dan Fehling: aldehida "tertangkap basah"

Aldehida masih punya atom H pada karbon karbonil, sehingga mudah dioksidasi menjadi asam karboksilat. Artinya aldehida adalah **reduktor**: ia memberikan elektron kepada ion logam. Keton tidak punya H itu dan umumnya tidak bereaksi. Dua pereaksi klasik memanfaatkan perbedaan ini.

DEFINISI · PEREAKSI TOLLENS & FEHLING

Pereaksi Tollens adalah larutan ion kompleks diaminperak(I), $[Ag(NH_3)_2]^+$, dalam suasana basa. Aldehida mereduksi ion perak menjadi logam **Ag** yang melapisi dinding tabung sebagai **cermin perak**:

$$CH_3CHO + 2\,[Ag(NH_3)_2]^+ + 3\,OH^- \longrightarrow CH_3C$$

Pereaksi Fehling adalah larutan ion **Cu**$^{2+}$ (biru) dalam basa dengan ion tartrat. Aldehida alifatik mereduksinya menjadi **endapan merah bata tembaga(I) oksida**, Cu_2O:

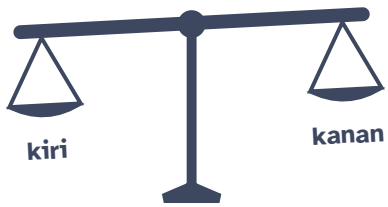
$$CH_3CHO + 2\,Cu^{2+} + 5\,OH^- \longrightarrow CH_3COO^- +$$

Pereaksi Benedict (ion tembaga dengan sitrat) bekerja serupa dan dipakai untuk menguji gula pereduksi seperti glukosa.

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi uji gugus fungsi**

− 1 + CH_3CHO + − 1 + Ag_2O → − 1 + CH_3COOH + − 1 + Ag

Unsur	Kiri	Kanan	
C	2 ●●	2 ●●	✓
H	4 ○○○○	4 ○○○○	✓
O	2 ●●	2 ●●	✓
Ag	2 ●●	1 ●	✗



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 4 null

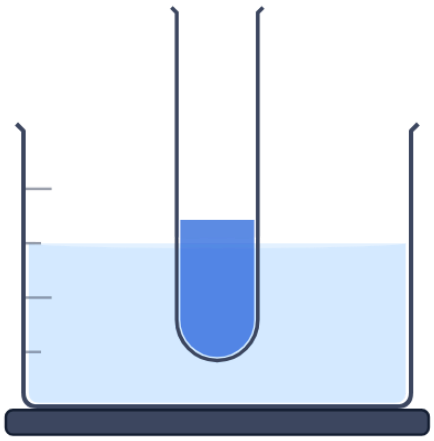
Mulai dari versi sederhana uji Tollens yang sering ditulis di buku sekolah (Ag_2O mewakili pereaksi Tollens), lalu versi ionnya, uji Fehling (Cu_2O merah bata), dan uji dikromat (jingga → hijau). Untuk persamaan ion, setarakan atom *dan* muatan. Petunjuk: hitung dulu berapa elektron yang dilepas aldehida atau alkohol, lalu berapa yang diterima ion logam.

LAB MINI Laboratorium Uji Gugus: Tollens, Fehling, dikromat, dan kawan-kawan

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-33

Etanal + Fehling

CH_3CHO



penangas air ±60 °C

Pereaksi: Cu^{2+} (biru) + tartrat dalam basa

Buku catatan Laras

	Tollens	Fehling	$Cr_2O_7^{2-}$	$NaHCO_3$	I_2/NaOH
Etanol	·	·	·	·	·
2-Propanol	·	·	·	·	·
2-Metil-2-propanol	·	·	·	·	·
Etanal	·	·	·	·	·
Benzaldehida	·	·	·	·	·
Propanon	·	·	·	·	·
Asam etanoat	·	·	·	·	·
Glukosa	·	·	·	·	·

+ positif – negatif · belum diuji

Pereaksi Fehling: Cu^{2+} (biru) + tartrat dalam basa. Tabung dipanaskan di penangas air, tidak langsung di atas api.

Hasil uji
tekan ▶

Golongan sampel
?

Pilih sampel dan pereaksi, lalu tekan ▶ Jalankan. Catat setiap hasil di buku catatan Laras (tabel kanan). Tantangan: dengan uji sesedikit mungkin, bedakan etanal dari propanon, lalu 2-propanol dari 2-metil-2-propanol. Mengapa benzaldehida memberi cermin perak tetapi tidak mengubah Fehling?

COBA SENDIRI

Detektif tiga botol C_3H_8O

Tiga botol tanpa label berisi zat A, B, dan C, ketiganya berumus C_3H_8O. A mendidih pada 7 °C dan tidak mengubah warna dikromat. B dioksidasi dikromat menjadi zat yang memberi endapan merah bata dengan Fehling. C dioksidasi menjadi zat yang tidak bereaksi dengan Tollens. Tentukan A, B, dan C.

1. Isomer C_3H_8O ada tiga: 1-propanol, 2-propanol, dan metoksietana (eter).
2. A: titik didih sangat rendah dan tidak teroksidasi → tidak punya –OH → **metoksietana**, $CH_3OCH_2CH_3$.
3. B: hasil oksidasinya positif Fehling, berarti aldehida (propanal). Aldehida berasal dari alkohol **primer** → **1-propanol**.
4. C: hasil oksidasinya bukan aldehida, berarti keton (propanon). Keton berasal dari alkohol **sekunder** → **2-propanol**.

A = metoksietana, B = 1-propanol (→ propanal), C = 2-propanol (→ propanon). Cek: hanya A yang tidak punya ikatan hidrogen, cocok dengan titik didihnya yang rendah. ✔

TAMU DARI MASA LALU · FEHLING DAN TOLLENS

Kimiawan Jerman **Hermann von Fehling** memperkenalkan larutan tembaga-tartratnya pada 1849 untuk mengukur kadar gula, misalnya pada urine penderita diabetes. Sekitar tahun 1880-an, **Bernhard Tollens** dari Göttingen memakai larutan amonia-perak untuk menguji gula dan aldehida. Cermin perak pada uji Tollens memakai reaksi yang sama dengan cara lama membuat cermin dan hiasan pohon Natal berlapis perak.

KESELAMATAN

Pereaksi Tollens harus dibuat segar sesaat sebelum dipakai dan sisanya segera dibuang sesuai petunjuk guru, karena bila disimpan dapat membentuk endapan perak yang mudah meledak. Pereaksi Fehling dan dikromat korosif, dan senyawa dikromat beracun: pakai kacamata pelindung serta sarung tangan, dan jangan membuang sisanya ke wastafel.

33.4 Asam karboksilat & ester: dari cuka ke aroma buah

Asam karboksilat punya gugus karboksil, –COOH: gabungan karbonil dan hidroksil pada satu atom C. Gabungan ini membuat H pada –OH bisa lepas sebagai H^+, jadi asam karboksilat benar-benar **asam**, walaupun asam lemah (Bab 26):

$$CH_3COOH\,(aq) \rightleftharpoons CH_3COO^-\,(aq) + H^+\,(aq) \qquad K$$

Namanya: **asam alkanoat**, dengan C pada –COOH sebagai nomor 1. Banyak asam punya nama dari asal-usulnya: asam format (metanoat) dari bahasa Latin *formica* = semut, karena ada pada sengatan semut rangrang; asam asetat (etanoat) dari *acetum* = cuka; asam butirat (butanoat) dari *butyrum* = mentega, karena memberi bau mentega tengik. Asam karboksilat berantai panjang disebut **asam lemak**, misalnya asam laurat (C12) yang banyak terdapat di minyak kelapa dan asam palmitat (C16) di minyak sawit.

Seperti asam lain, asam karboksilat bereaksi dengan basa dan **membuat soda kue berbuih**, karena melepas gas karbon dioksida:

$$CH_3COOH + NaHCO_3 \longrightarrow CH_3COONa + H_2O + C($$

Inilah uji sederhana untuk membedakan asam karboksilat dari alkohol: alkohol tidak membuat soda kue berbuih.

Ester terbentuk bila asam karboksilat bereaksi dengan alkohol. Ester-ester kecil adalah sumber aroma buah dan bunga. Namanya disusun seperti nama orang dengan "nama depan" dan "nama keluarga": **alkil** dari alkohol, lalu **alkanoat** dari asam.

> ✏️ **TRIK KAK TIRTA · MEMBACA NAMA ESTER**
>
> Potong ester tepat di atom O tunggal: CH_3CO–|–OCH_2CH_3. Bagian yang mengandung C=O berasal dari **asam** (di sini asam etanoat → *etanoat*). Bagian di seberang O berasal dari **alkohol** (etanol → *etil*). Nama ester selalu: **alkil dulu, -oat belakangan**: etil etanoat. Jangan terkecoh urutan penulisan rumus! $CH_3COOC_2H_5$ dan $C_2H_5OOCCH_3$ adalah zat yang sama.

Alkohol	Asam	Ester (nama IUPAC)	Rumus	Aroma
3-metil-1-butanol (isoamil)	etanoat	3-metilbutil etanoat (isoamil asetat)	$C_7H_{14}O_2$	🍌 pisang ambon
etanol	butanoat	etil butanoat (etil butirat)	$C_6H_{12}O_2$	🍍 nanas
metanol	butanoat	metil butanoat	$C_5H_{10}O_2$	🍎 apel
1-propanol	etanoat	propil etanoat	$C_5H_{10}O_2$	🍐 pir
1-oktanol	etanoat	oktil etanoat	$C_{10}H_{20}O_2$	🍊 jeruk

benzil alkohol	etanoat	benzil etanoat (benzil asetat)	$C_9H_{10}O_2$	melati
metanol	2-hidroksibenzoat (salisilat)	metil salisilat	$C_8H_8O_3$	minyak gosok (gandapura)

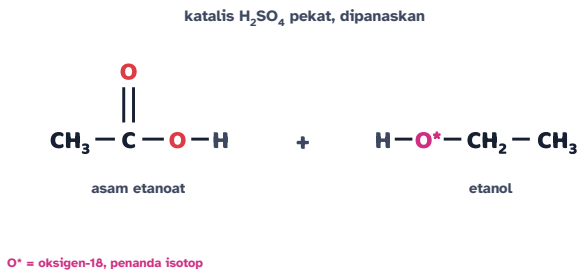
Esterifikasi: alkohol dan asam bergandengan

HUKUM · REAKSI ESTERIFIKASI

Asam karboksilat + alkohol ⇌ ester + air, dengan katalis asam sulfat pekat dan pemanasan:

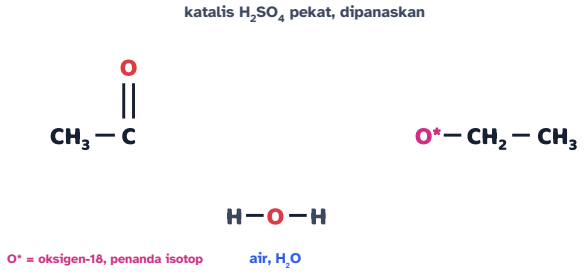
$$CH_3COOH + C_2H_5OH \overset{H_2SO_4}{\rightleftharpoons} CH_3COOC_2H_5 + H_2O$$

Reaksinya **lambat** tanpa katalis dan **bolak-balik** (reversibel): air dapat memecah ester kembali menjadi asam dan alkohol (hidrolisis). Asam sulfat pekat berperan ganda: mempercepat reaksi dan menyerap air sehingga kesetimbangan bergeser ke arah ester.



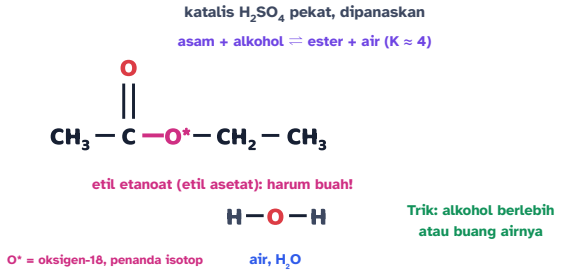
Langkah 1. Pereaksi: asam etanoat dan etanol, ditambah beberapa tetes H_2SO_4 pekat lalu dipanaskan. Atom O pada etanol ditandai O* (isotop oksigen-18) agar bisa dilacak.

Langkah 2. Yang akan lepas: gugus **–OH dari asam** dan atom **H dari gugus –OH alkohol**, bukan sebaliknya!



Langkah 3. –OH dan H bergabung menjadi air, H_2O. Buktinya: atom O* tidak pernah ditemukan di dalam air.

Langkah 4. Atom O* dari etanol tersambung ke atom C karbonil. Terbentuk ester **etil etanoat** yang beraroma buah, dan O* ikut di dalamnya.



Langkah 5. Reaksinya bolak-balik dengan $K \approx 4$. Dari 1 mol asam dan 1 mol alkohol hanya ±2/3 mol ester yang terbentuk. Supaya rendemen naik: pakai alkohol berlebih atau singkirkan airnya (asas Le Chatelier, Bab 22).

LAB MINI

Pabrik Aroma: racik ester sendiri

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-33

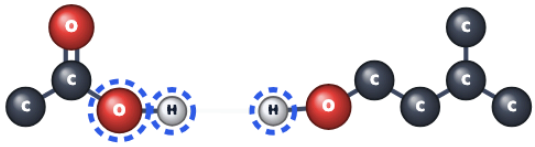


asam karboksilat + alkohol ⇌ ester + air

Katalis H_2SO_4 pekat menyala · dipanaskan

?

Aroma:
panaskan dulu, lalu cium!



$$CH_3COOH + (CH_3)_2CHCH_2CH_2OH \rightleftharpoons CH_3COOCH_2CH_2CH(CH_3)_2 + H_2O$$

asam etanoat + 3-metil-1-butanol ⇌ 3-metilbutil etanoat + air

rendemen 0% (setimbang 67%)

Ester	Rumus	Mr	Aroma
3-metilbutil etanoat	$C_7H_{14}O_2$	130	? (panaskan dulu)

Rendemen setimbang
67 %

Pilih satu alkohol dan satu asam karboksilat, nyalakan katalis, lalu tekan ▶ Jalankan. Perhatikan atom yang lepas menjadi air. Coba buat aroma pisang, nanas, apel, jeruk, melati, mawar, dan minyak gosok! Apa yang terjadi bila katalis H_2SO_4 dimatikan? Geser juga perbandingan mol alkohol : asam dan lihat rendemen setimbangnya.

KERJAKAN BERSAMA

Menamai ester aroma pisang

Esens pisang dibuat dari 3-metil-1-butanol, $(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$, dan asam etanoat. Tuliskan rumus struktur ringkas ester itu, nama IUPAC-nya, rumus molekul, dan Mr-nya. (Ar C = 12, H = 1, O = 16)

1. Gabungkan: $CH_3CO–$ dari asam + $–OCH_2CH_2CH(CH_3)_2$ dari alkohol (alkohol kehilangan H, asam kehilangan –OH).
2. Rumus struktur: $CH_3COOCH_2CH_2CH(CH_3)_2$.
3. Nama: alkil dari alkohol = 3-metilbutil; dari asam = etanoat → **3-metilbutil etanoat** (isoamil asetat).
4. Rumus molekul: $C_2H_4O_2 + C_5H_{12}O - H_2O = C_7H_{14}O_2$; Mr $= 7(12) + 14(1) + 2(16) = 130$.

3-metilbutil etanoat, $C_7H_{14}O_2$, Mr 130. Lucunya, alkohol isoamilnya berbau tajam tidak enak dan asam etanoatnya berbau cuka, tetapi esternya harum pisang!

Karena reaksinya setimbang, ester yang diperoleh tidak pernah 100%. Perbandingan hasil nyata dengan hasil teoretis disebut **rendemen** (Bab 18):

RUMUS HIDUP

Rendemen esterifikasi

$$\%\,\text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{\dfrac{m_{\text{asam}}}{M_{r,\text{asam}}} \times M_{r,\text{ester}}} \times 100\%$$

Bandingkan ester yang benar-benar kamu tampung dengan ester yang seharusnya terbentuk bila semua asam (pereaksi pembatas) berubah menjadi ester.

- m_{asam} Massa asam karboksilat `g`
- $M_{r,\text{asam}}$ Mr asam `g/mol`
- $M_{r,\text{ester}}$ Mr ester `g/mol`
- m_{nyata} Ester yang diperoleh `g`
- % Rendemen `%`

RENDEMEN

75

%

Ester teoretis = **8,8** g; kamu memperoleh **6,6** g, jadi rendemennya **75**%.

Cek satuan: (g) ÷ (g/mol) × (g/mol) = g; g ÷ g × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-RENDEMEN-ESTER

KERJAKAN BERSAMA

Rendemen etil asetat di laboratorium sekolah

Laras mereaksikan 15 g asam asetat (Mr 60) dengan etanol berlebih dan beberapa tetes H_2SO_4 pekat. Setelah dimurnikan, ia memperoleh 14,3 g etil asetat (Mr 88). Hitung rendemennya.

1. Mol asam (pereaksi pembatas): $n = 15/60 = 0{,}25$ mol.
2. Perbandingan koefisien asam : ester = 1 : 1, jadi ester teoretis = 0,25 mol × 88 g/mol = 22 g.
3. Rendemen $= \dfrac{14{,}3}{22} \times 100\% = 65\%$.

Rendemen 65%, wajar untuk reaksi setimbang. Sebagian ester juga hilang saat dicuci dan dipisahkan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ESTERIFIKASI FISCHER DAN BUKTI ISOTOP

Reaksi asam karboksilat dengan alkohol berkatalis asam dikenal sebagai **esterifikasi Fischer** (Emil Fischer dan Arthur Speier, 1895). Mekanismenya adalah **substitusi nukleofilik asil**: (1) $\mathrm{H^+}$ memprotonasi O karbonil sehingga C karbonil makin positif; (2) atom O alkohol, yang punya pasangan elektron bebas, menyerang C karbonil (nukleofil); (3) terbentuk zat antara tetrahedral; (4) proton berpindah dan $\mathrm{H_2O}$ lepas; (5) $\mathrm{H^+}$ dilepas kembali, jadi katalis tidak habis.

Pada akhir 1930-an, Irving Roberts dan Harold Urey memakai alkohol yang atom O-nya isotop $^{18}\mathrm{O}$. Ternyata $^{18}\mathrm{O}$ selalu ditemukan di dalam ester, bukan di air. Ini membuktikan bahwa ikatan C–OH asam yang putus, sesuai langkah (4).

Rendemen setimbang dapat dihitung dari K. Bila 1 mol asam dicampur r mol alkohol dan x mol ester terbentuk:

RUMUS HIDUP

Rendemen setimbang esterifikasi

$$K = \frac{x^2}{(1-x)(r-x)}$$

Satu mol asam dicampur r mol alkohol. Saat setimbang, x mol ester terbentuk; makin banyak alkohol, makin besar x.

- r — Mol alkohol per mol asam `mol`
- K — Tetapan kesetimbangan
- rendemen — Rendemen terhadap pereaksi pembatas %

RENDEMEN TERHADAP PEREAKSI PEMBATAS

66,7

%

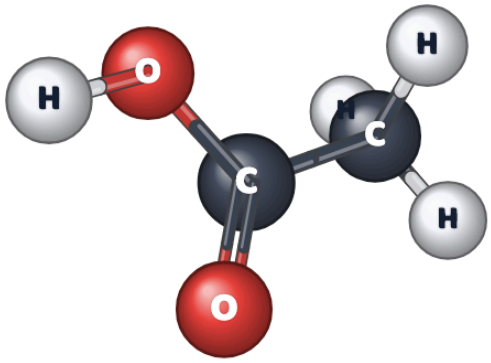
1 : 1 dan K = 4 → tepat 2/3 ≈ 66,7%

Ester saat setimbang: x = **0,667** mol dari 1 mol asam dan **1** mol alkohol.

Cek satuan: mol ÷ mol × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-SETIMBANG-ESTER

MOLEKUL 3D **Ester harum dan ester raksasa**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam asetat $C_2H_4O_2$ Mr ≈ 60,05 PubChem ↗

Asam pada cuka dapur (sekitar 4–25%).

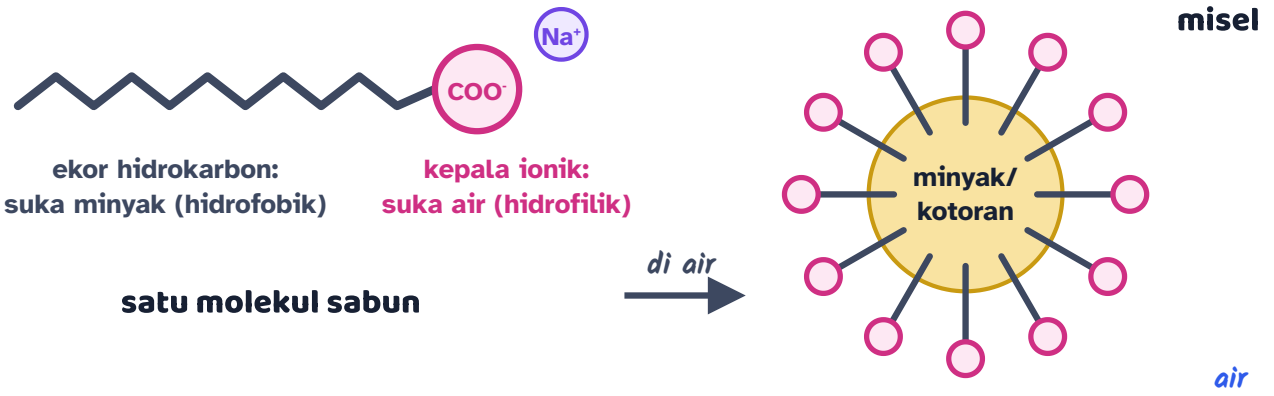
Temukan gugus –COO– pada setiap ester. Bandingkan isoamil asetat (pisang) dengan etil butirat (nanas): keduanya ester, tetapi "ekor"-nya berbeda. Lalu lihat gliserol dan asam palmitat: tiga asam lemak yang bergandengan dengan satu gliserol membentuk lemak, ester raksasa yang hampir tidak berbau.

Saponifikasi: dari minyak kelapa menjadi sabun

Ester dapat dipecah kembali. Bila ester dipanaskan dengan basa kuat seperti NaOH, ia terhidrolisis **tuntas** (tidak setimbang) menjadi garam karboksilat dan alkohol. Reaksi ini disebut **saponifikasi** (dari bahasa Latin *sapo* = sabun), karena dengan cara inilah sabun dibuat dari lemak dan minyak.

Minyak dan lemak adalah **trigliserida**: ester dari gliserol (alkohol dengan tiga –OH) dan tiga asam lemak. Minyak kelapa kaya akan trilaurin:

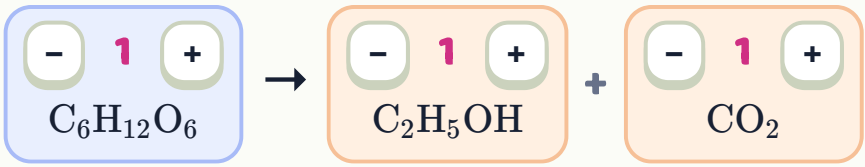
$$\underbrace{C_3H_5(OOCC_{11}H_{23})_3}_{\text{trilaurin (minyak kelapa)}} + 3\,NaOH \longrightarrow \underbrace{C_3H_5(OH)_3}_{\text{gliserol}} + \underbrace{3\,C_1}_{\text{natri}}$$



Sabun bekerja karena molekulnya "berwajah dua". Ekor hidrokarbon menyelam ke dalam minyak, kepala ionik tetap di air. Tetes minyak terbungkus menjadi **misel** yang bisa dibilas air.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi ester, sabun, dan bahan bakar



Unsur	Kiri	Kanan	
C	6 ●●●●●●	3 ●●●	✕
H	12 ○○○○○○○○○○○○	6 ○○○○○○	✕
O	6 ●●●●●●	3 ●●●	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Mulai dari fermentasi tapai, lalu esterifikasi, saponifikasi trilaurin (minyak kelapa) dan tristearin (lemak sapi), serta pembakaran bioetanol serta metanol. Berapa mol NaOH yang dibutuhkan untuk menyabunkan satu mol trigliserida?

KIMIA NUSANTARA · SABUN DARI KEBUN KELAPA DAN SAWIT

Indonesia adalah penghasil minyak sawit terbesar di dunia dan salah satu penghasil kelapa terbesar. Kedua minyak ini bahan utama sabun batangan. Minyak kelapa yang kaya asam laurat menghasilkan sabun yang cepat berbusa, sedangkan minyak sawit (asam palmitat dan oleat) membuat sabun lebih keras dan awet. Gliserol hasil samping saponifikasi dipakai lagi sebagai pelembap dalam sabun dan kosmetik. Industri oleokimia di Sumatra dan Kalimantan mengolah sawit menjadi asam lemak, gliserol, dan bahan sabun.

KESELAMATAN · SODA API HANYA BERSAMA GURU

Membuat sabun memerlukan NaOH (soda api) yang **sangat korosif**: dapat membakar kulit dan membutakan mata, dan pelarutannya dalam air melepas panas tinggi. Percobaan saponifikasi hanya boleh dilakukan di laboratorium sekolah bersama guru, dengan kacamata pelindung dan sarung tangan. Di rumah, cobalah alternatif aman di Tantangan Rumah bab ini.

MITOS

"Semua ester berbau harum."

FAKTA

Hanya ester kecil yang mudah menguap dan tercium. Lemak, minyak goreng, dan lilin lebah juga ester, tetapi molekulnya besar sehingga hampir tidak menguap dan hampir tidak berbau.

MITOS

"Aroma pisang di permen pasti dari buah pisang asli."

FAKTA

Sering kali perisa itu isoamil asetat buatan pabrik, hasil esterifikasi seperti di subbab ini. Molekulnya sama persis dengan yang ada di pisang; hidung tidak bisa membedakan asal-usulnya.

33.5 Haloalkana, amina, dan amida

Haloalkana (alkil halida) punya atom halogen, $\mathrm{R{-}X}$, dengan X = F, Cl, Br, atau I. Namanya: **halo**alkana dengan nomor letak halogen, misalnya $\mathrm{CH_3CHBrCH_2CH_3}$ = 2-bromobutana dan $\mathrm{CHCl_3}$ = triklorometana (kloroform). Ikatan C–X polar, tetapi haloalkana tidak membentuk ikatan hidrogen dengan air, sehingga tidak larut dalam air. Haloalkana berklor dan berbrom juga **lebih berat** daripada air: diklorometana (massa jenis 1,33 g/mL) tenggelam di bawah air.

- **Kloroetana**, $\mathrm{C_2H_5Cl}$: mendidih pada 12 °C. Disemprotkan ke kulit, ia menguap cepat dan mendinginkan: dipakai sebagai semprotan pereda nyeri cedera olahraga.
- **CFC** (kloro-fluoro-karbon), misalnya $\mathrm{CCl_2F_2}$: dulu pendingin kulkas dan AC, kini dilarang karena merusak lapisan ozon (Bab 38).
- Haloalkana adalah "batu loncatan" sintesis: atom halogennya mudah diganti gugus lain (substitusi, Bab 34).

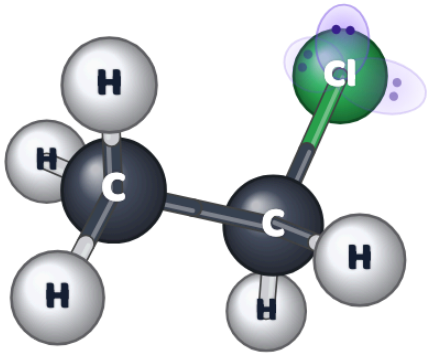
Amina adalah turunan amonia, $\mathrm{NH_3}$, yang atom H-nya diganti gugus alkil: amina primer $\mathrm{R{-}NH_2}$, sekunder $\mathrm{R_2NH}$, tersier $\mathrm{R_3N}$. Nama IUPAC: alkan**amina** ($\mathrm{CH_3NH_2}$ = metanamina); nama umum: alkil**amina** (metilamina). Amina kecil berbau amis: bau ikan berasal dari trimetilamina, $\mathrm{(CH_3)_3N}$. Atom N punya pasangan elektron bebas yang dapat menerima $\mathrm{H^+}$, jadi amina bersifat **basa lemah**:

$$CH_3NH_2 + H_2O \rightleftharpoons CH_3NH_3^+ + OH^-$$

Amida punya gugus –$CONH_2$: gugus karbonil yang tersambung ke atom N. Namanya alkan**amida**, misalnya CH_3CONH_2 = etanamida (asetamida). Contoh terkenal: **urea**, $CO(NH_2)_2$, pupuk nitrogen utama petani Indonesia; **parasetamol**, obat penurun demam; dan **ikatan peptida** –CO–NH– yang merangkai asam amino menjadi protein (Bab 36) serta merangkai nilon (Bab 35).

MOLEKUL 3D

Halogen dan nitrogen sebagai wajah molekul



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Kloroetana C_2H_5Cl

Mr ≈ 64,51

PubChem ↗

Haloalkana; semprotan pendingin untuk cedera olahraga.

Cari pasangan elektron bebas pada atom N metilamina: di situlah H^+ ditangkap. Pada urea dan parasetamol, temukan gugus amida (O=C–N). Ukur sudut di sekitar atom N amida. Lebih dekat ke 109,5° (piramida) atau ke 120° (datar)?

LANJUT · IB & OLIMPIADE

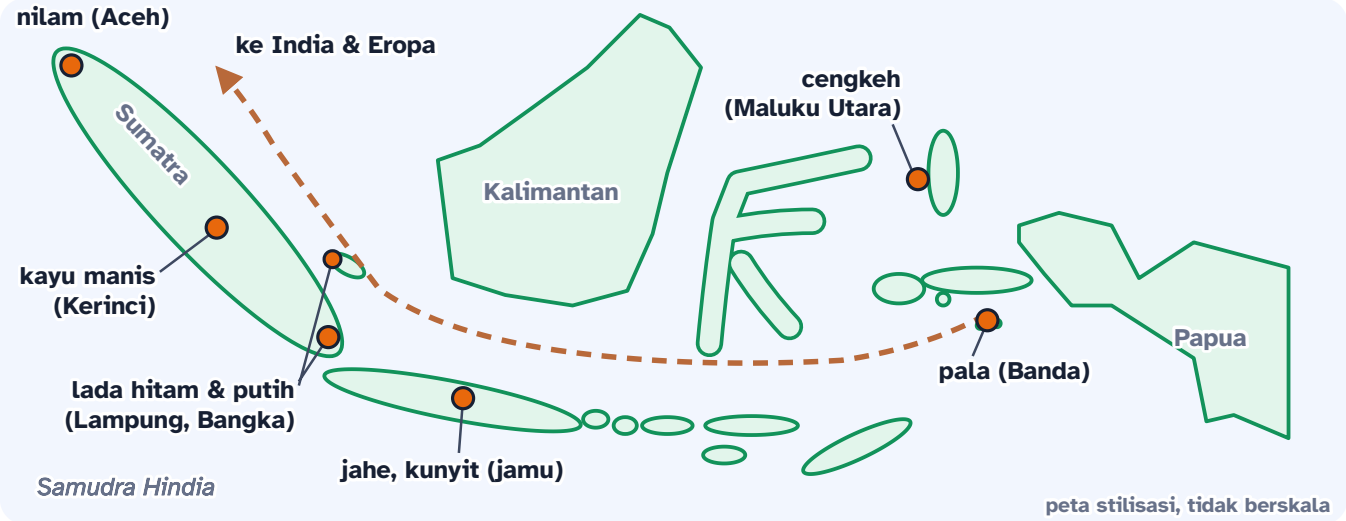
MENGAPA AMINA BASA, TETAPI AMIDA TIDAK?

Metilamina ($K_b \approx 4{,}4 \times 10^{-4}$) sedikit lebih basa daripada amonia ($K_b = 1{,}8 \times 10^{-5}$), karena gugus metil "mendorong" elektron ke atom N sehingga pasangan elektron bebasnya lebih siap mengikat H^+.

Pada amida, pasangan elektron bebas N **terdelokalisasi** ke gugus C=O di sebelahnya (resonansi O=C–N ↔ ⁻O–C=N⁺). Pasangan itu "sibuk", sehingga amida praktis tidak basa. Resonansi ini juga membuat ikatan C–N amida bersifat sebagian rangkap: keenam atom di sekitarnya terletak pada satu bidang datar. Itulah sebabnya rantai protein terlipat dengan pola yang teratur.

33.6 Molekul rempah Nusantara

Ratusan tahun lalu, cengkeh dan pala dari Maluku lebih berharga daripada emas di pasar Eropa. Yang sebenarnya diperebutkan bangsa-bangsa itu adalah **molekul**: eugenol dalam cengkeh dan miristisin dalam pala. Sekarang kamu bisa membaca "wajah" molekul-molekul itu.



Jalur rempah: cengkeh dan pala dari Maluku dibawa melalui Laut Jawa dan Selat Malaka ke India, Timur Tengah, dan Eropa. Setiap rempah membawa molekul aroma khasnya.

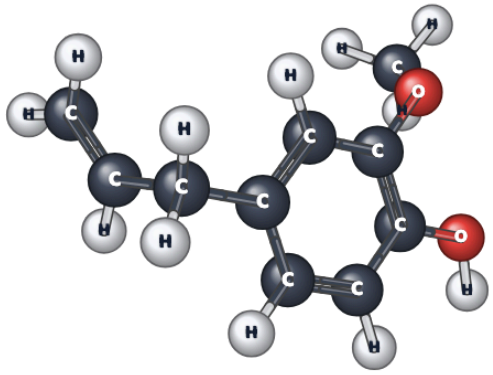
Rempah & daerah	Molekul utama	Gugus fungsi yang tampak
Cengkeh (Maluku Utara: Ternate, Tidore)	eugenol, $C_{10}H_{12}O_2$	fenol (–OH pada cincin), eter (metoksi, –OCH_3), alkena
Kayu manis (Kerinci, Jambi)	sinamaldehida, C_9H_8O	aldehida, alkena, cincin benzena
Pala (Kepulauan Banda)	miristisin, $C_{11}H_{12}O_3$	eter (metoksi & metilendioksi), alkena
Lada (Lampung, Bangka)	piperin, $C_{17}H_{19}NO_3$	amida, alkena (dua C=C), eter siklik

Kunyit (jamu kunyit asam)	kurkumin, $C_{21}H_{20}O_6$	fenol, eter, keton (dua C=O), alkena
Cabai (sambal)	kapsaisin, $C_{18}H_{27}NO_3$	amida, fenol, eter, alkena
Jahe (wedang jahe)	gingerol, $C_{17}H_{26}O_4$	keton, alkohol sekunder, fenol, eter
Vanili	vanilin, $C_8H_8O_3$	aldehida, fenol, eter
Serai	sitral, $C_{10}H_{16}O$	aldehida, alkena
Nilam (Aceh)	patchoulol, $C_{15}H_{26}O$	alkohol tersier

Bahasa sederhana · Lihat tabel di atas: hampir semua molekul rempah punya cincin benzena yang "berminyak" dan hanya satu atau dua gugus polar. Karena itu bumbu ditumis dengan minyak, bukan direbus dengan air, supaya molekul aromanya larut dan harumnya keluar.

MOLEKUL 3D

Galeri molekul rempah Nusantara



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Eugenol $C_{10}H_{12}O_2$ Mr ≈ 164,2 PubChem ↗

Aroma cengkeh (rempah Maluku); antiseptik di kedokteran gigi dan bahan kretek.

Jelajahi sebelas molekul rempah dan kopi. Untuk setiap molekul, cari atom O (merah) dan N (biru), lalu tebak gugus fungsinya dengan tabel di atas. Bandingkan eugenol, vanilin, kapsaisin, dan kurkumin: keempatnya punya "kepala" yang sama, yaitu cincin dengan –OH dan –OCH_3 bersebelahan!

Sudah bisa menebak wajah-wajahnya? Sekarang jadilah detektif. Di lab berikut molekul digambar datar (2D) seperti di buku, dan kamu harus mengetuk gugus fungsi yang diminta.

LAB MINI

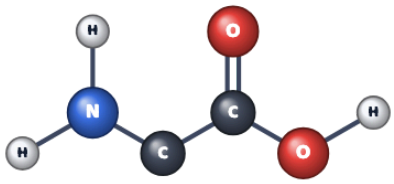
Detektif Gugus Fungsi: ketuk wajahnya!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-33

Glisin

asam amino paling sederhana, penyusun protein

🎯 Cari: amina ($-NH_2$)



Cari gugus amina ($-NH_2$). Ketuk salah satu atomnya pada gambar.

Cari gugus	Skor	Ditemukan
amina ($-NH_2$)	0 benar / 0 ketukan	0 dari 2 gugus

Mode **Tebak**: baca gugus yang dicari, lalu ketuk salah satu atomnya pada gambar. Mode **Jelajah**: ketuk atom mana saja untuk melihat gugusnya. Mulailah dari glisin dan etil butanoat, lalu taklukkan vanilin, eugenol, gingerol, kapsaisin, dan kurkumin. Tombol 👀 menampilkan semua gugus sekaligus.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU · PULAU KECIL SEHARGA MANHATTAN**

Dahulu cengkeh hanya tumbuh di beberapa pulau kecil Maluku Utara (Ternate, Tidore, dan sekitarnya), sedangkan pala hanya di Kepulauan Banda. Rempah itu sudah diperdagangkan sampai India, Tiongkok, dan Timur Tengah jauh sebelum bangsa Eropa datang pada abad ke-16. Persaingan memperebutkan pala begitu sengit sehingga dalam **Perjanjian Breda (1667)** Belanda mempertahankan Pulau Run di Banda, sedangkan Inggris mempertahankan New Amsterdam, yang kini menjadi Manhattan di kota New York. Sejarah ini juga menyimpan luka: penduduk Banda menderita kekerasan besar saat monopoli pala dipaksakan pada abad ke-17.

KIMIA NUSANTARA · DARI CENGKEH SAMPAI NILAM

Minyak cengkeh mengandung ±70–90% eugenol. Dokter gigi memakainya sebagai antiseptik dan pereda nyeri gigi ringan. **Minyak nilam** dari Aceh dan daerah lain di Indonesia memasok sebagian besar kebutuhan dunia; patchoulol yang menguap sangat lambat menjadi "pengikat" (fiksatif) agar wangi parfum awet. **Kayu manis** dari Kerinci, Jambi, dikenal di pasar dunia, dan aroma hangatnya berasal dari sinamaldehida.

Lada hitam Lampung dan lada putih Muntok (Bangka) sama-sama pedas karena piperin. Bedanya: lada putih dibuat dengan mengupas kulit buahnya, sehingga sebagian senyawa aroma di kulit hilang dan rasanya lebih "bersih".

AWAS JEBAKAN · "ALAMI" TIDAK SELALU AMAN

Pala sebagai bumbu sejumput aman. Tetapi miristisin dalam jumlah besar bersifat racun saraf: menelan bubuk pala beberapa sendok teh sekaligus dapat menyebabkan pusing, jantung berdebar, dan halusinasi. Minyak cengkeh pekat juga dapat mengiritasi kulit dan gusi. Dosis menentukan racun, baik zat alami maupun buatan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

WAJAH CERMIN: MOLEKUL KIDAL DAN MOLEKUL KANAN

Gugus fungsi bukan satu-satunya penentu aroma. Karvon, $C_{10}H_{14}O$ (sebuah keton), punya dua bentuk yang merupakan bayangan cermin satu sama lain, seperti tangan kiri dan kanan. (*R*)-karvon berbau daun mint, sedangkan (S)-karvon berbau biji jemuju (*caraway*), rempah yang mirip jintan. Rumusnya sama, gugus fungsinya sama, urutan ikatannya pun sama; yang beda hanya susunan ruangnya di sekitar satu atom C yang mengikat empat gugus berbeda (**atom C kiral**). Reseptor bau di hidung kita juga "kidal" atau "kanan", sehingga bisa membedakannya. Gingerol pada jahe juga punya satu atom C kiral, yaitu C yang mengikat –OH. Isomer optis sudah diperkenalkan di Bab 32 dan sangat penting bagi molekul kehidupan di Bab 36.

Kimia di sekitarmu

Cairan pembersih tangan

Berisi etanol atau 2-propanol ±60–80%. Gugus –OH-nya merusak protein dan selaput lemak kuman, dan airnya membantu kerja itu.

Menumis bumbu

Eugenol, kurkumin, dan sinamaldehida lebih mudah larut dalam minyak daripada dalam air. Karena itu bumbu ditumis sampai harum sebelum diberi kuah.

Ikan diberi jeruk nipis

Bau amis ikan berasal dari amina yang basa. Asam sitrat jeruk nipis mengubahnya menjadi garam amonium yang tidak menguap, jadi bau amisnya berkurang.



Penghapus kutek

Berisi aseton (keton) atau etil asetat (ester), pelarut yang melarutkan lapisan cat kuku. Keduanya mudah terbakar: jauhkan dari api.



Minyak cengkeh untuk gigi

Eugenol bersifat antiseptik dan sedikit membius saraf. Itu sebabnya obat sakit gigi tradisional dan bahan tambal sementara dokter gigi beraroma cengkeh.



Sabun batangan

Hasil saponifikasi minyak kelapa atau sawit. Satu molekul sabun punya "ekor" yang menangkap minyak dan "kepala" yang suka air.

Cek Cepat

Senyawa CH_3COCH_3 termasuk golongan...

- aldehida
- keton
- eter
- ester

Uji yang menghasilkan endapan merah bata bila direaksikan dengan etanal adalah uji...

- Tollens
- dikromat
- Fehling
- soda kue

Nama IUPAC ester $HCOOC_2H_5$ yang beraroma rum adalah...

- etil metanoat
- metil etanoat
- etil etanoat
- asam etanoat

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: minyak aroma cengkeh dan kulit jeruk

Bahan: 8 sendok makan minyak goreng atau minyak kelapa, 8 sendok makan air, 20 butir cengkeh, kulit 1 buah jeruk (diiris tipis), 2 gelas kecil tahan panas, panci kecil berisi air panas dari termos (bukan mendidih), saringan teh, tisu, kertas label.

1. Gelas A: 4 sendok makan **air** + 10 butir cengkeh + separuh irisan kulit jeruk. Gelas B: 4 sendok makan **minyak** + bahan yang sama.
2. Bersama orang dewasa, rendam kedua gelas di dalam panci berisi air panas selama 15 menit (cara "tim"). Jangan memanaskan minyak langsung di atas kompor.
3. Tutup kedua gelas, diamkan satu hari, lalu saring dan beri label.
4. Teteskan masing-masing satu tetes pada dua lembar tisu. Kipas-kipaskan tisu di dekat hidung (jangan menghirup langsung) dan bandingkan aromanya hari ini dan besok.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa; minyak panas dapat memercik dan terbakar, jadi hanya hangatkan dengan air panas. Jangan mengoleskan hasilnya ke wajah atau dekat mata, karena minyak cengkeh pekat dapat mengiritasi kulit. Jangan dicicipi. Simpan berlabel dan jauh dari jangkauan adik kecil.

Pertanyaan: Gelas mana yang lebih harum dan tahan lama? Eugenol dan limonena (aroma jeruk) punya rangka hidrokarbon besar dengan sedikit gugus polar. Gunakan prinsip "sejenis melarutkan sejenis" untuk menjelaskan hasilmu.

ADU CEPAT **Mr ester jenuh**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-33

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Mr = 12n + 2n + 32 = 14n + 32. Contoh: etil etanoat, n = 4 → 88.

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 33 dalam 3 menit

☑️ Kamu sekarang bisa...

- mengenali **gugus fungsi** utama (hidroksil, eter, karbonil, karboksil, ester, halo, amino, amida) beserta rumus umum **deret homolog**-nya
- memberi **nama IUPAC** alkanol, alkoksialkana, alkanal, alkanon, asam alkanoat, alkil alkanoat, haloalkana, amina, dan amida sederhana
- menjelaskan perbedaan **titik didih dan kelarutan** dengan ikatan hidrogen, serta mengenali **isomer fungsi**
- membedakan golongan senyawa dengan **uji Tollens, Fehling, dikromat**, soda kue, dan iodoform
- menuliskan reaksi **esterifikasi** dan **saponifikasi**, lalu menemukan gugus fungsi pada **molekul rempah Nusantara**

🔑 Istilah kunci

Gugus fungsi · deret homolog · isomer fungsi · Alkohol · Eter · gugus karbonil · aldehida · keton · formalin · Pereaksi Tollens · Pereaksi Fehling · Asam karboksilat · Ester · rendemen · saponifikasi · trigliserida

🧮 Rumus penting

$$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2-2u}\mathrm{O}_x \quad \Rightarrow \quad M_r = 14n + 2 - 2u + 16x$$

Rumus umum dan Mr deret homolog. Setiap tambahan satu gugus –CH_2– menambah Mr sebesar 14; jumlah atom O dan ikatan rangkap C=O menentukan 'keluarga' molekulnya.

$$\%\,\text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{\dfrac{m_{\text{asam}}}{M_{r,\text{asam}}} \times M_{r,\text{ester}}} \times 100\%$$

Rendemen esterifikasi. Bandingkan ester yang benar-benar kamu tampung dengan ester yang seharusnya terbentuk bila semua asam (pereaksi pembatas) berubah menjadi ester.

$$K = \frac{x^2}{(1-x)(r-x)}$$

Rendemen setimbang esterifikasi. Satu mol asam dicampur r mol alkohol. Saat setimbang, x mol ester terbentuk; makin banyak alkohol, makin besar x.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Rumus molekul yang sama belum tentu zat yang sama.
- Alkohol bukan basa, walaupun rumusnya mengandung OH.
- Satu huruf saja bisa mengubah golongan!

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=33

Teka-teki untuk Bab 34

Di bab ini alkohol dan asam "bergandengan tangan" menjadi ester sambil melepas air. Molekul ternyata bisa bertukar pasangan, menambah pasangan, atau berpisah. Bagaimana etena yang kecil bisa bergandengan menjadi plastik, dan bagaimana alkohol bisa diubah menjadi alkena atau haloalkana?

▼ **Intip petunjuk**

Ada beberapa "gerakan tari" molekul: **substitusi** (bertukar pasangan), **adisi** (menambah penari), **eliminasi** (dua penari keluar bersama), dan **kondensasi** (bergandengan sambil melepas molekul kecil seperti air). Esterifikasi yang baru kamu pelajari adalah contoh kondensasi! Di Bab 34 kamu akan melihat panah lengkung yang menunjukkan ke mana elektron bergerak.

34 Reaksi Organik: Dansa Elektron dan Panah Lengkung

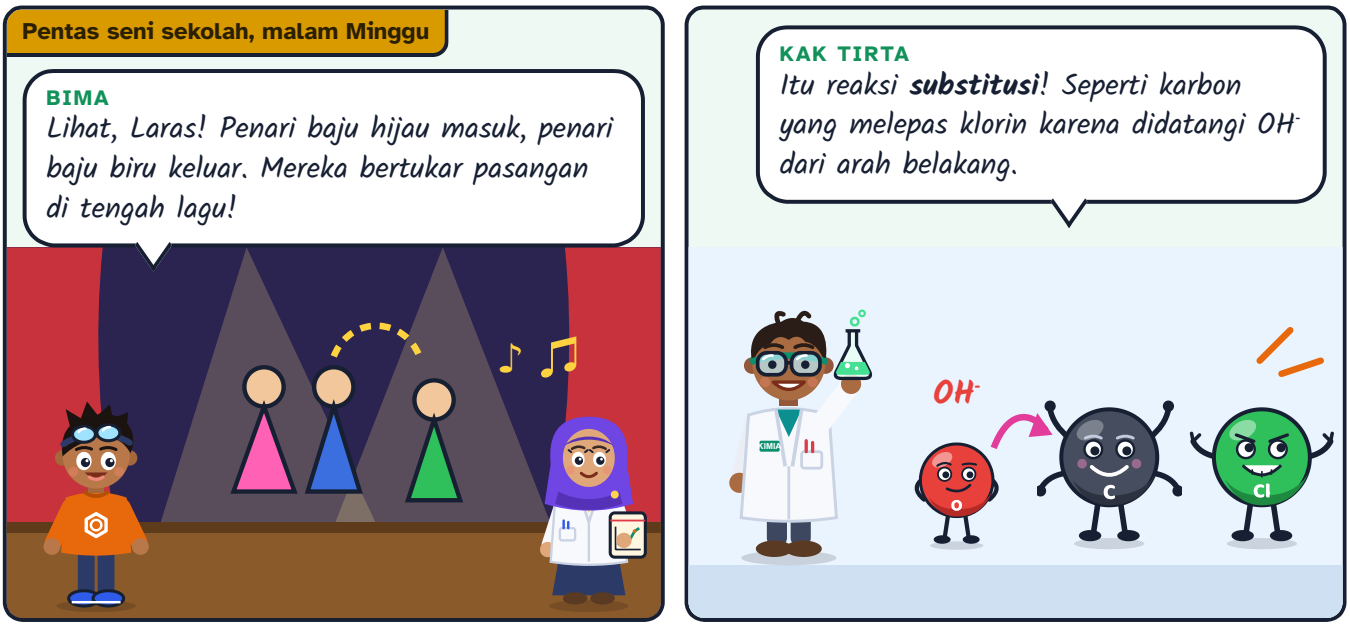
Di pabrik petrokimia, gas etena berubah menjadi plastik, alkohol, dan bahan obat. Semua perubahan itu digerakkan oleh elektron yang berpindah pasangan, dan kimiawan punya bahasa rahasia untuk menceritakannya: panah lengkung.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menggolongkan reaksi organik menjadi **substitusi, adisi, eliminasi, oksidasi–reduksi,** dan **kondensasi**, serta menghitung **ekonomi atom**-nya;
- membedakan pemutusan ikatan **homolitik** dan **heterolitik**, mengenali **nukleofil** dan **elektrofil**, dan membaca **panah lengkung**;
- menjelaskan mekanisme **substitusi radikal** dan **adisi elektrofilik**, termasuk **aturan Markovnikov** dan uji air brom;
- membandingkan **SN1** dan **SN2** (orde, tahap, stereokimia, substrat, pelarut) serta eliminasi **E1/E2** dengan aturan Zaitsev;
- meramalkan hasil **oksidasi alkohol** primer, sekunder, dan tersier, lalu merancang **peta sintesis** sederhana.

PESTA DANSA MOLEKUL

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Dalam gambar mekanisme reaksi, kimiawan menggambar panah lengkung seperti ↱. Menurutmu, apa yang sebenarnya "bergerak" mengikuti panah itu?

- Atom atau gugus atom yang pindah tempat.
- Inti atom yang tertarik muatan listrik.
- Elektron: satu panah berkepala penuh = sepasang elektron.
- Panas yang mengalir dari pereaksi ke hasil reaksi.

Jawabannya: elektron. Panah lengkung adalah "koreografi" elektron. Ekornya berangkat dari pasangan elektron (pasangan bebas atau ikatan), kepalanya menunjuk tempat elektron itu mendarat. Atom memang ikut berpindah, tetapi hanya karena ikatannya (elektronnya) berubah. Miskonsepsi "panah = gerak atom" adalah salah satu yang paling sering muncul di ujian.

34.1 Lima jurus reaksi organik

Ada lebih dari seratus juta senyawa organik yang sudah dikenal. Kabar baiknya, hampir semua reaksinya hanya memakai segelintir "jurus". Kalau kamu mengenali jurusnya, kamu bisa meramalkan hasil reaksi yang belum pernah kamu lihat.

Bahasa sederhana · Bayangkan molekul sebagai penari di lantai dansa. Ada penari yang **bertukar pasangan** (substitusi), ada yang **mengajak penari baru bergabung** (adisi), ada yang **keluar berdua** dari lantai dansa (eliminasi), ada yang **berganti kostum** karena mendapat oksigen (oksidasi), dan ada dua penari yang **bergandengan sambil melepas jaket** berupa molekul air (kondensasi).

DEFINISI · TIGA JURUS UTAMA

- **Substitusi**: satu atom atau gugus pada molekul **diganti** atom atau gugus lain.
- **Adisi**: dua molekul **bergabung menjadi satu**; ikatan rangkap terbuka menjadi ikatan tunggal.
- **Eliminasi**: kebalikan adisi. Molekul kecil (H_2O, HBr) **lepas** dari molekul dan terbentuk ikatan rangkap.

Jurus	Apa yang terjadi	Contoh	Di sekitar kita
Substitusi	atom/gugus ditukar	$CH_4 + Cl_2 \xrightarrow{UV} CH_3Cl + HCl$	pembuatan haloalkana, pelarut
Adisi	ikatan rangkap "dibuka", dua molekul menyatu	$CH_2{=}CH_2 + H_2O \xrightarrow{H_3PO_4} CH_3CH_2OH$	etanol industri, margarin
Eliminasi	molekul kecil lepas, ikatan rangkap terbentuk	$CH_3CH_2OH \xrightarrow{H_2SO_4} CH_2{=}CH_2 + H_2O$ (170 °C)	etena dari bioetanol
Oksidasi–reduksi	bertambah O atau berkurang H (oksidasi); sebaliknya reduksi	$CH_3CH_2OH \longrightarrow CH_3CHO \longrightarrow CH_3COOH$	tapai yang makin asam, uji napas
Kondensasi (kebalikannya: hidrolisis)	dua molekul bergabung sambil melepas molekul kecil (biasanya air)	$CH_3COOH + C_2H_5OH \rightleftharpoons CH_3COOC_2H_5 + H_2O$	aroma buah, poliester (Bab 35)

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Jangan menebak jenis reaksi hanya dari jumlah zatnya. Cara paling aman: bandingkan **ikatan** sebelum dan sesudah. Ikatan rangkap hilang dan tidak ada yang lepas? Adisi. Ikatan rangkap muncul dan ada molekul kecil yang lepas? Eliminasi. Jumlah ikatan rangkap tetap, hanya "penumpangnya" yang bertukar? Substitusi.

Kimiawan modern juga menilai reaksi dari sisi lingkungan. Reaksi yang baik "memakai" sebanyak mungkin atom pereaksi untuk produk yang kita inginkan, sehingga limbahnya sedikit. Ukurannya disebut **ekonomi atom**.

RUMUS HIDUP **Ekonomi atom**

$$\%\,\mathrm{EA} = \frac{M_r \text{ produk yang diinginkan}}{\sum M_r \text{ pereaksi}} \times 100\%$$

Persentase massa atom pereaksi yang benar-benar masuk ke produk yang kita inginkan. Sisanya menjadi produk samping alias limbah.

- M_r produk — Mr produk yang diinginkan
- $\sum M_r$ — Jumlah Mr semua pereaksi (dikali koefisien)
- $\%\,\mathrm{EA}$ — Ekonomi atom %

EKONOMI ATOM

100

%

✨ **100%: khas reaksi adisi, misalnya hidrasi etena menjadi etanol**

Dari setiap 100 kg pereaksi, **100** kg berakhir di produk yang diinginkan.

Cek satuan: tanpa satuan: (g/mol) ÷ (g/mol) × 100%

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-EKONOMI-ATOM

CONTOH

Dua jalan menuju etanol

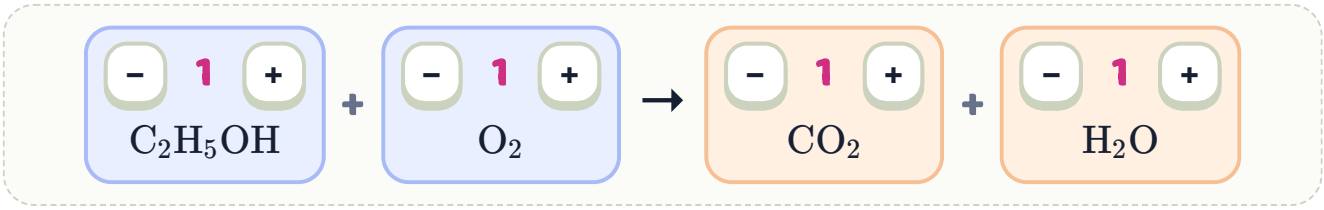
Etanol untuk industri bisa dibuat dari (a) hidrasi etena: $C_2H_4 + H_2O \longrightarrow C_2H_5OH$, atau (b) substitusi bromoetana: $C_2H_5Br + NaOH \longrightarrow C_2H_5OH + NaBr$. Hitung ekonomi atom keduanya. (Ar H = 1, C = 12, O = 16, Na = 23, Br = 80)

1. Mr etanol $= 2(12) + 6(1) + 16 = 46$.
2. (a) Pereaksi: etena 28 + air 18 = 46. EA $= 46/46 \times 100\% = 100\%$.
3. (b) Pereaksi: bromoetana $2(12) + 5(1) + 80 = 109$ dan NaOH 40, total 149. EA $= 46/149 \times 100\% = 30{,}9\%$.

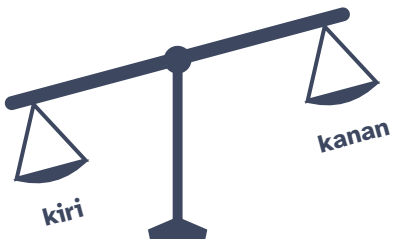
Hidrasi etena: 100% (adisi tidak menghasilkan limbah). Substitusi: hanya 30,9%, karena hampir 70% massa pereaksi menjadi NaBr. Itulah sebabnya industri memilih jalur adisi.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi-reaksi organik



Unsur	Kiri	Kanan	
C	2 ●●	1 ●	✗
H	6 ○○○○○○	2 ○○	✗
O	3 ●●●	3 ●●●	✓



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 5 null

Berturut-turut: pembakaran bioetanol, fermentasi gula tetes tebu, substitusi radikal sampai tuntas, hidrogenasi triolein (lemak minyak) menjadi tristearin (lemak padat margarin), dan oksidasi etanol oleh dikromat. Persamaan terakhir paling menantang: muatan juga harus setara!

KIMIA NUSANTARA · PETROKIMIA CILEGON

Di kawasan industri Cilegon, Banten, nafta dari minyak bumi "dipecah" (perengkahan) menjadi etena dan propena. Etena lalu menjalani berbagai jurus bab ini: **adisi** klorin menghasilkan 1,2-dikloroetana, **eliminasi** HCl darinya menghasilkan vinil klorida, dan **polimerisasi adisi** mengubah etena, propena, dan vinil klorida menjadi plastik polietilena, polipropilena, dan PVC. Pipa air di rumahmu mungkin berasal dari sana!

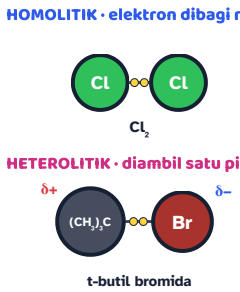
34.2 Bahasa panah lengkung: siapa memberi, siapa menerima

Persamaan reaksi hanya memberi tahu *awal* dan *akhir*. **Mekanisme reaksi** menceritakan *jalan ceritanya*: ikatan mana yang putus lebih dulu, ikatan mana yang terbentuk, dan zat antara apa yang sempat muncul. Tokoh utamanya selalu **elektron**, karena ikatan kovalen tidak lain adalah sepasang elektron yang dipakai bersama (Bab 11).

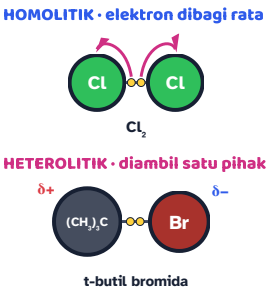
Bahasa sederhana · Ikatan kovalen itu seperti dua anak yang memegang satu tali berdua. Saat talinya putus, bisa terjadi dua hal: talinya putus di tengah sehingga masing-masing kebagian separuh, atau salah satu anak merebut seluruh tali. Kimiawan menyebutnya pemutusan homolitik dan heterolitik.

DEFINISI · DUA CARA MEMUTUS IKATAN

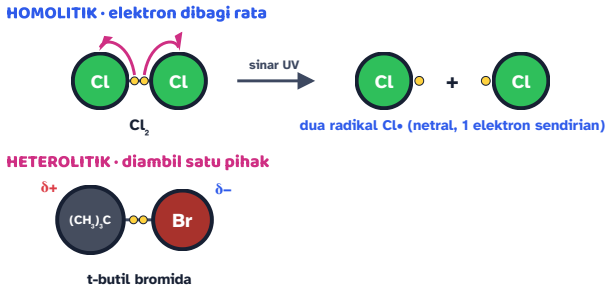
- **Pemutusan homolitik**: pasangan elektron ikatan **dibagi rata**, satu elektron untuk tiap atom. Hasilnya dua **radikal bebas** (spesi netral dengan elektron tak berpasangan, ditulis dengan titik: $\mathrm{Cl}^{\bullet}$). Biasanya dipicu sinar UV atau panas.
- **Pemutusan heterolitik**: kedua elektron ikatan **diambil satu atom** (biasanya yang lebih elektronegatif). Hasilnya sepasang ion, misalnya karbokation $\mathrm{R_3C^+}$ dan anion $\mathrm{Br^-}$. Biasanya terjadi di pelarut polar.



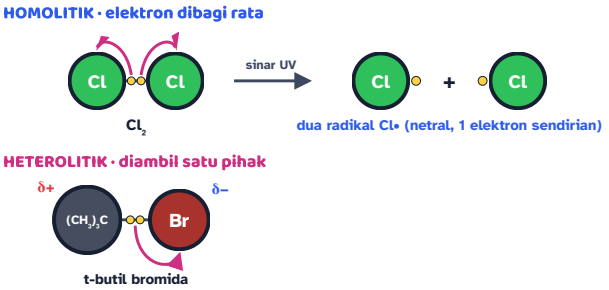
Langkah 1. Setiap ikatan kovalen adalah sepasang elektron (titik kuning) yang dipakai bersama. Ada dua cara memutusnya. (Pasangan elektron bebas lain sengaja tidak digambar.)



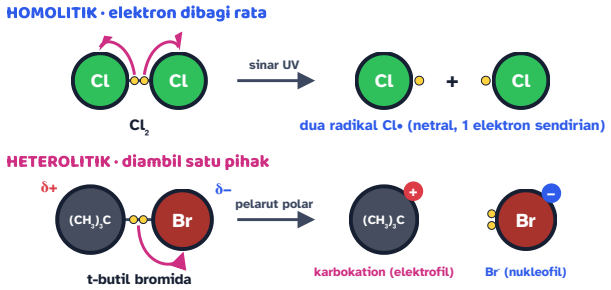
Langkah 2. Homolitik: panah berkait tunggal (seperti kail pancing) berarti gerak **satu** elektron. Dua kail: satu elektron ke tiap atom Cl.



Langkah 3. Hasilnya dua **radikal** $\mathrm{Cl}^{\bullet}$: atom netral dengan satu elektron tak berpasangan, sangat reaktif. Pemicunya sinar UV, karena ikatan Cl–Cl lemah (±242 kJ/mol).



Langkah 4. Heterolitik: panah berkepala penuh berarti gerak **sepasang** elektron. Kedua elektron ikatan ditarik oleh Br yang lebih elektronegatif.



Langkah 5. Hasilnya sepasang ion: **karbokation** $(\mathrm{CH_3})_3\mathrm{C}^+$ yang kekurangan elektron (elektrofil) dan Br^- yang kaya pasangan elektron (nukleofil). Pelarut polar membantu menstabilkan kedua ion.

Setelah ikatan putus, siapa bertemu siapa? Hampir semua reaksi ionik organik adalah pertemuan dua "kepribadian" yang saling melengkapi.

DEFINISI · NUKLEOFIL DAN ELEKTROFIL

- **Nukleofil** ("pencinta inti", kaya elektron) adalah spesi yang **memberikan pasangan elektron** untuk membentuk ikatan baru. Contoh: OH^-, CN^-, Br^-, $\mathrm{H_2O}$, $\mathrm{NH_3}$, dan ikatan π alkena.
- **Elektrofil** ("pencinta elektron", miskin elektron) adalah spesi yang **menerima pasangan elektron**. Contoh: H^+, karbokation, $\mathrm{NO_2}^+$, atom C bermuatan δ+ pada C–Br, dan ujung δ+ molekul $\mathrm{Br_2}$ yang terpolarisasi.

Dengan bahasa Bab 26: nukleofil adalah basa Lewis, elektrofil adalah asam Lewis.

ATURAN · MENGGAMBAR PANAH LENGKUNG

1. **Ekor** panah selalu berangkat dari **elektron**: pasangan elektron bebas, ikatan π, atau ikatan σ yang akan putus.
2. **Kepala** panah menunjuk ke atom yang menerima elektron, atau ke ruang di antara dua atom tempat ikatan baru terbentuk.
3. Kepala penuh ( ) = sepasang elektron; kepala separuh atau "kail" (⇀) = satu elektron.
4. Muatan total harus sama sebelum dan sesudah. Atom yang memberi pasangan bebas menjadi lebih positif; atom yang menerima pasangan elektron ikatan menjadi lebih negatif.

TRIK KAK TIRTA

"Uang selalu mengalir dari yang punya ke yang butuh." Panah lengkung juga begitu: dari **yang kaya elektron** (tanda –, pasangan bebas, ikatan rangkap) ke **yang miskin elektron** (tanda +, δ+, orbital kosong). Kalau panahmu berangkat dari atom H atau dari muatan +, berhentilah sejenak: hampir pasti terbalik!

AWAS JEBAKAN

Panah lengkung menunjukkan **gerak elektron, bukan gerak atom**. Jangan menggambar panah dari H^+ ke pasangan bebas O. Arah yang benar: dari pasangan bebas O *menuju* H^+, karena O-lah yang memberikan elektronnya.

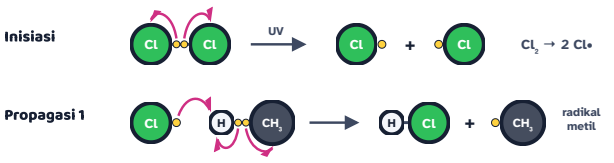
34.3 Substitusi radikal: reaksi berantai alkana

Alkana dulu dijuluki *parafin*, dari bahasa Latin "kurang berminat". Ikatan C–C dan C–H-nya kuat dan hampir tidak polar, sehingga asam, basa, dan oksidator di laboratorium sekolah tidak menyentuhnya. Namun, campurkan metana dan klorin lalu sinari dengan cahaya ultraviolet, dan reaksi berlangsung cepat sekali. Kuncinya adalah **radikal bebas**.

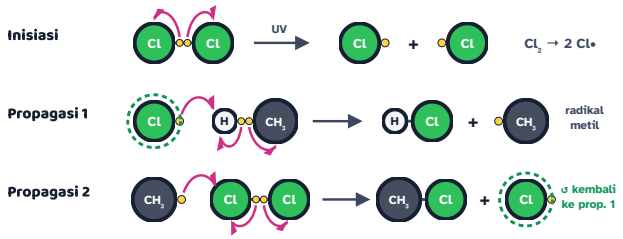
Mekanisme ini disebut **substitusi radikal bebas**. Seperti lingkaran gosip di kampung, cukup satu "pemicu" untuk membuat kabar menjalar dari rumah ke rumah. Ikuti tiga tahapnya: **inisiasi**, **propagasi**, dan **terminasi**.



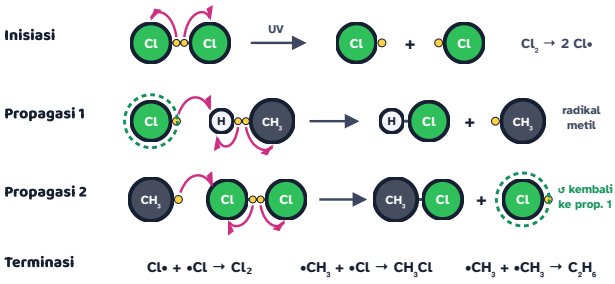
Langkah 1. Inisiasi. Sinar UV memutus ikatan Cl–Cl secara homolitik: $Cl_2 \quad 2\,Cl^{\bullet}$. Mengapa Cl–Cl dan bukan C–H? Ikatan Cl–Cl (±242 kJ/mol) jauh lebih lemah daripada C–H (±413 kJ/mol).



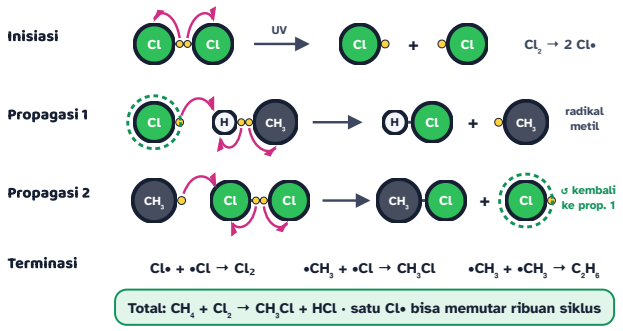
Langkah 2. Propagasi 1. Radikal $Cl^{\bullet}$ merebut satu atom H dari metana: $CH_4 + Cl^{\bullet} \quad HCl + {}^{\bullet}CH_3$. Tiga panah kail: satu elektron dari $Cl^{\bullet}$, dan dua elektron ikatan C–H berpisah.



Langkah 3. Propagasi 2. Radikal metil merebut satu atom Cl dari Cl_2: ${}^{\bullet}CH_3 + Cl_2 \quad CH_3Cl + Cl^{\bullet}$. Radikal $Cl^{\bullet}$ baru (lingkaran hijau) kembali ke propagasi 1. Inilah **reaksi berantai**!



Langkah 4. Terminasi. Dua radikal bertemu dan elektronnya berpasangan, sehingga rantai berhenti. Terbentuknya sedikit etana, C_2H_6, adalah bukti bahwa radikal metil memang ada.



Langkah 5. Satu radikal dari tahap inisiasi bisa menjalankan ribuan putaran propagasi sebelum terminasi. Persamaan totalnya adalah jumlah dua langkah propagasi.

Masalahnya, CH_3Cl yang terbentuk juga masih punya atom H. Radikal $Cl^{\bullet}$ tidak pilih-pilih, sehingga substitusi bisa berlanjut menjadi CH_2Cl_2, $CHCl_3$, dan CCl_4. Hasilnya **campuran**. Untuk memperbanyak CH_3Cl, pakai metana berlebih; untuk CCl_4, pakai klorin berlebih.

RADIKAL DI LANGIT

Reaksi berantai radikal tidak hanya ada di labu reaksi. Di stratosfer, radikal $Cl^{\bullet}$ yang dilepas CFC (bekas pendingin kulkas dan AC lama) merusak ozon dengan pola yang sama: satu radikal $Cl^{\bullet}$ dapat menghancurkan ribuan molekul O_3 sebelum rantainya terputus (Bab 38).

Pada alkana yang lebih panjang, atom H tidak semuanya setara. Atom H pada karbon sekunder lebih mudah direbut daripada H pada karbon primer, karena radikal sekunder yang terbentuk lebih stabil. Hasilnya bergantung pada dua hal: **berapa banyak** H jenis itu dan **seberapa reaktif** H tersebut.

RUMUS HIDUP

Selektivitas klorinasi radikal

$$\%\,\text{produk } 2^\circ = \frac{n_2\, r}{n_1 + n_2\, r} \times 100\%$$

Peluang klorin menempel di karbon sekunder = jumlah H sekunder dikali reaktivitasnya, dibagi total 'tiket undian' semua atom H.

- n_1 Jumlah H primer
- n_2 Jumlah H sekunder
- r Reaktivitas H 2° dibanding H 1°
- $\%\,\text{produk } 2^\circ$ Produk di karbon sekunder %

PRODUK DI KARBON SEKUNDER

55,9

%

propana pada 25 °C: hasil percobaan ±55% 2-kloropropana

Dari 100 molekul monoklorida, **±55,9** molekul klorinnya menempel di karbon sekunder dan **±44,118** di karbon primer.

Cek satuan: tanpa satuan (persen jumlah molekul)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-SELEKTIVITAS-RADIKAL

MITOS

"Alkana tidak bisa bereaksi sama sekali."

FAKTA

Alkana memang malas bereaksi dengan asam, basa, atau oksidator. Namun alkana **terbakar** dengan hebat (bensin, LPG) dan bereaksi dengan halogen di bawah sinar UV lewat radikal bebas.

MITOS

"Radikal bebas = ion, karena sama-sama reaktif."

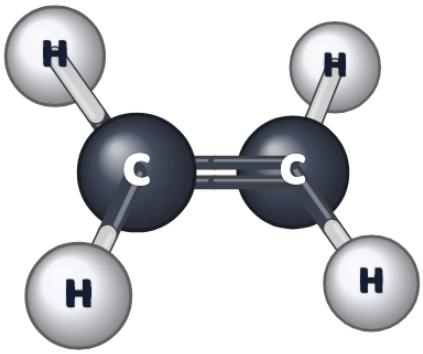
FAKTA

Radikal bebas **netral**; ciri khasnya elektron tak berpasangan. Ion bermuatan dan semua elektronnya bisa saja berpasangan. Keduanya lahir dari cara pemutusan ikatan yang berbeda.

34.4 Adisi elektrofilik pada alkena

Ikatan rangkap C=C terdiri atas satu ikatan σ yang kuat dan satu **ikatan π** yang lebih lemah. Elektron π berada di atas dan di bawah bidang molekul, agak "terbuka" dan mudah dijangkau. Akibatnya alkena bersifat **kaya elektron**: ia menarik elektrofil, lalu ikatan π terbuka dan dua atom baru menempel. Inilah **adisi elektrofilik**.

MOLEKUL 3D **Di mana elektron π bersembunyi?**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etena (etilena) C_2H_4 Mr ≈ 28,05 PubChem ↗

Segitiga datar di tiap karbon (120°). Hormon pematang buah dan bahan baku plastik polietilena.

Etena datar dengan sudut ±120° di tiap karbon: elektron π berada di atas dan di bawah bidang itu. Bandingkan dengan sikloheksana yang jenuh (tanpa π) dan benzena yang elektron π-nya menyebar di seluruh cincin. Ketuk dua atom C untuk membandingkan panjang C=C (±1,34 Å) dan C–C (±1,54 Å).

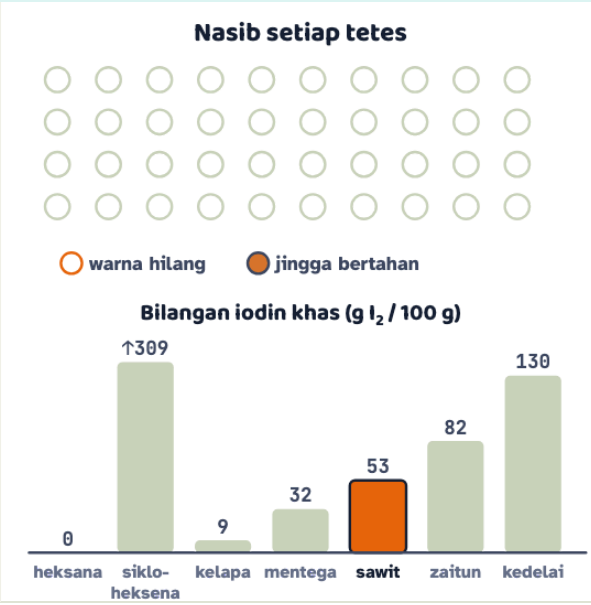
Bahasa sederhana · Ikatan rangkap seperti dua tangan yang saling menggenggam erat ditambah satu pelukan longgar. Pelukan longgar (ikatan π) mudah dilepas untuk menyambut teman baru. Karena itu alkena senang "menambah anggota", sedangkan alkana yang hanya bergandengan tangan tidak.

Contoh paling terkenal adalah reaksi dengan brom. Saat mendekati ikatan π, molekul Br_2 terpolarisasi: ujung yang dekat menjadi δ+ dan diserang elektron π, sedangkan ujung jauh pergi sebagai Br^-. Hasil akhirnya $CH_2{=}CH_2 + Br_2 \longrightarrow CH_2BrCH_2Br$ (1,2-dibromoetana). Warna jingga-cokelat brom hilang. Inilah **uji air brom** untuk ketidakjenuhan.

LAB MINI Tetes demi Tetes: Uji Air Brom

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-34





Tetes ditambahkan	Tetes yang warnanya hilang	Bilangan iodin khas
0	0	±53 g I_2/100 g

Pengamatan: **teteskan air brom (jingga)**

Pilih zat, lalu teteskan air brom. Berapa tetes yang "hilang" warnanya sebelum warna jingga bertahan? Bandingkan minyak kelapa, minyak sawit, minyak kedelai, dan mentega. Lalu coba heksana di tempat gelap dan di bawah sinar matahari. Mengapa uji ini sebaiknya dilakukan di tempat gelap?

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Uji air brom hanya adil bila dilakukan **di tempat gelap**. Di bawah sinar matahari, alkana pun pelan-pelan memudarkan brom lewat substitusi radikal (ditandai gas HBr yang memerahkan kertas lakmus biru basah). Alkena memudarkan brom **seketika** walau gelap. Benzena tidak memudarkan air brom sama sekali tanpa katalis.

Tebak Dulu!

Gas HBr dialirkan ke propena, $CH_2{=}CH{-}CH_3$. Atom Br akan menempel di karbon mana?

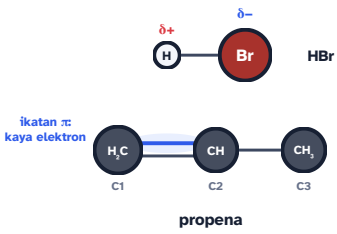
Di karbon ujung (C1), karena ujung molekul paling mudah dijangkau.

Di karbon tengah (C2), menghasilkan 2-bromopropana sebagai produk utama.

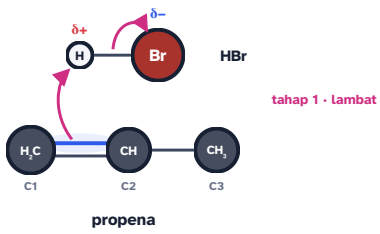
Sama banyak di C1 dan C2, karena kedua karbon sama-sama berikatan rangkap.

Br menempel di C3, karena gugus metil paling kaya elektron.

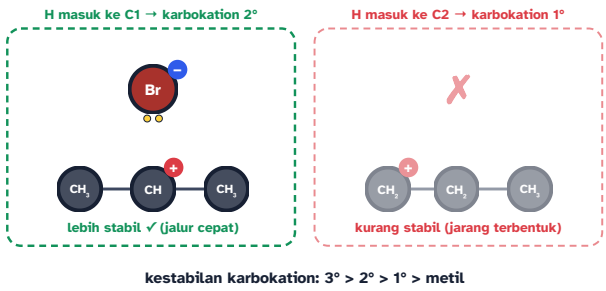
Jawabannya: di C2. H masuk lebih dulu sebagai elektrofil. Bila H masuk ke C1, muatan positif tertinggal di C2 (karbokation sekunder) yang lebih stabil daripada karbokation primer. Jalur yang lebih stabil jauh lebih cepat, sehingga Br^- menempel di C2. Lihat animasinya di bawah.



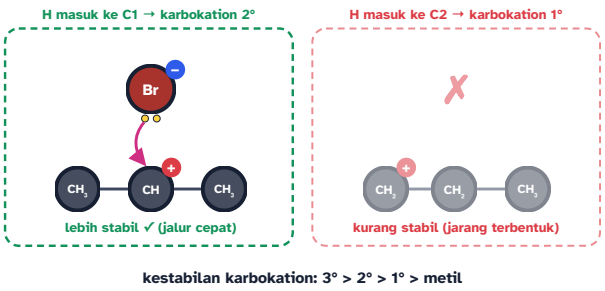
Langkah 1. Propena punya ikatan π (biru) yang kaya elektron, jadi berperan sebagai nukleofil. Molekul HBr polar: atom H bermuatan δ+ adalah elektrofil.



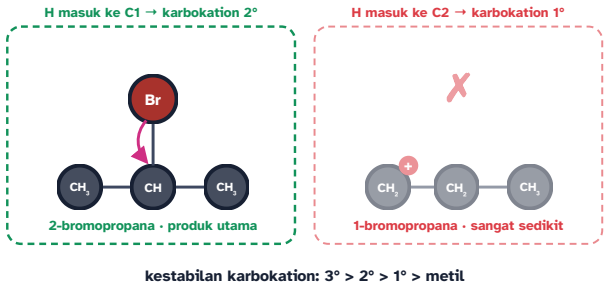
Langkah 2. Tahap 1 (lambat): pasangan elektron π menyerang H (panah 1). Bersamaan, pasangan elektron ikatan H–Br pindah seluruhnya ke Br (panah 2). Terbentuk karbokation dan Br^-.



Langkah 3. H bisa masuk ke C1 atau C2. Bila masuk ke C1, muatan + berada di C2 yang diapit dua gugus alkil: **karbokation sekunder**, lebih stabil. Bila masuk ke C2, terbentuk karbokation primer yang kurang stabil dan energi aktivasinya lebih tinggi.



Langkah 4. Tahap 2 (cepat): Br^- (nukleofil) memakai pasangan elektron bebasnya untuk berikatan dengan C^+ (elektrofil).



Langkah 5. Hasilnya **2-bromopropana** sebagai produk utama: $\mathrm{CH_2{=}CHCH_3 + HBr \quad CH_3CHBrCH_3}$. H masuk ke karbon yang sudah punya lebih banyak H. Inilah **aturan Markovnikov**.

ATURAN MARKOVNIKOV (DAN ALASANNYA)

Pada adisi HX atau $\mathrm{H_2O}$ ke alkena **tak simetris**, atom H menempel pada atom C ikatan rangkap yang **sudah mengikat lebih banyak atom H**. Versi modernnya: reaksi berjalan melalui **karbokation yang paling stabil**.

$$\text{kestabilan karbokation: } 3^\circ > 2^\circ > 1^\circ > \text{metil}$$

Gugus alkil "menyumbang" kerapatan elektron ke karbon bermuatan positif (efek induktif dan hiperkonjugasi), sehingga muatannya tersebar dan lebih stabil.

TRIK KAK TIRTA

"**Yang kaya makin kaya.**" Karbon yang sudah punya banyak H mendapat H lagi. Jembatan keledai yang sah, tetapi ingat alasannya: semua ini soal kestabilan karbokation.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1870, kimiawan Rusia **Vladimir Markovnikov** dari Kazan merumuskan aturan ini dari banyak percobaan, puluhan tahun sebelum orang tahu tentang elektron, apalagi karbokation! Penjelasan lewat kestabilan karbokation baru datang pada 1930-an. Aturan empiris yang baik sering "mendahului" teorinya.

KERJAKAN BERSAMA

Adisi pada 2-metilpropena

Ramalkan produk utama adisi HBr pada 2-metilpropena, $(CH_3)_2C{=}CH_2$, dan jelaskan alasannya.

1. Dua kemungkinan: H masuk ke CH_2 (ujung) atau ke C yang mengikat dua CH_3.
2. H ke CH_2 → muatan + di C yang mengikat tiga gugus alkil: karbokation **tersier** $(CH_3)_3C^+$.
3. H ke C tengah → karbokation primer $(CH_3)_2CHCH_2^+$, jauh kurang stabil.
4. Jalur tersier jauh lebih cepat; Br^- menyerang karbokation tersier.

Produk utama: 2-bromo-2-metilpropana, $(CH_3)_3CBr$ (t-butil bromida). Sesuai aturan Markovnikov: H ke CH_2 yang sudah punya dua H.

Adisi juga bekerja dengan pereaksi lain. Dengan **hidrogen** dan katalis nikel (±150 °C), alkena menjadi alkana: **hidrogenasi**. Dengan **uap air** dan katalis asam fosfat (±300 °C, 60–70 atm), etena menjadi etanol: **hidrasi**. Propena yang dihidrasi mengikuti Markovnikov dan menghasilkan 2-propanol, alkohol yang juga dipakai dalam cairan pembersih tangan dan kapas alkohol.

KIMIA NUSANTARA · MARGARIN DARI SAWIT

Indonesia adalah produsen minyak sawit terbesar di dunia. Minyak nabati cair kaya ikatan C=C. Dengan **hidrogenasi** (adisi H_2, katalis nikel), sebagian ikatan rangkap menjadi ikatan tunggal sehingga minyak memadat menjadi margarin dan mentega putih. Kekurangannya, hidrogenasi parsial dapat menghasilkan **lemak trans** yang buruk bagi jantung. Karena itu industri kini lebih banyak memakai fraksinasi dan interesterifikasi minyak sawit.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Aturan Markovnikov **tidak** berlaku untuk semua adisi. Pada alkena simetris (etena, 2-butena) tidak ada pilihan. Pada adisi H_2 atau Br_2, kedua atom yang masuk sama. Dan bila HBr direaksikan dengan alkena bersama **peroksida**, mekanismenya berubah menjadi radikal dan hasilnya kebalikan Markovnikov (anti-Markovnikov).

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

ION BROMONIUM DAN AIR YANG "IKUT CAMPUR"

Pada adisi Br_2, zat antaranya sebenarnya bukan karbokation terbuka, melainkan **ion bromonium**: cincin tiga anggota C–Br^+–C. Cincin ini menutupi satu sisi molekul, sehingga Br^- menyerang dari sisi **berlawanan** (adisi *anti*). Itulah sebabnya sikloheksena + Br_2 menghasilkan *trans*-1,2-dibromosikloheksana saja.

Pada uji **air** brom, molekul air yang jumlahnya jauh lebih banyak ikut menyerang ion bromonium. Produk utamanya justru 2-bromoetanol, $BrCH_2CH_2OH$, bukan 1,2-dibromoetana. Warnanya tetap hilang, jadi kesimpulan ujinya sama.

Pada adisi anti-Markovnikov (HBr + peroksida), radikal $Br^\bullet$ menempel di C1 agar terbentuk *radikal* sekunder yang lebih stabil.

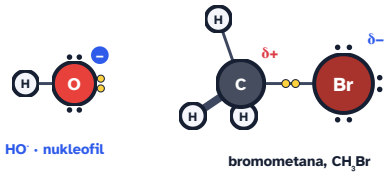
34.5 Substitusi nukleofilik: SN2 dan SN1 (serta saingannya, eliminasi)

Pada haloalkana, ikatan C–X (X = Cl, Br, I) bersifat polar: halogen menarik elektron sehingga karbon menjadi δ+. Karbon δ+ ini adalah sasaran empuk bagi nukleofil seperti OH^-, CN^-, atau H_2O. Nukleofil masuk, halogen keluar sebagai ion halida: **substitusi nukleofilik**, disingkat S_N. Ada dua cara melakukannya, dan perbedaannya mirip dua gaya bertukar pasangan dansa.

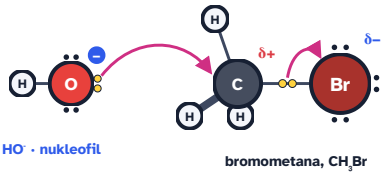
Bahasa sederhana · Gaya pertama: penari baru datang dari belakang dan **langsung** menggantikan penari lama dalam satu gerakan (SN2). Gaya kedua: penari lama **pergi dulu**, pasangannya berdiri sendirian sebentar, baru penari baru datang (SN1).

SN2: satu gerakan, serangan dari belakang

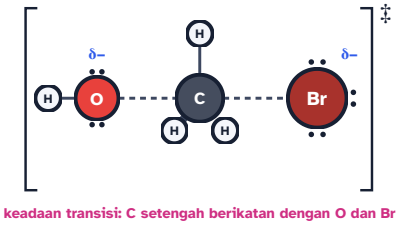
Pada **SN2**, nukleofil menyerang karbon dari arah **berlawanan** dengan halogen. Ikatan baru terbentuk bersamaan dengan putusnya ikatan lama, dalam **satu tahap**. Tiga atom lain pada karbon terbalik seperti payung yang tertiup angin.



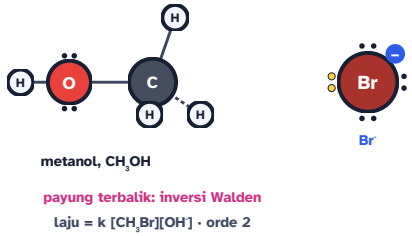
Langkah 1. Nukleofil OH^- mendekati bromometana dari **belakang**, berlawanan dengan Br. Sisi depan dihalangi awan elektron atom Br yang besar dan bermuatan δ–. (Ikatan tebal = mengarah ke kita; garis putus = menjauhi kita.)



Langkah 2. Dua panah sekaligus: pasangan elektron bebas O membentuk ikatan baru ke C, dan pasangan elektron ikatan C–Br pindah seluruhnya ke Br.



Langkah 3. Keadaan transisi (bertanda ‡): C setengah berikatan dengan O dan Br, sedangkan tiga atom H berada pada satu bidang. Ini bukan zat yang bisa diisolasi, hanya "puncak bukit" energi.

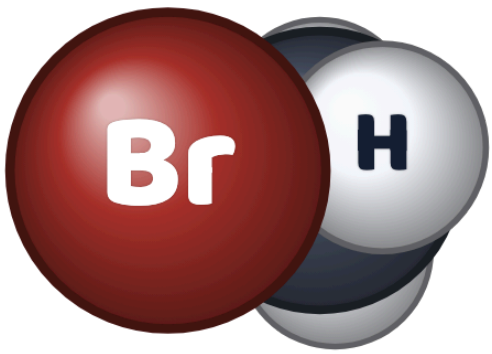


Langkah 4. Hasilnya metanol dan Br^-. Ketiga atom H kini mengarah ke kanan: konfigurasi **terbalik** (inversi Walden). Karena dua partikel bertemu dalam satu-satunya tahap, laju $= k[CH_3Br][OH^-]$: orde 2. Itulah angka "2" pada S_N2.

Serangan dari belakang butuh "jalan masuk". Bandingkan bromometana dengan t-butil bromida di bawah ini. Pada t-butil bromida, sisi belakang karbon ditutupi tiga gugus metil yang gemuk. Fenomena ini disebut **halangan sterik**. Laju SN2 relatif kira-kira: metil 30 : primer 1 : sekunder 0,02 : tersier ≈ 0.

MOLEKUL 3D

Serangan dari belakang: siapa yang terhalang?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

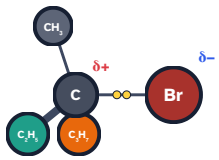
Bromometana CH_3Br Mr ≈ 94,94 PubChem ↗

Haloalkana primer; contoh klasik reaksi SN2 (serangan dari belakang).

Model isi ruang menunjukkan "ukuran asli" atom. Putar setiap molekul sampai atom halogen (merah tua atau hijau) berada tepat di belakang karbon, lalu lihat sisi yang berlawanan. Pada bromometana, karbonnya masih terlihat; pada t-butil bromida, karbon pusat tertutup rapat oleh tiga gugus metil. Nukleofil mana yang bisa masuk?

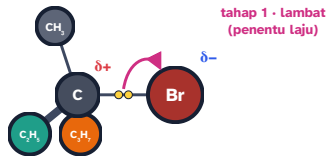
SN1: tunggu karbokation terbentuk dulu

Haloalkana tersier tidak bisa diserang dari belakang. Namun, ia punya jalan lain: ikatan C–X putus sendiri (heterolitik) lebih dulu, membentuk **karbokation tersier** yang relatif stabil. Setelah itu, nukleofil datang dengan cepat. Karena hanya satu molekul yang terlibat di tahap paling lambat, mekanisme ini disebut **SN1**.



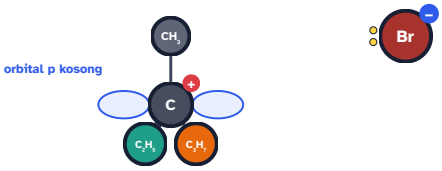
3-bromo-3-metilheksana (haloalkana tersier)

Langkah 1. Substrat tersier, 3-bromo-3-metilheksana, dalam air (pelarut polar protik). Karbon pusatnya mengikat empat gugus berbeda, jadi molekul ini **kiral**.



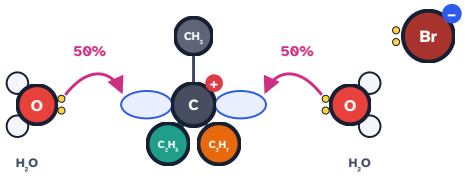
3-bromo-3-metilheksana (haloalkana tersier)

Langkah 2. Tahap 1 (lambat): ikatan C–Br putus heterolitik tanpa bantuan nukleofil. Pelarut polar "memeluk" ion-ion yang terbentuk. Tahap inilah yang menentukan laju.



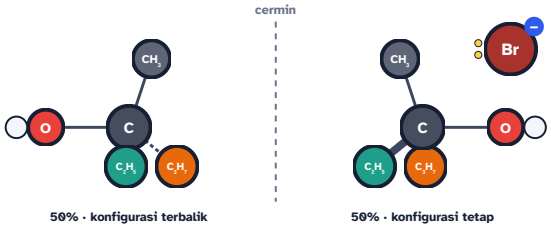
karbokation tersier: datar (120°), orbital p kosong

Langkah 3. Terbentuk **karbokation tersier** yang datar (sudut 120°) dengan orbital p kosong di kedua sisinya. Tiga gugus alkil membantu menstabilkan muatan positifnya.



karbokation tersier: datar (120°), orbital p kosong

Langkah 4. Tahap 2 (cepat): molekul air menyerang orbital p kosong dari kiri *atau* kanan dengan peluang sama. (Ion $\mathrm{R{-}OH_2^+}$ yang terbentuk lalu melepas $\mathrm{H^+}$ ke molekul air lain.)



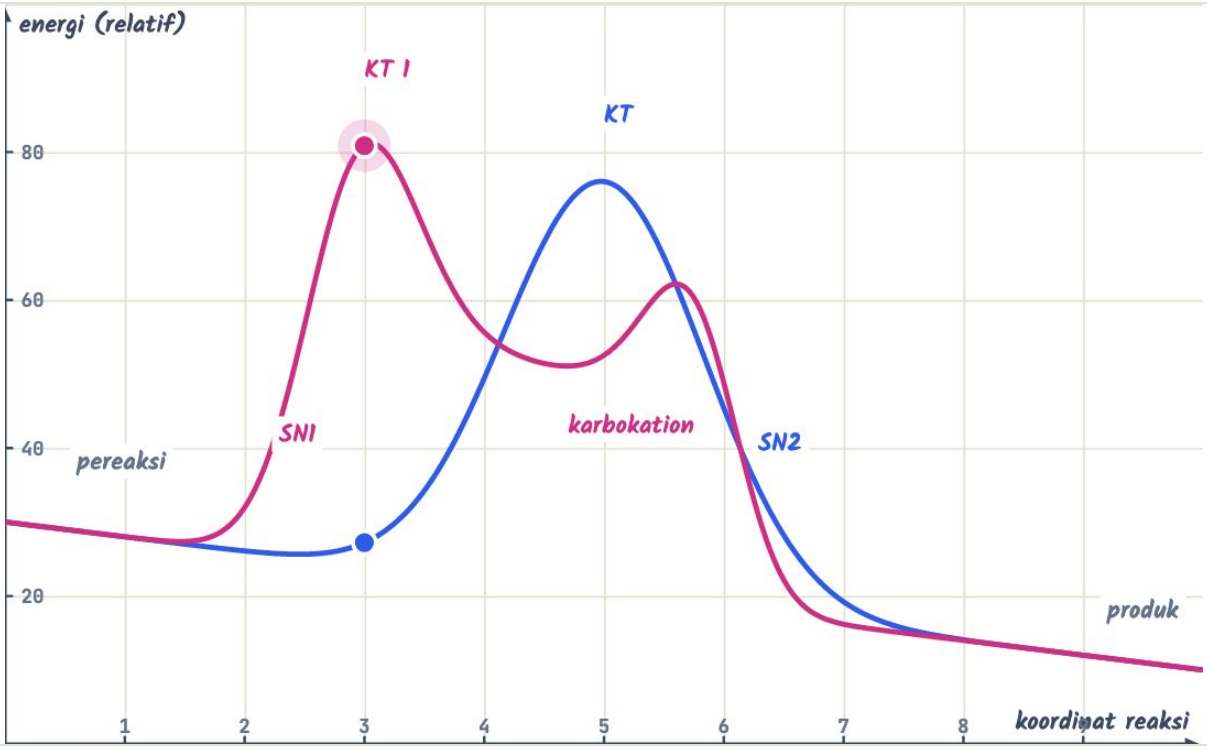
Langkah 5. Hasilnya dua alkohol yang saling bayangan cermin (enantiomer), 50 : 50: **campuran rasemat**. Nukleofil tidak ikut tahap lambat, jadi laju $= k[\mathrm{RBr}]$: orde 1. Itulah angka "1" pada S_N1.

GRAFIK HIDUP **Profil energi: SN2 satu bukit, SN1 dua bukit**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-34

$$E = f(\text{koordinat reaksi})$$

$$\text{posisi } 3: \quad E_{\text{SN1}} \approx 80{,}85, \quad E_{\text{SN2}} \approx 27{,}22$$



SN1: puncak tertinggi = keadaan transisi tahap lambat (C–Br putus)

energi jalur SN1	energi jalur SN2
81	27

Seret titik magenta sepanjang jalur. SN2 hanya punya satu puncak (KT = keadaan transisi). SN1 punya dua puncak dengan lembah di antaranya: lembah itu adalah karbokation, zat antara yang benar-benar terbentuk. Puncak yang lebih tinggi menentukan laju.

Ciri	SN2	SN1
Jumlah tahap	1 tahap (serempak)	2 tahap, lewat karbokation
Hukum laju	$r = k[\text{RX}][\text{Nu}]$, orde 2	$r = k[\text{RX}]$, orde 1
Substrat yang disukai	metil > primer > sekunder (tersier tidak)	tersier > sekunder (metil, primer tidak)

Nukleofil	kuat, sering bermuatan (OH^-, CN^-)	lemah pun cukup (H_2O, etanol)
Pelarut	polar aprotik (aseton, DMSO)	polar protik (air, alkohol)
Stereokimia	inversi (payung terbalik)	rasemisasi (campuran 50 : 50)

RUMUS HIDUP

Hukum laju substitusi nukleofilik

$$r = k\,[\mathrm{RX}]\,[\mathrm{Nu}]^n$$

Laju sebanding dengan konsentrasi haloalkana. Nukleofil hanya ikut menentukan laju bila ia terlibat di tahap paling lambat: n = 1 untuk SN2, n = 0 untuk SN1.

- k Tetapan laju
- $[\mathrm{RX}]$ Konsentrasi haloalkana mol/L
- $[\mathrm{Nu}]$ Konsentrasi nukleofil mol/L
- n Orde terhadap nukleofil (0 = SN1, 1 = SN2)
- r Laju reaksi mol L⁻¹ s⁻¹

LAJU REAKSI

2×10^{-4} mol L⁻¹ s⁻¹

SN2: RX dan Nu bertumbukan dalam satu tahap

Dengan n = **1**: menggandakan [Nu] membuat laju ×**2**, menggandakan [RX] membuat laju ×2.

Cek satuan: mol L^{-1} s^{-1} (satuan k menyesuaikan orde reaksi)

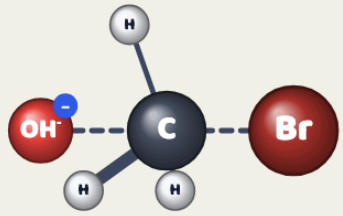
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAJU-SN

LAB MINI

Arena SN1 vs SN2

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-34

bromometana



keadaan transisi ‡

Peluang jalur

SN2		100%
SN1		<1%
E2		<1%
E1		<1%

reaksi berlangsung...

OH^- + bromometana dalam aseton

Jalur pemenang	Pembagian produk	Laju	Produk utama	Ciri
? (tekan ▶ Jalankan)	–	–	–	–

Pilih substrat, nukleofil, dan pelarut, lalu tekan ▶. Siapa yang menang: SN2, SN1, atau justru eliminasi? Coba buat SN2 menang telak, lalu ubah satu hal saja sampai SN1 yang menang. Apa yang terjadi bila nukleofil mencoba menyerang haloalkana tersier dari belakang? Nyalakan "panaskan" untuk melihat eliminasi merebut panggung.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1896, kimiawan Latvia **Paul Walden** menemukan bahwa rangkaian substitusi dapat mengubah asam malat menjadi bayangan cerminnya. Saat itu belum ada yang tahu sebabnya. Empat puluh tahun kemudian, **Edward Hughes** dan **Christopher Ingold** di London mengukur laju ratusan reaksi, memperkenalkan lambang S_N1 dan S_N2, dan menjelaskan bahwa "inversi Walden" adalah tanda serangan dari belakang.

MITOS

"SN1 berarti satu tahap, SN2 berarti dua tahap."

FAKTA

Kebalikannya! SN **2** berlangsung dalam **satu** tahap, SN **1** dalam **dua** tahap. Angkanya menyatakan berapa partikel yang terlibat di tahap penentu laju (molekularitas): dua untuk SN2, satu untuk SN1.

MITOS

"Nukleofil yang lebih kuat selalu mempercepat substitusi."

FAKTA

Hanya untuk SN2. Pada SN1, nukleofil menunggu karbokation terbentuk, jadi menambah atau mengganti nukleofil tidak mengubah laju (orde nol terhadap Nu).

Eliminasi: saingan diam-diam

Nukleofil seperti $\mathrm{OH^-}$ juga sebuah **basa**. Daripada menyerang karbon, ia bisa merebut atom H dari karbon **tetangga** (karbon β). Pasangan elektron C–H lalu membentuk ikatan π, dan halogen pergi: terbentuk alkena. Ini **eliminasi**. Seperti substitusi, ada dua versinya: **E2** (satu tahap, basa kuat, laju $= k[\mathrm{RX}][\mathrm{B^-}]$) dan **E1** (dua tahap lewat karbokation, laju $= k[\mathrm{RX}]$).

SIAPA MENANG: SUBSTITUSI ATAU ELIMINASI?

- **Eliminasi** diuntungkan oleh: suhu tinggi, basa kuat dan pekat, pelarut etanol (bukan air), dan substrat tersier.
- **Substitusi** diuntungkan oleh: suhu rendah, larutan encer dalam air, dan substrat metil atau primer.
- **Aturan Zaitsev**: bila ada beberapa kemungkinan alkena, produk utamanya adalah alkena yang **lebih tersubstitusi** (ikatan rangkapnya mengikat lebih banyak gugus alkil), karena lebih stabil.

Contoh resep klasik: KOH **dalam air**, hangat → substitusi (alkohol). KOH **dalam etanol**, dipanaskan → eliminasi (alkena).

KERJAKAN BERSAMA **Eliminasi 2-bromobutana**

2-Bromobutana, $CH_3CHBrCH_2CH_3$, dipanaskan dengan KOH dalam etanol. Ramalkan alkena yang terbentuk dan tentukan produk utamanya.

1. Karbon pembawa Br adalah C2. Karbon tetangganya (β) adalah C1 dan C3; keduanya punya atom H.
2. H dari C1 direbut → ikatan rangkap C1=C2: but-1-ena, $CH_2{=}CHCH_2CH_3$ (ikatan rangkap mengikat 1 gugus alkil).
3. H dari C3 direbut → ikatan rangkap C2=C3: but-2-ena, $CH_3CH{=}CHCH_3$ (ikatan rangkap mengikat 2 gugus alkil).
4. Menurut aturan Zaitsev, alkena yang lebih tersubstitusi lebih stabil dan menjadi produk utama.

Produk utama but-2-ena (sebagian besar isomer *trans*, sekitar 80% bersama *cis*-nya); but-1-ena hanya produk minor (±20%).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PELARUT YANG "MEMELUK" NUKLEOFIL

Mengapa SN2 lebih cepat dalam aseton atau DMSO daripada dalam air? Pelarut **protik** (air, alkohol) punya H yang terikat pada O. H ini membentuk ikatan hidrogen yang "memeluk" anion nukleofil, sehingga nukleofil itu lamban. Pelarut **aprotik** polar melarutkan garamnya tetapi membiarkan anion "telanjang" dan galak. Sebaliknya, SN1 butuh pelarut protik untuk menstabilkan karbokation dan anion yang lahir di tahap lambat.

Stereokimia SN2 dapat dibuktikan: (*R*)-2-bromobutana + OH^- menghasilkan (S)-butan-2-ol saja. Urutan prioritas CIP tetap (OH menggantikan Br di peringkat pertama), tetapi susunan ruangnya terbalik, sehingga label *R* berganti menjadi S. Pada E2, H yang direbut dan gugus pergi harus berada pada posisi *anti*-periplanar (segaris, berlawanan arah).

34.6 Oksidasi alkohol dan peta sintesis

Tapai singkong yang disimpan terlalu lama berubah rasa: mula-mula manis, lalu beraroma alkohol, akhirnya masam. Ragi mengubah gula menjadi etanol, kemudian bakteri asam asetat **mengoksidasi** etanol menjadi asam asetat. Kimiawan melakukan hal yang sama di laboratorium dengan oksidator seperti **kalium dikromat(VI)** yang diasamkan, $K_2Cr_2O_7/H^+$.

Dalam kimia organik, **oksidasi** berarti molekul **mendapat O** atau **kehilangan H**; reduksi kebalikannya. Saat alkohol teroksidasi, atom H pada gugus OH dan atom H pada karbon pembawa OH lepas bersama, lalu terbentuk ikatan C=O. Jadi kuncinya: **berapa atom H yang menempel pada karbon pembawa OH?**

Alkohol primer

C pembawa OH punya 2 H

CH_3CH_2OH
etanol

[O]

CH_3CHO
etanal (aldehida)

[O], refluks

CH_3COOH
asam etanoat (asam karboksilat)



hijau

Alkohol sekunder

C pembawa OH punya 1 H

$(CH_3)_2CHOH$
2-propanol

[O]

$(CH_3)_2CO$
propanon (keton)

berhenti di keton



hijau

Alkohol tersier

C pembawa OH tanpa H

$(CH_3)_3COH$
2-metil-2-propanol

✗

tidak bereaksi

tidak ada H untuk dilepas



jingga

Tangga oksidasi alkohol dengan $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$ encer, dipanaskan. Warna jingga ion dikromat, $Cr_2O_7^{2-}$, berubah menjadi hijau ion Cr^{3+} hanya bila alkohol teroksidasi. [O] = oksigen dari oksidator.

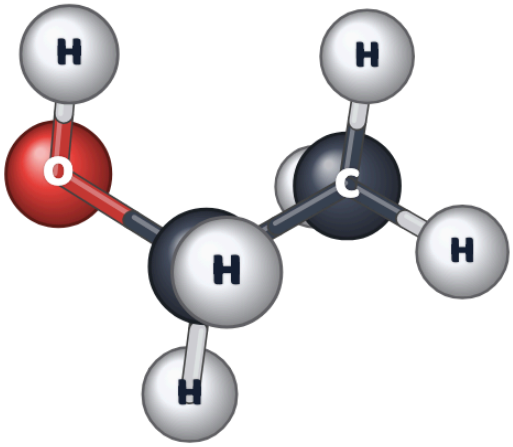
ATURAN · OKSIDASI ALKOHOL

- **Alkohol primer** → **aldehida** → **asam karboksilat**. Untuk berhenti di aldehida, aldehida (titik didih rendah) segera **didistilasi** keluar. Untuk sampai ke asam, campuran dipanaskan dengan **refluks** dan oksidator berlebih.
- **Alkohol sekunder** → **keton**, lalu berhenti.
- **Alkohol tersier** tidak teroksidasi (warna jingga tetap), karena karbon pembawa OH tidak punya H.

Persamaan ion lengkap untuk etanol menjadi asam etanoat:

$$3\,C_2H_5OH + 2\,Cr_2O_7^{2-} + 16\,H^+ \longrightarrow 3\,CH_3COOH + 4\,Cr^{3+} + 11\,H_2O$$

MOLEKUL 3D **Naik tangga oksidasi**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etanol C_2H_6O **Mr ≈ 46,07** **PubChem ↗**

Alkohol pada tapai dan hand sanitizer; juga campuran bensin (bioetanol).

Urutkan etanol → asetaldehida (etanal) → asam asetat. Hitung atom H pada karbon yang mengikat O di setiap tahap: 2, lalu 1, lalu 0. Sudut di sekitar C=O sekitar 120° (datar), berbeda dengan C–OH pada alkohol yang tetrahedral (±109,5°). Bandingkan juga 2-propanol dengan aseton.

COBA SENDIRI **Merancang jalan menuju aseton**

Dari propena, $CH_2{=}CHCH_3$, rancang sintesis dua tahap untuk membuat propanon (aseton), pelarut penghapus cat kuku. Sebutkan pereaksi, kondisi, dan jenis reaksinya. Apa yang terjadi bila tahap pertama justru menghasilkan 1-propanol?

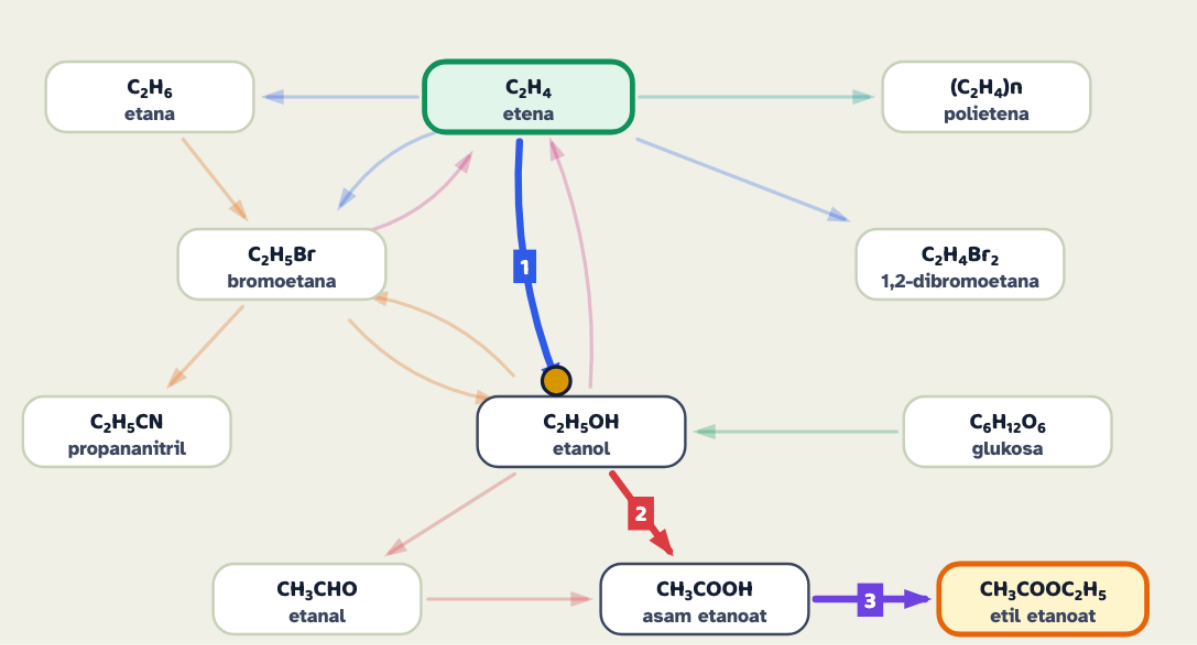
1. Mulailah dari belakang: keton dibuat dari oksidasi **alkohol sekunder**, yaitu 2-propanol, $CH_3CH(OH)CH_3$.
2. Tahap 1 · hidrasi (adisi elektrofilik): propena + uap air, katalis H_3PO_4, panas dan tekanan tinggi. Menurut Markovnikov, H masuk ke C1 dan OH ke C2 → 2-propanol.
3. Tahap 2 · oksidasi: 2-propanol + $K_2Cr_2O_7/H_2SO_4$, dipanaskan → propanon, CH_3COCH_3. Warna jingga berubah hijau.
4. Bila tahap 1 menghasilkan 1-propanol (alkohol primer), oksidasinya memberi propanal lalu asam propanoat, bukan aseton.

Propena $\xrightarrow{H_2O,\ H_3PO_4}$ 2-propanol $\xrightarrow{K_2Cr_2O_7/H^+}$ propanon. Kuncinya ada di aturan Markovnikov: posisi OH menentukan apakah oksidasi berakhir di keton atau asam.

Contoh di atas adalah sebuah **peta sintesis**: rangkaian reaksi yang menghubungkan bahan murah dengan produk berharga. Kimiawan obat, pabrik aroma, dan industri petrokimia menyusun peta seperti ini setiap hari. Jelajahi peta mini berikut yang berpusat pada etena dan etanol, dua bahan baku penting di Indonesia.

LAB MINI Peta Sintesis: dari etena ke mana saja?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-34



1. etena → etanol: uap H_2O, H_3PO_4, 300 °C, 60 atm (adisi)
2. etanol → asam etanoat: $K_2Cr_2O_7/H^+$ berlebih, refluks (oksidasi)
3. asam etanoat → etil etanoat: + etanol, H_2SO_4 pekat, panas (kondensasi)

Jumlah tahap	Jenis reaksi di rute
3	adisi, oksidasi, kondensasi

Pilih zat awal dan zat tujuan, atau ketuk sebuah zat di peta untuk menjadikannya tujuan. Peta mencari rute terpendek dan menampilkan pereaksi, kondisi, serta jenis setiap reaksi (warna panah). Tantangan: buat etil etanoat (aroma buah) dari etana. Berapa tahap yang dibutuhkan, dan jenis reaksi apa saja yang terlibat?

TRIK KAK TIRTA · BEKERJA MUNDUR

Merancang sintesis itu seperti mencari jalan pulang dari pasar: mulai dari **tujuan**, lalu tanya "zat apa yang bisa langsung menjadi ini?". Asam karboksilat? Dari alkohol primer. Alkohol? Dari alkena (hidrasi) atau haloalkana (substitusi). Kimiawan menyebutnya *analisis retrosintesis*.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BENZENA: KAYA ELEKTRON, TETAPI MENOLAK ADISI

Benzena punya enam elektron π, tetapi **tidak** memudarkan air brom. Elektron π-nya tersebar merata di seluruh cincin (aromatik), memberi kestabilan ekstra sekitar 150 kJ/mol. Adisi akan merusak cincin itu, jadi benzena memilih **substitusi elektrofilik aromatik**: satu H diganti, cincin aromatik tetap utuh.

Contoh nitrasi (campuran $\mathrm{HNO_3}$ pekat dan $\mathrm{H_2SO_4}$ pekat, di bawah ±55 °C):

1. Pembentukan elektrofil (ion nitronium):

$$\mathrm{HNO_3 + 2\,H_2SO_4 \longrightarrow NO_2^+ + H_3O^+ + 2\,HSO_4^-}$$

2. Elektron π cincin menyerang $\mathrm{NO_2^+}$, membentuk karbokation bercincin (ion arenium) yang muatannya tersebar di tiga karbon. Tahap ini lambat karena aromatisitas hilang sementara.
3. $\mathrm{HSO_4^-}$ merebut $\mathrm{H^+}$ dari karbon yang mengikat $\mathrm{NO_2}$; pasangan elektron C–H kembali ke cincin, aromatisitas pulih. Total:

$$\mathrm{C_6H_6 + HNO_3 \longrightarrow C_6H_5NO_2 + H_2O}$$

Pola yang sama berlaku untuk brominasi ($\mathrm{Br_2}$ + katalis $\mathrm{FeBr_3}$) dan alkilasi Friedel–Crafts. Nitrobenzena adalah langkah awal pembuatan anilina untuk zat warna dan obat.

Kimia di sekitarmu

Petrokimia Cilegon

Etena dan propena dari perengkahan nafta diolah lewat adisi, eliminasi, dan polimerisasi menjadi plastik, pipa PVC, dan serat.

Margarin

Hidrogenasi (adisi $\mathrm{H_2}$, katalis nikel) memadatkan minyak nabati. Makin sedikit ikatan C=C, makin tinggi titik lelehnya.

Pembersih tangan

Etanol dari fermentasi tetes tebu atau 2-propanol dari hidrasi propena (Markovnikov), dipakai pada kadar ±60–80% untuk merusak membran kuman.

Tapai yang makin masam

Ragi mengubah gula menjadi etanol, lalu bakteri asam asetat mengoksidasi etanol menjadi asam asetat: oksidasi alkohol primer di dapurmu.

Uji napas pengemudi

Alat lama memakai dikromat jingga yang menjadi hijau saat mengoksidasi etanol napas. Alat modern mengoksidasi etanol di sel bahan bakar dan mengukur arus listriknya.

Pabrik obat

Parasetamol dan aspirin dibuat lewat rangkaian substitusi dan kondensasi. Ahli kimia medisinal merancang peta sintesis yang hemat langkah dan berekonomi atom tinggi.

MITOS

"Alkohol tersier paling mudah dioksidasi karena karbonnya paling banyak."

FAKTA

Justru sebaliknya. Oksidasi alkohol butuh atom H pada karbon pembawa OH. Alkohol tersier tidak punya H itu, sehingga dikromat tetap jingga.

MITOS

"Oksidasi zat organik selalu berarti dibakar."

FAKTA

Pembakaran hanyalah oksidasi paling "kasar" sampai
CO_2
dan air. Oksidasi lembut (dikromat, enzim di hati) hanya mengubah satu gugus, misalnya etanol → etanal → asam asetat.

Cek Cepat

Reaksi $CH_3CH_2Br + OH^- \longrightarrow CH_3CH_2OH + Br^-$ termasuk jenis reaksi ...

- adisi
- eliminasi
- substitusi
- oksidasi

Dalam gelap, zat manakah yang langsung memudarkan warna air brom?

- propena
- propana
- benzena
- etanol

2-Propanol dipanaskan dengan $K_2Cr_2O_7$ yang diasamkan. Hasil utamanya adalah ...

propanal

asam propanoat

propena

propanon

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: minyak mana yang paling "tak jenuh"?

Bahan: minyak goreng sawit, minyak kelapa, mentega atau margarin, air, larutan povidon-iodin (antiseptik luka berwarna cokelat), 4 gelas kecil bening, sendok teh, tusuk gigi atau sedotan, mangkuk berisi air hangat dari dispenser (±50 °C), alas koran, sarung tangan plastik.

1. Tuang 1 sendok teh setiap sampel ke gelas berbeda: minyak sawit, minyak kelapa, mentega (lelehkan dulu dengan merendam gelasnya di air hangat), dan air sebagai pembanding.
2. Teteskan 2 tetes povidon-iodin ke setiap gelas, lalu aduk 30 detik dengan tusuk gigi yang berbeda.
3. Letakkan keempat gelas di dalam mangkuk air hangat. Amati dan foto warnanya setiap 2 menit selama 10 menit.
4. Bila warna cokelat memudar, tambahkan 1 tetes lagi dan aduk. Catat berapa tetes sampai warna cokelat tidak pudar lagi.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Povidon-iodin menodai kulit, kain, dan meja, jadi pakai alas koran dan sarung tangan. Jangan dicicipi dan jauhkan dari mata; orang yang alergi iodin jangan ikut menangani. Pakai air hangat dari dispenser, jangan memanaskan minyak di atas api. Minyak bekas diserap tisu lalu dibuang ke tempat sampah, bukan ke wastafel. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Sampel mana yang paling cepat memudarkan iodin? Hubungkan dengan jumlah ikatan C=C pada lemaknya. Mengapa gelas berisi air tetap cokelat? Ingat Lab Mini "Tetes demi Tetes" di subbab 34.4.

RINGKASAN KILAT **Bab 34 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menggolongkan reaksi organik menjadi **substitusi, adisi, eliminasi, oksidasi–reduksi,** dan **kondensasi**, serta menghitung **ekonomi atom**-nya
- membedakan pemutusan ikatan **homolitik** dan **heterolitik**, mengenali **nukleofil** dan **elektrofil**, dan membaca **panah lengkung**

- menjelaskan mekanisme **substitusi radikal** dan **adisi elektrofilik**, termasuk **aturan Markovnikov** dan uji air brom
- membandingkan **SN1** dan **SN2** (orde, tahap, stereokimia, substrat, pelarut) serta eliminasi **E1/E2** dengan aturan Zaitsev
- meramalkan hasil **oksidasi alkohol** primer, sekunder, dan tersier, lalu merancang **peta sintesis** sederhana

🔑 Istilah kunci

Substitusi · Adisi · Eliminasi · ekonomi atom · Mekanisme reaksi · Pemutusan homolitik · radikal bebas · Pemutusan heterolitik · Nukleofil · Elektrofil · substitusi radikal bebas · inisiasi · propagasi · terminasi · ikatan π · adisi elektrofilik

🧮 Rumus penting

$$\%\,\mathrm{EA} = \frac{M_r \text{ produk yang diinginkan}}{\sum M_r \text{ pereaksi}} \times 100\%$$

Ekonomi atom. Persentase massa atom pereaksi yang benar-benar masuk ke produk yang kita inginkan. Sisanya menjadi produk samping alias limbah.

$$\%\,\text{produk } 2^\circ = \frac{n_2\, r}{n_1 + n_2\, r} \times 100\%$$

Selektivitas klorinasi radikal. Peluang klorin menempel di karbon sekunder = jumlah H sekunder dikali reaktivitasnya, dibagi total 'tiket undian' semua atom H.

$$r = k\,[\mathrm{RX}]\,[\mathrm{Nu}]^n$$

Hukum laju substitusi nukleofilik. Laju sebanding dengan konsentrasi haloalkana. Nukleofil hanya ikut menentukan laju bila ia terlibat di tahap paling lambat: n = 1 untuk SN2, n = 0 untuk SN1.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Jangan menebak jenis reaksi hanya dari jumlah zatnya.
- Panah lengkung menunjukkan gerak elektron, bukan gerak atom.
- Uji air brom hanya adil bila dilakukan di tempat gelap.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=34

Teka-teki untuk Bab 35

Kantong plastik dan karet gelang sama-sama "raksasa" rantai panjang, berisi ribuan unit yang bergandengan. Padahal bahan awalnya hanya molekul kecil seperti etena dan isoprena. Bagaimana molekul kecil bisa bergandengan sampai ribuan, tanpa ada yang menyambungkannya satu per satu?

▼ **Intip petunjuk**

Ingat **reaksi berantai** di subbab 34.3 dan **adisi** di 34.4. Sebuah radikal menyerang ikatan π etena, menempel, dan menghasilkan radikal baru di ujung rantai. Radikal baru itu menyerang etena berikutnya, dan seterusnya, ribuan kali, sampai terminasi. Inilah **polimerisasi adisi**, kisah utama Bab 35.

35 Polimer & Material: Rantai Raksasa dari Manik-manik Kecil

Karet gelang, botol minum, benang sutra, dan nasi di piringmu ternyata bersaudara: semuanya molekul raksasa yang tersusun dari ribuan molekul kecil yang bergandengan. Bagaimana mereka bergandengan, dan mengapa plastik begitu awet sampai menjadi masalah di laut kita?

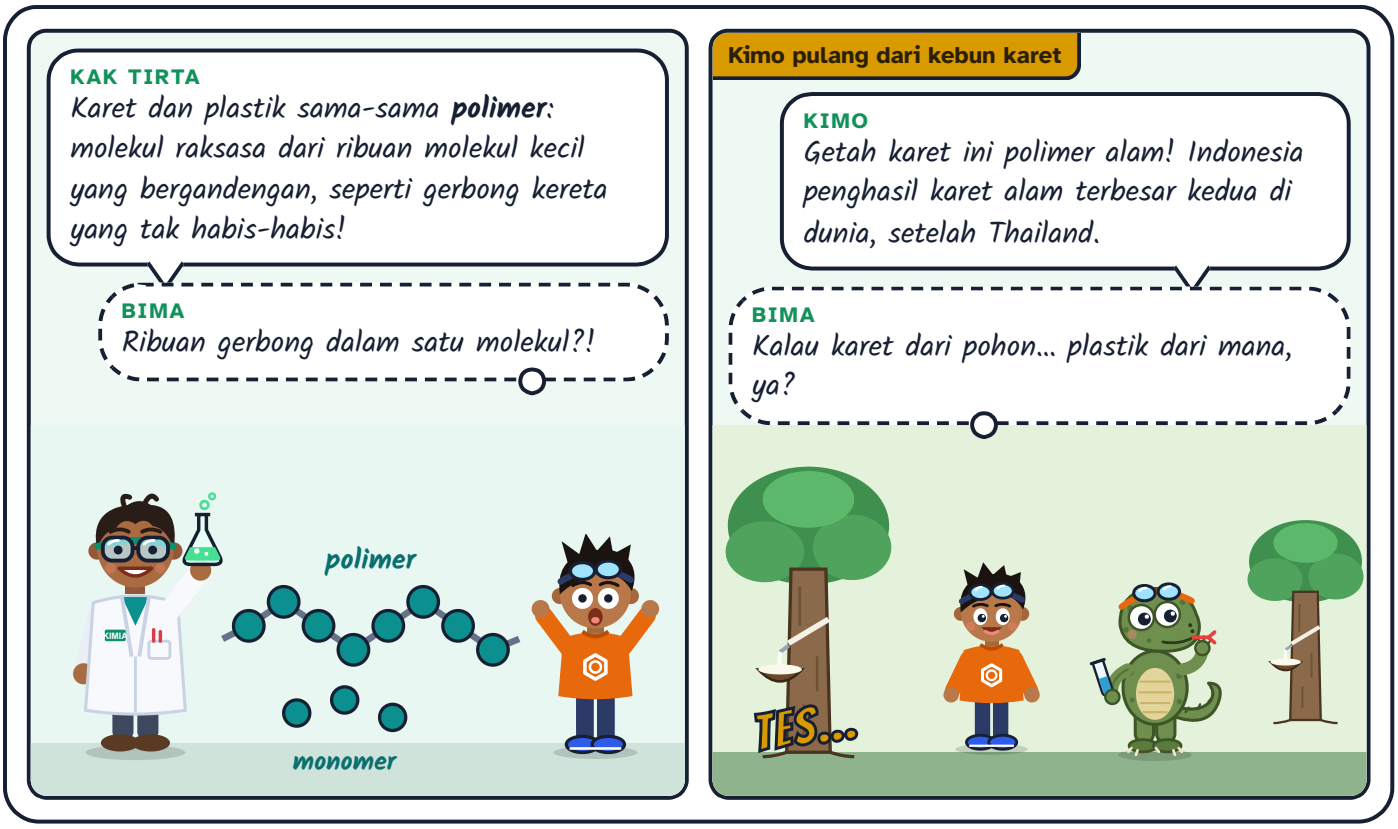
Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **monomer**, **polimer**, **unit ulang**, dan **derajat polimerisasi**, serta membedakan polimer alam dan sintetis;
- menuliskan **polimerisasi adisi** (PE, PP, PVC, PS, PTFE, karet alam) dan menentukan monomer dari unit ulangnya;
- menuliskan **polimerisasi kondensasi** (nilon, PET, protein, polisakarida) serta menghitung air yang terlepas dan massa rantainya;
- menghubungkan struktur rantai dengan sifat: **termoplastik** dan **termoset**, rantai lurus, bercabang, berikatan silang, dan **vulkanisasi** karet;
- menilai dampak plastik bagi lingkungan (**kode daur ulang**, mikroplastik, bioplastik) dan mengenal **material maju**.

RANTAI RAKSASA DI TERAS RUMAH

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Manakah yang bukan polimer?

- Kertas tisu
- Nasi
- Benang sutra
- Gula pasir

Jawabannya: gula pasir. Gula pasir (sukrosa, $C_{12}H_{22}O_{11}$) hanya terdiri atas **dua** unit gula yang bergandengan, jadi bukan molekul raksasa. Sebaliknya, kertas tisu adalah selulosa (ribuan unit glukosa), nasi berisi pati (ribuan unit glukosa juga!), dan sutra adalah protein (ribuan asam amino). Rasa manis atau tidak manis bukan penentunya, melainkan *panjang rantainya*.

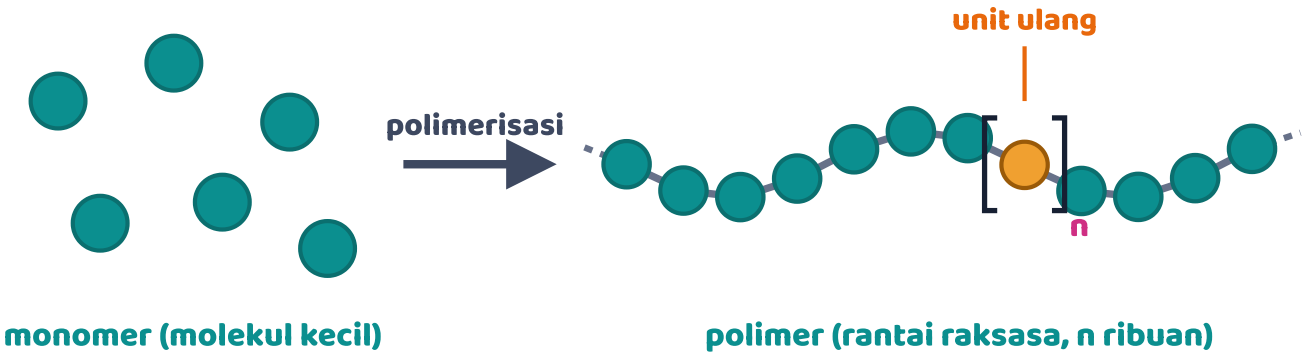
35.1 Monomer dan polimer: manik-manik yang bergandengan

Ambil seutas kalung manik-manik. Setiap manik kecil dan sederhana, tetapi ratusan manik yang dironce menjadi kalung yang panjang, lentur, dan kuat. Kimiawan menyebut maniknya **monomer** dan kalungnya **polimer** (bahasa Yunani: *poly* = banyak, *meros* = bagian).

Bahasa sederhana · Bayangkan kereta api. Satu gerbong bisa berdiri sendiri; itulah monomer. Kalau ribuan gerbong disambung, jadilah kereta yang sangat, sangat panjang; itulah polimer. Karet gelang, kantong plastik, kertas, nasi, dan rambutmu semuanya "kereta molekul" seperti itu. Bedanya hanya jenis gerbongnya dan cara gerbong itu disambung.

DEFINISI · MONOMER, POLIMER, UNIT ULANG

Monomer adalah molekul kecil yang dapat berikatan kovalen dengan sesamanya membentuk rantai panjang. **Polimer** adalah makromolekul (molekul raksasa, M_r puluhan ribu sampai jutaan) yang tersusun atas banyak monomer. Bagian rantai yang berulang disebut **unit ulang**, ditulis dalam kurung siku dengan indeks n. Bilangan n, yaitu banyaknya unit ulang dalam satu rantai, disebut **derajat polimerisasi**. Reaksi pembentukannya disebut **polimerisasi**.



Polimerisasi menyambung monomer dengan ikatan kovalen. Unit ulang yang ditulis dalam kurung $[\ ]_n$ mewakili seluruh rantai.

Polimer ada di mana-mana, dan banyak yang dibuat oleh alam jauh sebelum manusia membuat plastik pertama. Tumbuhan merangkai glukosa menjadi pati dan selulosa, sel tubuhmu merangkai asam amino menjadi protein, dan pohon karet merangkai isoprena menjadi karet. Polimer **sintetis** buatan pabrik kebanyakan berbahan baku minyak bumi dan gas alam.

Polimer	Monomer	Jenis	Contoh di sekitarmu
Pati (amilum)	glukosa	alam	nasi, singkong, sagu, jagung
Selulosa	glukosa	alam	kapas, kertas, kayu, serat nanas
Protein	asam amino	alam	sutra, rambut, daging, kedelai
Karet alam	isoprena	alam	getah pohon karet
DNA	nukleotida	alam	inti setiap sel tubuhmu
Polietilena (PE)	etena	sintetis	kantong plastik, botol sampo
Polivinil klorida (PVC)	vinil klorida	sintetis	pipa air, selang

Nilon	diamina + diasam	sintetis	jaring ikan, senar pancing

KIMIA NUSANTARA · POLIMER ALAM DARI TANAH AIR

Sagu dari Maluku dan Papua adalah pati murni yang diperas dari batang pohon sagu. Kain sutra Sengkang (Wajo, Sulawesi Selatan) ditenun dari serat protein yang dipintal ulat sutra. Kapas, serat daun nanas, dan kertas adalah selulosa. Getah pohon karet di Sumatra dan Kalimantan adalah poliisoprena. Nenek moyang kita sudah menjadi "insinyur polimer" sebelum kata polimer ditemukan!

Seberapa panjang rantainya? Kita bisa menghitungnya dari massa molekul. Bila M_r rata-rata rantai dan M_r unit ulangnya diketahui, banyaknya unit ulang adalah hasil baginya.

RUMUS HIDUP **Derajat polimerisasi**

$$n = \frac{M_{\text{polimer}}}{M_{\text{unit ulang}}}$$

Berapa 'gerbong' dalam satu rantai? Bagi massa seluruh rantai dengan massa satu unit ulang.

M_{polimer} Mr rata-rata polimer `g/mol`

$M_{\text{unit ulang}}$ Mr unit ulang `g/mol`

n Derajat polimerisasi `unit`

DERAJAT POLIMERISASI

5.000

unit

rantai panjang: kuat dan liat **polietilena**

Rantai bermassa **140.000** g/mol berisi **±5.000** unit ulang. Untuk polimer vinil (2 atom C rantai utama per unit), panjangnya bila direntang lurus **±1,27** µm.

Cek satuan: (g/mol) ÷ (g/mol per unit) = unit ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-DERAJAT-POLIMERISASI

Dengan nilai awal di atas (polietilena, M_r 140.000), satu rantai berisi 5.000 unit dan panjangnya sekitar 1,3 µm bila direntang. Tebalnya hanya ±0,5 nm. Jadi, bila rantai itu diperbesar setebal seutas mi (2 mm), panjangnya

sekitar **5 meter**: benar-benar "mi panjang umur"!

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Polimer tidak sama dengan plastik. Plastik adalah polimer sintetis yang dicampur zat aditif (pelentur, pewarna, penstabil) dan dapat dibentuk; protein, DNA, dan selulosa adalah polimer, tetapi bukan plastik. Ingat juga: rantai dalam satu sampel polimer tidak sama panjang, sehingga M_r polimer selalu berupa **rata-rata**.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Sekitar tahun 1920, kimiawan Jerman **Hermann Staudinger** mengusulkan bahwa karet dan selulosa adalah molekul raksasa yang atom-atomnya terikat kovalen. Banyak rekannya menertawakan gagasan itu; mereka mengira karet hanyalah gumpalan molekul kecil yang saling menempel. Staudinger bertahan dengan data, dan istilah *makromolekul* darinya akhirnya diterima. Ia meraih Nobel Kimia 1953. Semua plastik modern berutang pada keberaniannya.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

MASSA MOLAR RATA-RATA DAN DISPERSITAS

Karena rantai tidak sama panjang, ada dua cara merata-ratakan massanya. **Rata-rata jumlah** $\bar{M}_n = \dfrac{\sum n_i M_i}{\sum n_i}$ menghitung setiap rantai sama penting. **Rata-rata massa** $\bar{M}_w = \dfrac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i}$ memberi bobot lebih pada rantai yang berat. Perbandingannya, **dispersitas** $Đ = \bar{M}_w / \bar{M}_n \geq 1$, menunjukkan seberapa beragam panjang rantai.

Contoh: 3 mol rantai bermassa 10.000 dan 1 mol rantai bermassa 50.000 memberi $\bar{M}_n = (30.000 + 50.000)/4 = 20.000$ dan $\bar{M}_w = (3 \times 10^8 + 2{,}5 \times 10^9)/80.000 = 35.000$, sehingga $Đ = 1{,}75$. Protein alami memiliki $Đ = 1$ (semua rantai identik), sedangkan plastik pabrik umumnya $Đ = 2$–10.

35.2 Polimerisasi adisi: ikatan rangkap yang "membuka tangan"

Etena, $\mathrm{CH_2{=}CH_2}$, memiliki ikatan rangkap C=C. Di Bab 11 kamu belajar bahwa ikatan rangkap terdiri atas satu ikatan σ yang kuat dan satu ikatan π yang lebih lemah. Ikatan π inilah yang bisa "dibuka", sehingga setiap atom karbon (C) mendapat satu tangan bebas untuk menggandeng monomer tetangganya.

Bahasa sederhana · Ingat Karbon dari Klub Unsur yang bertangan empat? Pada etena, dua karbon saling berpegangan dengan dua tangan sekaligus. Saat polimerisasi, mereka melepas satu genggaman, lalu tangan yang bebas dipakai untuk menggandeng tetangga baru di kiri dan kanan. Begitu terus, ribuan kali, sampai terbentuk barisan panjang yang bergandengan tangan.

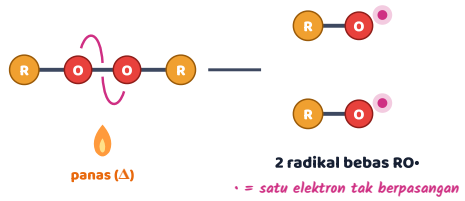
ATURAN · POLIMERISASI ADISI

1. Monomernya memiliki ikatan rangkap **C=C** (alkena dan turunannya).
2. Ikatan π terbuka dan monomer saling menyambung. **Tidak ada atom yang lepas**, sehingga $M_{\text{polimer}} = n \times M_{\text{monomer}}$.
3. Unit ulang memiliki **dua atom C rantai utama** yang terikat tunggal; gugus X pada monomer menjadi cabang samping.

$$n\,\mathrm{CH_2{=}CHX} \xrightarrow{\text{inisiator}} -[\mathrm{CH_2{-}CHX}]_n-$$

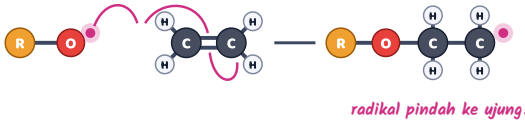
Agar monomer mau "membuka tangan", reaksi perlu dipicu oleh **inisiator**, misalnya peroksida yang menghasilkan **radikal bebas** (spesi dengan satu elektron tak berpasangan). Ikuti tahap-tahapnya dengan panah berkepala setengah, yang menunjukkan gerak *satu* elektron.

1 · Inisiasi: inisiator dipanaskan



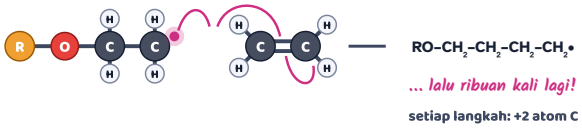
Langkah 1. Inisiator, misalnya peroksida $\mathrm{R{-}O{-}O{-}R}$, dipanaskan. Ikatan O–O yang lemah putus secara **homolitik**: setiap O membawa satu elektron. Terbentuk dua radikal bebas $\mathrm{RO^{\bullet}}$. Panah berkepala setengah (seperti kail) = gerak satu elektron.

2 · Inisiasi: radikal menyerang C=C



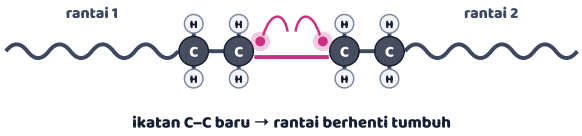
Langkah 2. Radikal $\mathrm{RO^{\bullet}}$ menyerang ikatan rangkap etena. Satu elektron π berpasangan dengan elektron radikal membentuk ikatan O–C; elektron π lainnya pindah ke karbon ujung. Radikal kini berada di ujung rantai!

3 · Propagasi: rantai tumbuh



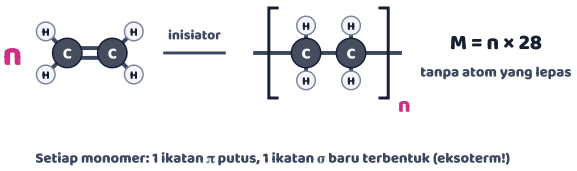
Langkah 3. Propagasi: radikal di ujung rantai menyerang etena berikutnya, lalu berikutnya lagi. Setiap langkah menambah 2 atom C, dan ini terjadi ribuan kali dalam sekejap.

4 · Terminasi: dua radikal bertemu



Langkah 4. Terminasi: ketika dua ujung radikal bertemu, kedua elektronnya berpasangan membentuk ikatan C–C. Rantai berhenti tumbuh.

5 · Hasil: polietilena



Langkah 5. Hasilnya $n\,\mathrm{CH_2{=}CH_2} \longrightarrow \mathrm{-[CH_2{-}CH_2]_n-}$. Ikatan rangkap menjadi tunggal dan tidak ada atom yang lepas, sehingga $M_{\text{polimer}} = n \times 28$.

Mengapa polimerisasi adisi melepaskan panas?

Gunakan energi ikatan rata-rata (Bab 19): C=C ±614 kJ/mol dan C–C ±348 kJ/mol. Setiap monomer yang masuk rantai mengubah satu ikatan C=C menjadi C–C dan membentuk satu ikatan C–C baru ke tetangganya:

$$\Delta H \approx 614 - 2(348) = -82 \text{ kJ per mol monomer}$$

Nilai terukur untuk etena sekitar −93 kJ/mol. Karena eksoterm, pabrik polietilena harus terus didinginkan; tanpa pendinginan, reaksi bisa lepas kendali.

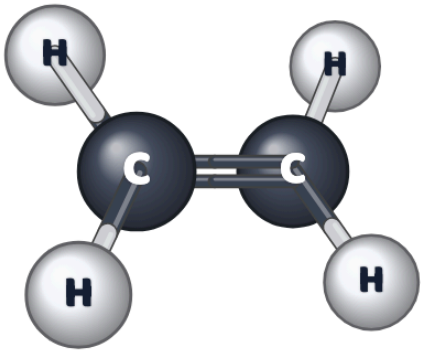
Ganti satu atom H pada etena dengan gugus lain, dan kamu mendapat keluarga polimer adisi yang mengisi rumahmu:

Polimer	Monomer	Unit ulang	Sifat & kegunaan	Kode
Polietilena (PE)	etena $CH_2{=}CH_2$	$-[CH_2-CH_2]-$	lentur, tahan air: kantong, botol sampo, ember	2, 4
Polipropilena (PP)	propena $CH_2{=}CH-CH_3$	$-[CH_2-CH(CH_3)]-$	kuat, tahan panas ±100 °C: wadah makanan, tali rafia, karung beras	5
Polivinil klorida (PVC)	kloroetena (vinil klorida) $CH_2{=}CHCl$	$-[CH_2-CHCl]-$	kaku, tahan cuaca (lentur bila diberi pelentur): pipa, selang, kabel	3
Polistirena (PS)	stirena $CH_2{=}CH-C_6H_5$	$-[CH_2-CH(C_6H_5)]-$	bening dan getas; bila dibusakan menjadi gabus putih yang ringan	6

PTFE	tetrafluoroetena $CF_2{=}CF_2$	$-[CF_2{-}CF_2]-$	sangat licin, tahan panas dan bahan kimia: lapisan wajan antilengket, pita seal pipa	7
Karet alam	isoprena $CH_2{=}C(CH_3){-}CH{=}CH_2$	$-[CH_2{-}C(CH_3){=}CH{-}CH_2]-$	elastis: ban, karet gelang, sarung tangan	–
Poliakrilonitril (PAN)	akrilonitril $CH_2{=}CH{-}CN$	$-[CH_2{-}CH(CN)]-$	serat "akrilik" untuk sweter; bahan baku serat karbon	7

Lapisan wajan antilengket ditemukan secara kebetulan. Pada 1938, kimiawan Roy Plunkett mendapati tabung gas tetrafluoroetena "kosong" padahal beratnya masih penuh. Saat tabung dibelah, isinya ternyata bubuk putih yang sangat licin: gasnya sudah berpolimerisasi sendiri menjadi PTFE. Di pasar, orang sering menyebut lapisan ini "teflon", padahal itu nama dagang.

MOLEKUL 3D **Kenali para monomer adisi**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etena (etilena) C_2H_4 Mr ≈ 28,05 PubChem ↗

Segitiga datar di tiap karbon (120°). Hormon pematang buah dan bahan baku plastik polietilena.

Putar setiap monomer dan temukan ikatan rangkap C=C-nya. Ketuk tiga atom di sekitar C=C: sudutnya ±120° (datar). Bandingkan dengan oktana (potongan pendek rantai polietilena): sudut C–C–C ±109,5° dan rantainya zig-zag. Isoprena punya **dua** ikatan C=C; mana yang tersisa di karet?

RUMUS HIDUP

Massa molekul polimer adisi

$$M = n \times M_{\text{monomer}}$$

Massa satu rantai polimer adisi sama dengan banyaknya monomer yang bergandengan dikali massa satu monomer, karena tidak ada atom yang hilang.

- n Derajat polimerisasi `unit`
- M_{monomer} Mr monomer `g/mol`
- M Mr rantai polimer `g/mol`

MR RANTAI POLIMER

140.000

g/mol

polietilena (PE)

Rantai berisi **5.000** monomer (Mr **28**) bermassa **140.000** g/mol, kira-kira **7.777,778** kali massa satu molekul air.

Cek satuan: unit × (g/mol per unit) = g/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MASSA-POLIMER-ADISI

TRIK KAK TIRTA · MENCARI MONOMER DARI UNIT ULANG

"Kembalikan tangannya." Ambil **dua atom C rantai utama** di dalam kurung, hapus ikatan yang keluar dari kurung, lalu pasang kembali ikatan rangkap di antara kedua C itu. Contoh: $-[CH_2-CH(CH_3)]-$ → $CH_2=CH-CH_3$ (propena). Arah sebaliknya: tulis monomer, ubah C=C menjadi C–C, dan tambahkan ikatan terbuka di kedua ujung.

CONTOH

Monomer di balik pipa air

Pipa air abu-abu terbuat dari PVC dengan unit ulang $-[CH_2-CHCl]-$. Tuliskan rumus dan nama monomernya, lalu hitung M_r-nya. (Ar C = 12, H = 1, Cl = 35,5)

1. Ada dua C rantai utama: CH_2 dan $CHCl$. Pasang ikatan rangkap di antara keduanya: $CH_2{=}CHCl$.
2. Namanya kloroetena, lebih dikenal sebagai vinil klorida. Rumus molekulnya C_2H_3Cl.
3. $M_r = 2(12) + 3(1) + 35{,}5 = 62{,}5$.

Monomer PVC adalah vinil klorida, $CH_2{=}CHCl$, $M_r = 62{,}5$. Lebih dari separuh massanya adalah klorin (Cl).

KERJAKAN BERSAMA

Seberapa panjang rantai kantong plastik?

Polietilena sebuah kantong plastik memiliki M_r rata-rata 210.000. Tentukan (a) derajat polimerisasinya, (b) jumlah atom karbon dalam satu rantai, dan (c) panjang rantai bila direntang lurus, jika setiap unit $-CH_2-CH_2-$ menambah panjang 0,254 nm.

1. (a) M_r unit ulang $= M_r\ C_2H_4 = 28$. Jadi $n = 210.000/28 = 7.500$ unit.
2. (b) Setiap unit punya 2 atom C: $2 \times 7.500 = 15.000$ atom C.
3. (c) Panjang $= 7.500 \times 0{,}254\ \text{nm} \approx 1.900\ \text{nm} = 1{,}9\ \mu\text{m}$.

$n = 7.500$, berisi 15.000 atom C, dan panjangnya ±1,9 µm, sekitar 1/40 tebal sehelai rambut. Untuk ukuran molekul, itu raksasa!

ADU CEPAT

Hitung derajat polimerisasi

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-35

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

n = Mr polimer ÷ Mr monomer. Contoh: 56.000 ÷ 28 = 2.000.

KIMIA NUSANTARA · KARET DAN GETAH PERCA, KEMBAR BEDA GAYA

Indonesia adalah penghasil karet alam terbesar kedua di dunia setelah Thailand, dan sebagian besar berasal dari kebun rakyat di Sumatra Selatan, Sumatra Utara, Jambi, Riau, dan Kalimantan Barat. Penyadap menggores kulit pohon *Hevea brasiliensis* (asalnya dari hutan Amazon), lalu lateks putih menetes ke mangkuk tempurung. Lateks digumpalkan dengan asam format (asam semut) menjadi bahan olah karet.

Karet alam adalah **cis**-poliisoprena: rantainya menekuk sehingga sulit tersusun rapat dan bersifat elastis. Pohon *Palaquium* di Sumatra dan Kalimantan menghasilkan **getah perca**, yaitu **trans**-poliisoprena dengan rumus yang sama, tetapi rantainya lurus dan keras. Pada abad ke-19, getah perca dari Nusantara membungkus kabel telegraf bawah laut pertama yang menghubungkan benua. Sampai sekarang dokter gigi memakainya untuk mengisi saluran akar gigi.

AWAS JEBAKAN

Unit ulang polimer adisi tidak lagi memiliki ikatan rangkap dari monomernya. Menulis $-[\mathrm{CH_2{=}CH_2}]-$ adalah kesalahan klasik: ikatan rangkap itulah yang dipakai untuk bergandengan. Pengecualiannya karet alam: monomer isoprena memiliki **dua** ikatan C=C, satu dipakai untuk menyambung dan satu tetap ada di tengah unit ulang. Ikatan rangkap sisa inilah yang kelak bereaksi dengan belerang saat vulkanisasi (dan diserang ozon sehingga karet tua retak-retak).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TAKTISITAS, KATALIS ZIEGLER–NATTA, DAN LDPE VS HDPE

Pada polipropilena, gugus $-\mathrm{CH_3}$ bisa berada di sisi yang sama sepanjang rantai (**isotaktik**), selang-seling (**sindiotaktik**), atau acak (**ataktik**). PP ataktik lunak dan lengket; PP isotaktik tersusun rapat, membentuk daerah kristal, keras, dan meleleh pada ±165 °C. Katalis logam transisi (titanium dan aluminium) yang dikembangkan Karl Ziegler dan Giulio Natta mampu "menyetir" setiap monomer masuk dengan arah yang sama. Keduanya meraih Nobel Kimia 1963.

Polimerisasi radikal etena pada tekanan sangat tinggi (±1.000–3.000 atm) menghasilkan rantai bercabang: **LDPE** (massa jenis ±0,92 g/cm³). Katalis Ziegler–Natta pada tekanan rendah menghasilkan rantai lurus: **HDPE** (±0,95 g/cm³) yang lebih kaku dan kuat. Monomernya sama, sifatnya berbeda karena bentuk rantainya.

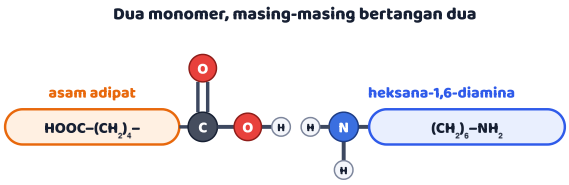
35.3 Polimerisasi kondensasi: bergandengan sambil melepas air

Ada cara kedua untuk membuat rantai, dan cara ini tidak membutuhkan ikatan rangkap. Monomernya harus punya **dua gugus fungsi** (satu di setiap ujung) yang dapat saling bereaksi. Ingat esterifikasi di Bab 33: asam karboksilat + alkohol → ester + air. Bila asamnya punya dua gugus –COOH dan alkoholnya punya dua gugus –OH, reaksi itu bisa terus berulang di kedua ujung!

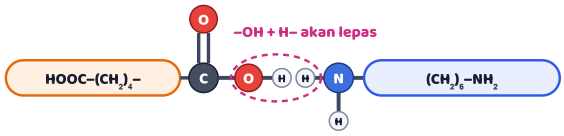
Bahasa sederhana · Bayangkan anak-anak yang bergandengan tangan di lapangan. Setiap kali dua anak berjabat tangan, mereka harus menyerahkan satu "tiket" kecil kepada panitia. Tiket itu adalah molekul air. Semakin panjang barisan, semakin banyak tiket yang terkumpul.

ATURAN · POLIMERISASI KONDENSASI

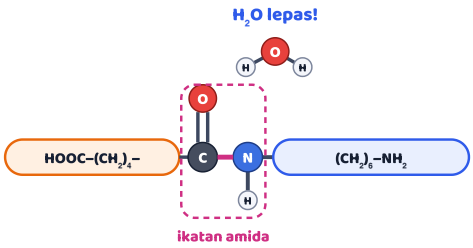
1. Setiap monomer memiliki **dua gugus fungsi** yang reaktif, misalnya –COOH, –OH, atau $-\mathrm{NH_2}$.
2. Setiap ikatan baru melepaskan **satu molekul kecil**, biasanya $\mathrm{H_2O}$ (kadang HCl atau $\mathrm{CH_3OH}$).
3. Gugus –COOH dengan $-\mathrm{NH_2}$ membentuk ikatan **amida** $-\mathrm{CO}-\mathrm{NH}-$ (poliamida); –COOH dengan –OH membentuk ikatan **ester** $-\mathrm{CO}-\mathrm{O}-$ (poliester).
4. Untuk n molekul A dan n molekul B terbentuk $2n-1$ ikatan, sehingga terlepas $(2n-1)$ molekul air.



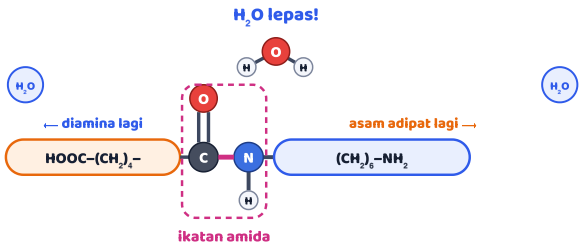
Langkah 1. Dua monomer, masing-masing bertangan dua: **asam adipat** (dua gugus –COOH) dan **heksana-1,6-diamina** (dua gugus $-\mathrm{NH_2}$). Tidak ada ikatan C=C di rantainya.



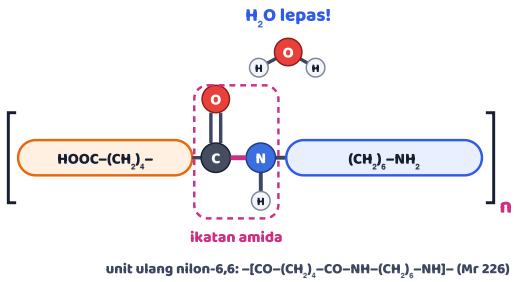
Langkah 2. Ujung –COOH mendekati ujung $-\mathrm{NH_2}$. Gugus –OH dari asam dan satu atom H dari amina akan dilepas.



Langkah 3. –OH dan –H bergabung menjadi satu molekul **air** yang pergi. C dan N kini terikat langsung: terbentuk **ikatan amida** $-\mathrm{CO}-\mathrm{NH}-$.



Langkah 4. Kedua ujung rantai baru masih punya gugus yang bisa bereaksi, sehingga monomer berikutnya menyambung di kiri dan kanan. Setiap sambungan melepas satu molekul air lagi.

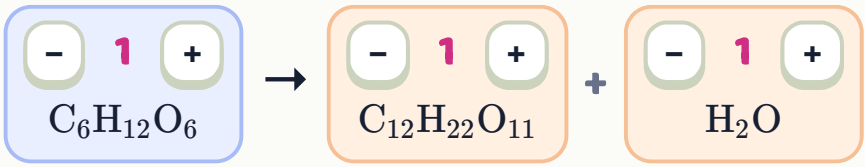


Langkah 5. Hasilnya **nilon-6,6**: $n\,\mathrm{HOOC(CH_2)_4COOH} + n\,\mathrm{H_2N(CH_2)_6NH_2} \longrightarrow -[\mathrm{CO(CH_2)_4CO-NH(CH_2)_6NH}]_n- + (2n-1)\,\mathrm{H_2O}$. Angka "6,6": enam C dari diamina dan enam C dari diasam.

Coba sendiri: setarakan beberapa reaksi kondensasi kecil. Perhatikan bahwa jumlah air yang lepas selalu satu lebih sedikit daripada jumlah monomer yang bergandengan.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi kondensasi: berapa air yang lepas?



Unsur	Kiri	Kanan	
C	6 ●●●●●●	12 ●●●●●●●●●●●●	✕
H	12 ○○○○○○○○○○○○	24 ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○	✕
O	6 ●●●●●●	12 ●●●●●●●●●●●●	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

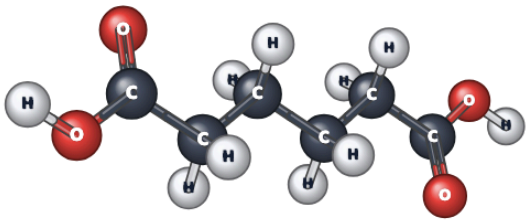
Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 4 null

Berturut-turut: dua glukosa menjadi maltosa (cikal bakal pati), tiga glisina menjadi tripeptida, asam adipat + diamina menjadi "nilon mini", dan dua asam laktat menjadi dimer ester (cikal bakal PLA). Bandingkan jumlah monomer dengan jumlah H_2O.

Polimer	Monomer	Ikatan penghubung	Yang lepas	Contoh
Nilon-6,6	asam adipat + heksana-1,6-diamina	amida	H_2O	jaring ikan, senar, kain
Nilon-6	kaprolaktam	amida	tidak ada (pembukaan cincin)	tali, benang, karpet
PET (poliester)	asam tereftalat + etilen glikol	ester	H_2O	botol minum, kain poliester

PLA	asam laktat	ester	H_2O	gelas dan sedotan bioplastik, benang jahit operasi
Protein	asam amino (20 jenis)	peptida (amida)	H_2O	sutra, rambut, otot, enzim
Pati & selulosa	glukosa	glikosida (C–O–C)	H_2O	nasi, singkong, kapas, kertas
Bakelit	fenol + formaldehida	jembatan $-CH_2-$	H_2O	stopkontak, pegangan panci

MOLEKUL 3D **Monomer bertangan dua dan ikatan peptida**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam adipat (asam heksanadioat) $C_6H_{10}O_4$ Mr ≈ 146,14

Dua gugus –COOH di kedua ujung: satu tangan untuk setiap pasangan. Bersama heksana-1,6-diamina membentuk nilon-6,6 sambil melepas air.

Temukan "tangan" setiap monomer: gugus –COOH (O merah), –OH, atau –NH_2 (N biru) di kedua ujung. Pada glisilglisina, ketuk atom O=C–N–H di tengah: keempatnya terletak pada satu bidang. Kaprolaktam berbentuk cincin; saat cincinnya terbuka, ia menjadi unit ulang nilon-6 tanpa melepas apa pun.

RUMUS HIDUP

Massa rantai polimer kondensasi

$$M = n\,(M_A + M_B) - (2n - 1) \times 18$$

Jumlahkan massa semua monomer, lalu kurangi massa air yang lepas: satu molekul air untuk setiap ikatan baru.

- n Pasangan monomer A dan B `pasang`
- M_A Mr monomer A (diasam) `g/mol`
- M_B Mr monomer B (diamina atau diol) `g/mol`
- M Mr rantai `g/mol`

MR RANTAI

22.618

g/mol

nilon-6,6: unit ulang 226

100 pasang monomer membentuk **199** ikatan baru dan melepas **199** molekul air, yaitu **3.582** g air untuk setiap mol rantai.

Cek satuan: g/mol – g/mol = g/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MASSA-POLIMER-KONDENSASI

KERJAKAN BERSAMA

Air dari benang nilon

Satu rantai nilon-6,6 dibuat dari 120 molekul asam adipat (M_r 146) dan 120 molekul heksana-1,6-diamina (M_r 116). (a) Berapa molekul air yang lepas? (b) Hitung M_r rantai. (c) Berapa persen massa monomer yang "hilang" sebagai air?

1. (a) 240 monomer dalam satu rantai membentuk 240 – 1 = 239 ikatan amida, jadi lepas **239** molekul air.
2. (b) $M = 120(146 + 116) - 239(18) = 31.440 - 4.302 = 27.138$. Cek: $120 \times 226 + 18 = 27.138$ ✔ (18 = gugus ujung H dan OH).
3. (c) $4.302/31.440 \times 100\% = 13{,}7\%$.

239 molekul air, $M_r = 27.138$, dan ±13,7% massa monomer berubah menjadi air. Dari 1 kg campuran monomer, ±137 g keluar sebagai uap air dari reaktor.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Jumlah air yang lepas adalah $2n - 1$, bukan $2n$, karena rantai punya dua ujung yang masih bebas. Untuk rantai sangat panjang selisihnya dapat diabaikan, tetapi untuk dimer atau trimer selisihnya penting. Ingat pula bahwa molekul kecil yang lepas tidak selalu air: di laboratorium nilon sering dibuat dari asil klorida dan melepas HCl. Nilon-6 di pabrik dibuat dengan membuka cincin kaprolaktam tanpa melepas apa pun, tetapi rantainya sama dengan hasil kondensasi asam 6-aminoheksanoat.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · POTONG DAN TAMBAL AIR**

Untuk mencari monomer polimer kondensasi, cari ikatan amida atau ester, lalu "potong" di antara C=O dan N (atau O). Tambal setiap potongan dengan air: pasang **–OH** di sisi C=O dan **–H** di sisi N atau O. Itulah juga yang terjadi saat **hidrolisis**: enzim pencernaanmu memotong protein dan pati dengan cara persis seperti ini.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1935, **Wallace Carothers**, kimiawan di sebuah perusahaan kimia Amerika, membuat nilon-6,6, serat sintetis pertama yang benar-benar sukses. Ia sengaja merancang monomer bertangan dua untuk membuktikan gagasan Staudinger tentang makromolekul. Carothers wafat pada 1937, dua tahun sebelum stoking nilon dijual dan diserbu pembeli. Hampir bersamaan, Paul Schlack di Jerman membuat nilon-6 dari kaprolaktam (1938).

Kini kamu bisa merangkai polimer sendiri. Pilih monomer, lalu perhatikan perbedaan dua cara bergandengan: pada adisi rantai tumbuh tanpa sisa, pada kondensasi setiap sambungan "membayar" satu molekul air.

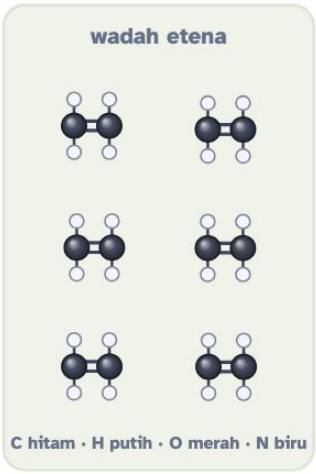
LAB MINI **Perangkai Polimer: sambung monomer jadi rantai raksasa**

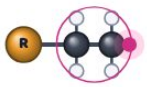
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-35

Polietilena (PE)

n $CH_2{=}CH_2$ → $-[CH_2{-}CH_2]_n-$

ADISI · ikatan C=C terbuka, tanpa sisa







Jenis	Monomer tersambung	Mr rantai
adisi: C=C terbuka, tanpa sisa	1	28 g/mol

H_2O terlepas	Ikatan penghubung	Kegunaan
0	C–C (ikatan tunggal)	kantong, botol sampo, ember

Pilih polimer, lalu tekan ➕ **Tambah monomer** atau nyalakan **tambah otomatis**. Bandingkan polietilena dengan nilon-6,6: pada rantai mana gelas air di pojok kanan atas mulai terisi? Pada protein, perhatikan bahwa setiap asam amino berbeda warna (berbeda gugus R), tetapi ikatan penghubungnya selalu sama. Pada selulosa, mengapa setiap glukosa tampak terbalik dari tetangganya?

35.4 Sifat polimer: rantai lurus, bercabang, dan ikatan silang

Kantong plastik lemas, pipa PVC kaku, karet gelang elastis, dan stopkontak bakelit keras. Semuanya polimer. Sifatnya ditentukan oleh empat hal: **panjang rantai**, **gaya antarrantai** (gaya London, dipol, ikatan hidrogen pada nilon dan protein; lihat Bab 13), **bentuk rantai** (lurus atau bercabang), dan ada tidaknya **ikatan silang** kovalen antarrantai.

Tebak Dulu!

Karet gelang yang tebal direntangkan dengan cepat, lalu langsung ditempelkan ke bibir atas. Apa yang terasa?

- Dingin, karena karet menyerap panas saat diregangkan.
- Hangat.
- Tidak ada perubahan suhu sama sekali.
- Karet terasa keras seperti plastik.

Jawabannya: hangat! Saat diam, rantai karet bergulung acak (sangat tidak teratur, entropi tinggi). Saat ditarik, rantai dipaksa lurus dan sejajar sehingga lebih teratur. Kerja tanganmu berubah menjadi kalor yang menghangatkan karet. Lepaskan perlahan, dan karet terasa sedikit lebih dingin. Elastisitas karet adalah kecenderungan rantai untuk kembali "berantakan".

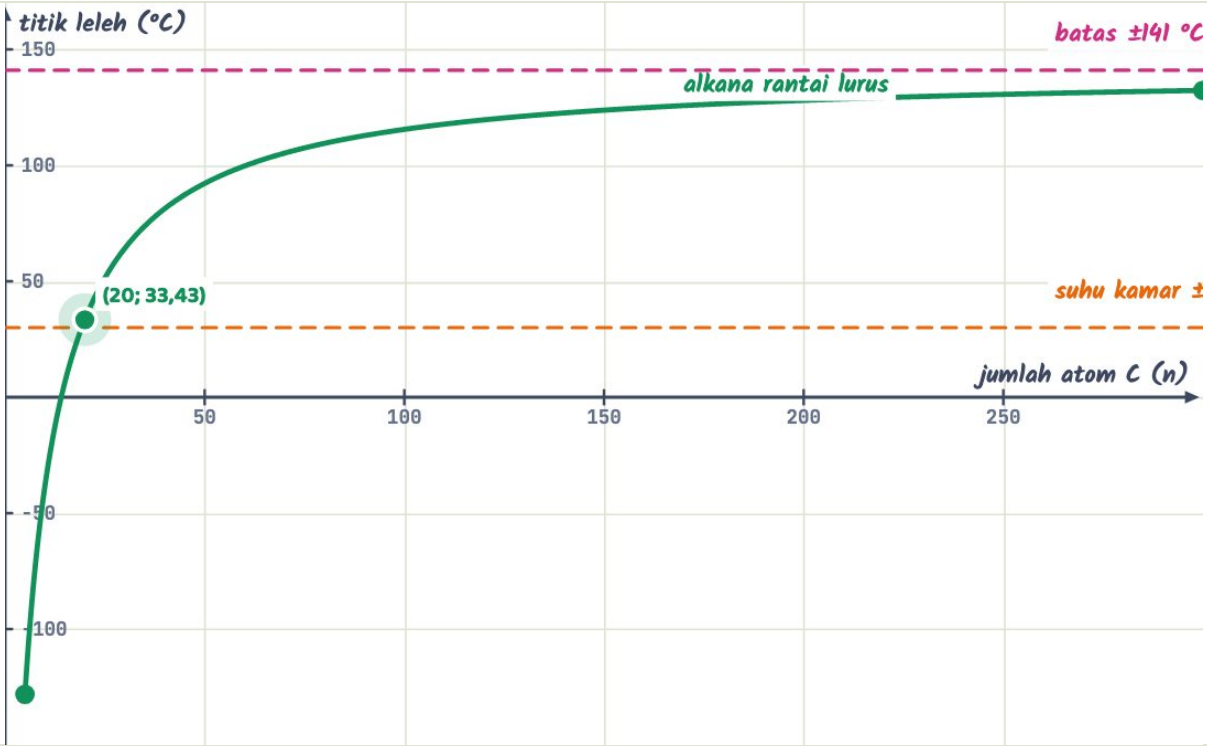
Mulai dari panjang rantai. Alkana rantai lurus adalah "polietilena mini". Semakin panjang rantainya, semakin besar gaya London antarrantai, sehingga titik lelehnya naik: dari bensin yang cair, ke lilin, sampai plastik yang padat.

GRAFIK HIDUP **Rantai makin panjang, titik leleh makin tinggi**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-35

$$T_m \approx 414{,}3 \cdot \frac{n - 1{,}5}{n + 5}\ \mathrm{K}$$

$$n = 20 \text{ atom C}: \quad T_m \approx 33{,}43\ ^\circ\mathrm{C}$$

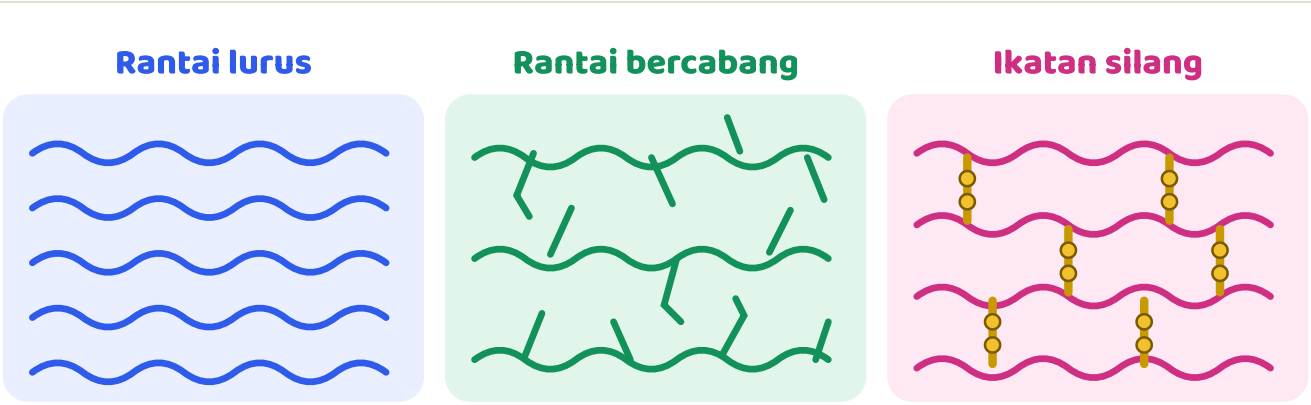


🕯️ **lilin parafin: padat lunak**

titik leleh	Mr rantai
33 °C	282

Seret titik hijau. Kurva empiris ini (persamaan Broadhurst) cocok dengan data alkana: oktana −57 °C, eikosana (n = 20) ±37 °C, triakontana (n = 30) ±66 °C. Mengapa kurvanya mendatar dan tidak pernah melewati ±141 °C?

Bentuk rantai juga penting. Rantai lurus dapat tersusun rapat dan sejajar seperti batang korek api dalam kotaknya, membentuk daerah **kristal** yang kuat. Cabang samping menghalangi kerapatan itu. Ikatan silang mengunci rantai menjadi satu jaringan raksasa.



Bentuk rantai menentukan sifat. Titik-titik kuning pada gambar kanan adalah jembatan belerang yang mengikat rantai karet satu sama lain.

DEFINISI · TERMOPLASTIK, TERMOSET, ELASTOMER

Termoplastik adalah polimer yang melunak bila dipanaskan dan mengeras kembali bila didinginkan, berulang-ulang, karena rantainya hanya ditahan gaya antarmolekul. **Termoset** adalah polimer yang membentuk jaringan ikatan silang kovalen yang rapat saat dicetak; setelah jadi, ia tidak melunak bila dipanaskan, melainkan hangus. **Elastomer** adalah polimer dengan ikatan silang yang jarang sehingga dapat diregangkan jauh dan kembali ke bentuk semula.

Sifat	Termoplastik	Termoset	Elastomer
Struktur	rantai lurus atau bercabang, tanpa ikatan silang	jaringan ikatan silang yang rapat	ikatan silang jarang
Saat dipanaskan	melunak, meleleh, bisa dicetak ulang	tetap keras; jika terlalu panas, hangus	tetap elastis sampai terurai
Daur ulang dengan dilelehkan	bisa	tidak bisa	sulit (ban bekas dicacah)
Contoh	PE, PP, PVC, PS, PET, nilon	bakelit, melamin (piring warung), resin epoksi (lem dua komponen)	karet ban, karet gelang, sol sepatu

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Termoset tidak bisa dilelehkan ulang, sehingga stopkontak bakelit atau piring melamin tidak dapat didaur ulang dengan cara dilelehkan seperti botol PET. Piring dan mangkuk melamin juga sebaiknya tidak dimasukkan ke oven microwave dan tidak dipakai untuk makanan yang sangat panas atau asam dalam waktu lama, karena bahannya dapat rusak.

Karet alam mentah punya masalah besar: pada hari panas ia lembek dan lengket, pada hari dingin kaku dan mudah retak. Rantai poliisoprena hanya bergulung dan saling membelit, tanpa "jangkar". Bila ditarik terlalu lama, rantainya saling menggeser dan tidak kembali. Solusinya adalah **vulkanisasi**: karet dipanaskan bersama belerang (S). Atom belerang membentuk jembatan $-S-S-$ (atau lebih panjang) yang mengikat rantai di dekat ikatan rangkap sisanya. Sedikit belerang (±1–3%) menghasilkan karet elastis untuk ban dan karet gelang; banyak belerang (±30–40%) menghasilkan **ebonit** yang keras, dulu dipakai untuk sisir dan corong peniup klarinet.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1839, **Charles Goodyear** di Amerika Serikat sudah bertahun-tahun mencoba membuat karet yang tidak lengket dan tidak rapuh, sampai berutang dan dipenjara karena utang. Menurut ceritanya, campuran karet dan belerang tak sengaja jatuh di atas tungku panas. Bukannya meleleh, karet itu hangus di tepinya tetapi bagian dalamnya menjadi kenyal dan elastis. Proses ini kemudian dinamai vulkanisasi, dari Vulcan, dewa api Romawi. Tanpa vulkanisasi, tidak akan ada ban sepeda, motor, dan mobil.

LAB MINI

Dapur Goodyear: vulkanisasi karet

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-35



Jenis karet	Panjang
karet mentah (belum divulkanisasi)	100 % panjang awal

Kembali ke semula?	Gaya tarik (relatif)	Contoh benda
–	0	sol krep, lem karet

Mulai dengan **karet mentah** (belerang 0). Seret penjepit kanan untuk menarik, lalu lepaskan. Apakah karetnya kembali? Coba juga pada suhu "panas". Sekarang tambahkan belerang sedikit demi sedikit dan ulangi. Apa yang terjadi bila belerangnya terlalu banyak, misalnya 30 bagian?

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ELASTISITAS ENTROPI: KARET YANG MENYUSUT BILA DIPANASKAN

Gaya pegas logam berasal dari ikatan antaratom yang diregangkan (perubahan entalpi). Gaya karet berbeda: saat ditarik, energi ikatannya hampir tidak berubah, tetapi jumlah susunan rantai yang mungkin berkurang drastis, sehingga $\Delta S < 0$. Dari $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ dengan $\Delta H \approx 0$, peregangan memiliki $\Delta G > 0$ (tidak spontan), sedangkan kembali ke gulungan acak bersifat spontan.

Akibatnya, gaya tarik karet sebanding dengan suhu mutlak. Gantung beban pada karet gelang, lalu panaskan karetnya dengan pengering rambut: karet justru **memendek** dan bebannya naik! Ini kebalikan dari hampir semua bahan lain yang memuai saat dipanaskan.

35.5 Plastik dan lingkungan: dari kode daur ulang sampai bioplastik

Kelebihan terbesar plastik adalah **awet**: tidak berkarat, tidak membusuk, dan tahan air. Kelebihan itu pula yang menjadi masalah terbesarnya. Mikroba hampir tidak punya enzim untuk memutus rantai C–C yang panjang dan

nonpolar pada PE, PP, dan PS, sehingga plastik yang terbuang dapat bertahan puluhan sampai ratusan tahun. Secara global, diperkirakan baru sekitar 9% dari seluruh plastik yang pernah dibuat yang sudah didaur ulang.

Bahasa sederhana · Ada tiga langkah sederhana yang bisa kamu lakukan: **kurangi** (bawa tas kain dan botol minum sendiri), **pakai ulang** (galon dan wadah makanan dipakai berkali-kali), dan **daur ulang** (pilah sampah plastik yang bersih lalu setor ke bank sampah). Urutannya penting: mengurangi selalu lebih baik daripada mendaur ulang.

Tebak Dulu!

Sebuah kantong dari pati singkong dan sebuah sedotan PLA "biodegradable" terbawa ke laut. Apa yang paling mungkin terjadi?

- Keduanya lenyap tanpa bekas dalam satu minggu.
- Kantong pati umumnya lebih cepat terurai, sedangkan sedotan PLA bisa bertahan bertahun-tahun di air laut yang dingin.
- Keduanya sama sekali tidak bisa terurai, persis seperti polietilena.
- Sedotan PLA terurai lebih cepat karena lebih tipis.

Jawabannya: pilihan kedua. Mikroba di alam punya enzim pemutus ikatan glikosida pada pati, sehingga kantong berbahan utama pati dapat hancur dalam beberapa minggu sampai bulan. PLA memang bisa diuraikan, tetapi dengan cepat hanya di **kompos industri** (±58 °C, lembap). Di laut yang dingin, hidrolisis ikatan esternya sangat lambat. Label "biodegradable" selalu bergantung pada *di mana* plastik itu dibuang.

Agar plastik bisa dipilah, produsen mencetak **kode identifikasi resin** berupa segitiga panah bernomor 1–7 di dasar kemasan. Kode ini memberi tahu *jenis* plastiknya, bukan jaminan bahwa plastik itu pasti didaur ulang.

Kode	Plastik	Contoh di rumah	Daur ulang	Bisa menjadi
1	**PET** polietilena tereftalat	botol air minum, botol minuman, botol minyak goreng	mudah dan laris dipungut	serat poliester (kain, isian bantal), botol baru
2	**HDPE** polietilena densitas tinggi	botol sampo dan sabun cair, jeriken, botol susu buram, banyak kantong kresek tipis	mudah	pot, ember, pipa, palet

	**PVC** polivinil klorida	pipa air, selang, isolasi kabel, taplak plastik	sulit; **jangan dibakar** (menghasilkan HCl dan dioksin)	pipa dan lantai (terbatas)
	**LDPE** polietilena densitas rendah	plastik bening pembungkus es dan gula, plastik wrap, kantong lemas	bisa, tetapi jarang dipungut (ringan dan kotor)	kantong sampah, campuran aspal plastik
	**PP** polipropilena	wadah makanan, gelas air minum kemasan, tutup botol, tali rafia, karung beras	bisa	ember, keranjang, tali
	**PS** polistirena	gabus putih kemasan makanan dan elektronik, sendok plastik keras sekali pakai	sangat sulit (lebih dari 90% isinya udara, mudah remuk)	bingkai, bahan bangunan ringan (terbatas)
	**Lainnya** PC, PLA, nilon, multilapis	galon air isi ulang (polikarbonat), kemasan saset berlapis, bioplastik PLA	umumnya sulit; galon sebaiknya dipakai ulang	bergantung jenisnya

LAB MINI

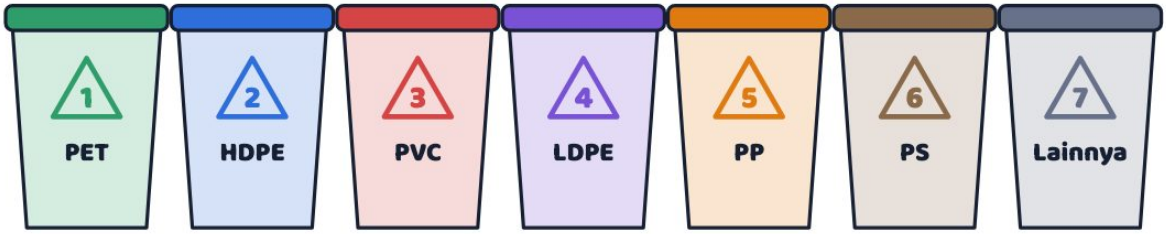
Pemilah Plastik: kode 1 sampai 7

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-35



Plastik bening pembungkus es

Seret ke tong berkode yang tepat ↓ (atau ketuk tongnya)



Benar pada percobaan pertama	Salah tong	Barang tersisa
0	0	13

Seret setiap barang dari ban berjalan ke tong berkode yang tepat (atau ketuk tongnya). Setiap tebakan benar membuka fakta daur ulangnya. Barang mana yang paling sering membuatmu ragu? Nyalakan **tampilkan contoh** bila butuh bantuan.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · MEMBACA SEGITIGA PLASTIK**

Kode 2 dan 4 sama-sama polietilena; bedanya hanya bentuk rantai (lurus atau bercabang). Kode 1, 2, dan 5 adalah "primadona" bank sampah karena mudah dilebur ulang. Kode 3 dan 6 adalah "anak bandel": sulit didaur ulang dan sebaiknya dihindari bila ada pilihan lain. Kode 7 artinya "tanyakan dulu jenisnya".

Plastik yang terbuang tidak benar-benar hilang. Sinar ultraviolet matahari memutus sebagian rantainya, ombak dan pasir menggerusnya, sehingga plastik pecah menjadi kepingan yang makin kecil. Kepingan berukuran kurang dari 5 mm disebut **mikroplastik**. Mikroplastik juga berasal langsung dari serat kain sintetis yang lepas saat dicuci dan dari ban kendaraan yang aus. Penelitian di perairan Indonesia telah menemukan mikroplastik pada ikan, kerang, dan garam laut.



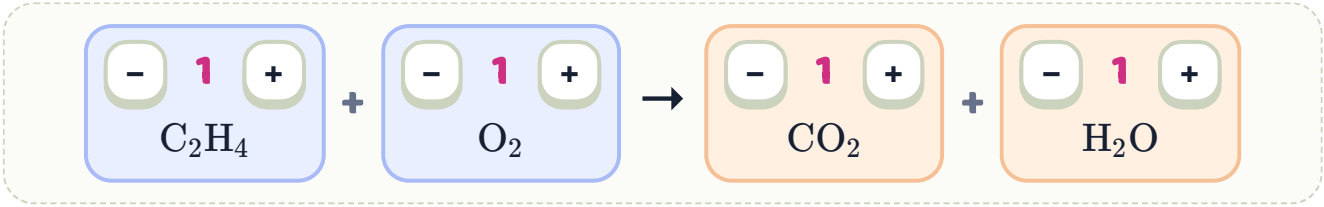
→ **termakan plankton, ikan, dan kerang, lalu masuk ke rantai makanan kita**

Plastik tidak "hilang", melainkan pecah menjadi kepingan yang makin kecil. Batas mikroplastik adalah 5 mm.

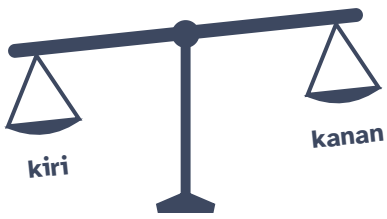
Di banyak tempat, sampah plastik dibakar di halaman. Polimer hidrokarbon seperti PE terbakar menjadi CO_2 dan H_2O, tetapi pembakaran di tumpukan sampah hampir selalu **tidak sempurna**: terbentuk karbon monoksida dan jelaga. PVC bahkan melepaskan gas hidrogen klorida dan dapat membentuk dioksin yang sangat beracun.

PENYETARA REAKSI

Mengapa sampah plastik jangan dibakar?



Unsur	Kiri	Kanan	
C	2 ●●	1 ●	✕
H	4 ○○○○	2 ○○	✕
O	2 ●●	3 ●●●	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 4 null

Setiap rumus monomer di sini mewakili satu unit ulang: PE, PS, PE yang terbakar tidak sempurna (kurang oksigen), dan PVC. Perhatikan hasil yang berbahaya: CO pada persamaan ketiga dan HCl pada persamaan keempat.

⚠ **KESELAMATAN**

Jangan membakar sampah plastik, terutama pipa, kabel, dan taplak PVC. Asapnya mengandung jelaga halus, karbon monoksida, hidrogen klorida, dan dioksin yang merusak paru-paru dan dapat memicu kanker. Pilah, kurangi, lalu setorkan ke bank sampah atau tempat pengumpulan resmi.

🇮🇩 **KIMIA NUSANTARA · DARI SINGKONG, RUMPUT LAUT, SAMPAI ASPAL**

Indonesia termasuk penghasil singkong dan rumput laut terbesar di dunia, dua bahan baku **bioplastik**. Pati singkong (tapioka) dapat dicetak menjadi kantong dan wadah yang mudah terurai, sedangkan karagenan dari rumput laut dapat dibuat menjadi kemasan tipis yang bahkan aman dimakan. Di sisi lain, ribuan **bank sampah** di kampung-kampung mengubah botol PET dan gelas PP menjadi tabungan warga. Sejak sekitar 2017, cacahan kantong plastik juga diuji sebagai campuran **aspal plastik** di sejumlah ruas jalan, dan lateks karet rakyat diuji untuk **aspal karet**. Beberapa daerah, misalnya Banjarmasin, Bogor, Bali, dan Jakarta, membatasi kantong plastik sekali pakai.

MITOS

"Semua plastik bisa didaur ulang."

FAKTA

Hanya sebagian yang benar-benar didaur ulang. PET dan HDPE paling mudah; PVC, gabus PS, dan kemasan saset berlapis plastik-aluminium hampir mustahil diolah ulang. Plastik kotor dan tercampur juga sering berakhir di TPA.

MITOS

"Plastik biodegradable pasti terurai dalam beberapa hari di mana saja."

FAKTA

PLA butuh kompos industri (±58 °C) untuk terurai cepat. Di laut atau tanah biasa ia bisa bertahan bertahun-tahun. Plastik "oxo" yang hanya mudah pecah justru menghasilkan lebih banyak mikroplastik.

MITOS

"Polimer selalu buatan pabrik."

FAKTA

Pati, selulosa, protein, DNA, sutra, dan karet alam adalah polimer alam yang dibuat makhluk hidup jauh sebelum pabrik plastik pertama berdiri.

MITOS

"Membakar sampah plastik membuatnya hilang tanpa sisa."

FAKTA

Massanya berubah menjadi gas dan jelaga yang kita hirup: CO_2, CO, HCl dari PVC, dan dioksin. Masalahnya hanya pindah dari tanah ke udara dan paru-paru.

COBA SENDIRI **Detektif polimer: pipa misterius**

Pecahan pipa bekas tersusun atas polimer adisi yang hanya mengandung C, H, dan Cl. Analisis unsur memberi 38,4% C, 4,8% H, dan 56,8% Cl (massa). Massa molar rata-ratanya 75.000 g/mol. Tentukan rumus empiris, monomer, dan derajat polimerisasinya, lalu jelaskan mengapa pipa itu tidak boleh dibakar. (Ar C = 12, H = 1, Cl = 35,5)

1. Anggap 100 g: C $= 38{,}4/12 = 3{,}2$ mol; H $= 4{,}8/1 = 4{,}8$ mol; Cl $= 56{,}8/35{,}5 = 1{,}6$ mol.
2. Bagi dengan 1,6: C : H : Cl $= 2 : 3 : 1$. Rumus empiris $\mathrm{C_2H_3Cl}$ (M_r 62,5).
3. Polimer adisi: unit ulang = monomer, yaitu $\mathrm{CH_2{=}CHCl}$ (vinil klorida). Polimernya PVC.
4. $n = 75.000/62{,}5 = 1.200$.
5. Saat dibakar, klorin keluar sebagai gas HCl: $\mathrm{2\,C_2H_3Cl + 5\,O_2 \longrightarrow 4\,CO_2 + 2\,H_2O + 2\,HCl}$, dan dapat terbentuk dioksin.

Polimernya PVC dengan $n = 1.200$. Membakarnya melepaskan HCl yang korosif dan dioksin yang beracun.

35.6 Material maju: lebih kuat dari baja, menyerap air, menghantarkan listrik

Kimiawan kini merancang polimer seperti arsitek merancang gedung: memilih monomer, bentuk rantai, dan ikatan silang untuk sifat yang diinginkan. Hasilnya adalah material yang dulu terdengar seperti sihir.

Serat karbon. Serat poliakrilonitril (PAN) dipanaskan perlahan di udara (±200–300 °C) agar rantainya membentuk cincin, lalu dipanaskan di atas 1.000 °C dalam gas tanpa oksigen. Atom H dan N terlepas, tersisa lembaran atom karbon mirip grafit yang tersusun sejajar sumbu serat. Serat karbon yang direkatkan resin (komposit) lebih kuat daripada baja tetapi kira-kira empat kali lebih ringan. Rangka raket bulu tangkis, sepeda balap, sayap pesawat, dan bilah turbin angin memakainya.

Polimer superabsorben. Natrium poliakrilat adalah rantai panjang yang penuh gugus $-\mathrm{COO^-}$ dengan ion $\mathrm{Na^+}$, dan rantainya diikat silang secara jarang. Saat bertemu air, ion-ion menarik air masuk (seperti osmosis, Bab 24), rantai bermuatan negatif saling tolak sehingga jaringan mengembang, tetapi ikatan silang mencegahnya larut. Hasilnya gel yang mampu menahan ratusan kali massanya dalam air suling, dan puluhan kali dalam urine yang bergaram. Itulah rahasia popok bayi yang tetap kering.

Polimer konduktif. Plastik biasanya isolator listrik; itu sebabnya kabel dibungkus PVC. Namun poliasetilena, $-[\mathrm{CH{=}CH}]_n-$, memiliki ikatan tunggal dan rangkap berselang-seling (**terkonjugasi**) sepanjang rantai. Bila "didoping" dengan uap iodin (**iodin**), sebagian elektronnya ditarik keluar, dan muatan positif yang tertinggal dapat berpindah sepanjang rantai. Konduktivitasnya naik jutaan kali, mendekati logam.

TAMU DARI MASA LALU

Sekitar 1967, seorang peneliti tamu di laboratorium **Hideki Shirakawa** di Tokyo tak sengaja memakai katalis seribu kali terlalu banyak dan memperoleh lapisan poliasetilena yang mengilap seperti perak. Bertahun-tahun kemudian, Shirakawa bekerja sama dengan **Alan Heeger** dan **Alan MacDiarmid** di Amerika. Pada 1977 mereka mendoping lapisan itu dengan iodin dan mendapati konduktivitasnya melonjak. Ketiganya meraih Nobel Kimia 2000 untuk penemuan polimer konduktif.

Material	Rahasia strukturnya	Sifat hebat	Dipakai untuk
Serat karbon	lembaran atom C mirip grafit, sejajar sumbu serat	lebih kuat dari baja, ±4 kali lebih ringan	raket bulu tangkis, sepeda, pesawat, turbin angin
Superabsorben	rantai poliakrilat bermuatan, ikatan silang jarang	menyerap ratusan kali massanya dalam air suling	popok, pembalut, hidrogel penyimpan air untuk tanaman
Polimer konduktif	ikatan tunggal–rangkap berselang-seling, didoping	menghantarkan listrik, ringan, lentur	lapisan antistatis, layar lentur, sensor, sel surya organik
Aramid	cincin benzena + ikatan amida, rantai lurus kaku, ikatan hidrogen antarrantai	sangat kuat dan tahan panas	rompi antipeluru, sarung tangan tahan potong, tali kapal

KESELAMATAN

Butiran gel superabsorben (misalnya dari popok bekas atau mainan bola air yang bisa membesar) tidak boleh ditelan atau dimasukkan ke hidung dan telinga. Di dalam tubuh butiran itu terus mengembang dan dapat menyumbat saluran. Jauhkan dari jangkauan adik yang masih kecil.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DOPING: POLIMER YANG DIOKSIDASI

"Doping" pada poliasetilena sebenarnya reaksi redoks (Bab 29). Iodin mengoksidasi rantai dan berubah menjadi ion triiodida:

$$(\mathrm{CH})_n + \tfrac{3x}{2}\,\mathrm{I_2} \longrightarrow [(\mathrm{CH})_n]^{x+} + x\,\mathrm{I_3}^-$$

Muatan positif (disebut *polaron*) tidak terkunci pada satu atom, melainkan menyebar pada beberapa ikatan terkonjugasi dan dapat melompat sepanjang rantai bila diberi beda potensial. Semakin panjang konjugasinya, semakin kecil celah energi antara orbital terisi dan kosong. Prinsip yang sama membuat betakaroten wortel berwarna jingga.

Kimia di sekitarmu



Ban dan sandal jepit

Ban kendaraan adalah campuran karet alam dan karet sintetis yang divulkanisasi dan diperkuat jelaga karbon agar awet. Sandal jepit dibuat dari karet berbusa.



Aspal plastik dan aspal karet

Cacahan kantong plastik dan lateks karet rakyat dicampurkan ke aspal di sejumlah ruas jalan agar jalan lebih awet sekaligus menyerap sampah dan hasil kebun.



Bank sampah

Warga menyetor botol PET, gelas PP, dan kardus yang sudah dipilah, lalu mendapat saldo rupiah. Plastik yang terpilah bersih jauh lebih mudah didaur ulang.



Tali rafia dan karung beras

Pita PP ditarik memanjang sehingga rantainya sejajar: sangat kuat bila ditarik searah, tetapi mudah disobek memanjang. Coba sendiri!



Wajan antilengket

Lapisan PTFE sangat licin karena "kulit" atom fluor membuat molekul lain sulit menempel. Jangan memanaskan wajan kosong terlalu lama dengan api besar.



Popok bayi

Butiran natrium poliakrilat mengubah cairan menjadi gel, sehingga permukaan popok tetap terasa kering.



Raket bulu tangkis

Rangka raket modern dari komposit serat karbon: ringan untuk smes cepat, tetapi kaku dan kuat menahan tegangan senar.

Cek Cepat

Monomer polipropilena (PP) adalah ...

- etena
- propana
- propena
- stirena

Manakah polimer yang terbentuk melalui polimerisasi kondensasi?

- Nilon-6,6
- PVC
- Polistirena
- PTFE

Kantong dari pati singkong dan kantong polietilena dikubur di tanah lembap. Setelah sebulan, yang paling mungkin terjadi adalah ...

- keduanya masih utuh
- keduanya hancur
- kantong PE hancur lebih dulu karena lebih tipis
- kantong pati mulai hancur, kantong PE tetap utuh

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: plastik dari segelas susu

Bahan: 1 gelas (±250 mL) susu sapi cair, 4 sendok makan cuka dapur, panci kecil dan kompor, mangkuk tahan panas, saringan atau kain bersih, sendok, serbet, cetakan kue kecil.

1. Bersama orang dewasa, hangatkan susu sampai beruap (±50 °C), tetapi jangan sampai mendidih.
2. Tuang susu ke mangkuk tahan panas, lalu tambahkan cuka satu sendok demi satu sendok sambil diaduk pelan. Amati gumpalan putih yang muncul.
3. Diamkan 1 menit, lalu saring. Tekan gumpalan dengan serbet untuk membuang cairannya.
4. Uleni gumpalan seperti plastisin, bentuk atau cetak, lalu keringkan 1–2 hari di tempat teduh.

Keselamatan: susu panas dan panci dapat melukai kulit, jadi biarkan orang dewasa menangani kompor dan gunakan serbet. Jangan memakan hasilnya. Cuci tangan dan peralatan setelah selesai, dan buang sisa cairan ke wastafel.

Pertanyaan: Gumpalan itu adalah protein **kasein**. Mengapa cuka membuatnya menggumpal? Apakah "plastik susu" termasuk polimer alam atau sintetis? Dulu bahan serupa (diperkeras dengan formaldehida di pabrik) dipakai untuk membuat kancing baju.

RINGKASAN KILAT

Bab 35 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **monomer**, **polimer**, **unit ulang**, dan **derajat polimerisasi**, serta membedakan polimer alam dan sintetis
- menuliskan **polimerisasi adisi** (PE, PP, PVC, PS, PTFE, karet alam) dan menentukan monomer dari unit ulangnya
- menuliskan **polimerisasi kondensasi** (nilon, PET, protein, polisakarida) serta menghitung air yang terlepas dan massa rantainya
- menghubungkan struktur rantai dengan sifat: **termoplastik** dan **termoset**, rantai lurus, bercabang, berikatan silang, dan **vulkanisasi** karet
- menilai dampak plastik bagi lingkungan (**kode daur ulang**, mikroplastik, bioplastik) dan mengenal **material maju**

Istilah kunci

monomer · polimer · Monomer · Polimer · unit ulang · derajat polimerisasi · polimerisasi · sintetis · inisiator · radikal bebas · amida · ester · ikatan amida · Termoplastik · Termoset · Elastomer

Rumus penting

$$n = \frac{M_{\text{polimer}}}{M_{\text{unit ulang}}}$$

Derajat polimerisasi. Berapa 'gerbong' dalam satu rantai? Bagi massa seluruh rantai dengan massa satu unit ulang.

$$M = n \times M_{\text{monomer}}$$

Massa molekul polimer adisi. Massa satu rantai polimer adisi sama dengan banyaknya monomer yang bergandengan dikali massa satu monomer, karena tidak ada atom yang hilang.

$$M = n\,(M_A + M_B) - (2n - 1) \times 18$$

Massa rantai polimer kondensasi. Jumlahkan massa semua monomer, lalu kurangi massa air yang lepas: satu molekul air untuk setiap ikatan baru.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Polimer tidak sama dengan plastik.
- Unit ulang polimer adisi tidak lagi memiliki ikatan rangkap dari monomernya.
- Jumlah air yang lepas adalah $2n - 1$, bukan $2n$, karena rantai punya dua ujung yang masih bebas.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=35

🧩 Teka-teki untuk Bab 36

Tempe lebih mudah dicerna daripada kedelai mentah. Padahal keduanya berisi protein yang sama, rantai panjang asam amino yang bergandengan lewat ikatan peptida. Apa yang dilakukan jamur *Rhizopus* pada protein kedelai selama dua hari fermentasi?

▼ **Intip petunjuk**

Ingat trik "potong dan tambal air". Jamur tempe mengeluarkan enzim **protease** yang menghidrolisis ikatan peptida: air dimasukkan kembali, sehingga protein raksasa terpotong menjadi peptida pendek dan asam amino yang mudah diserap usus. Hidrolisis adalah kebalikan dari kondensasi. Di Bab 36 kamu akan berkenalan dengan karbohidrat, protein, lemak, dan enzim: kimia di dalam tubuhmu sendiri.

BAB 36 · KIMIA KARBON & KEHIDUPAN

36 Biokimia: Molekul Kehidupan di Piring Sarapanmu

Nasi, tempe, dan telur di piringmu adalah tumpukan molekul raksasa yang menunggu dibongkar. Tubuhmu adalah pabrik kimia paling canggih di Bumi, dan pekerjanya bernama enzim.

Setelah bab ini, kamu bisa

- mengelompokkan **karbohidrat** (mono-, di-, polisakarida), menjelaskan ikatan glikosidik, dan mengujinya dengan **iodin** dan **Benedict**;
- menjelaskan **asam amino**, **ikatan peptida**, empat tingkat struktur protein, **denaturasi**, dan uji **biuret**;
- membedakan lemak **jenuh**, **tak jenuh cis**, dan **trans**, lalu menghitung **energi makanan** (4/4/9 kkal per gram);
- menjelaskan kerja **enzim** (model gembok–kunci dan *induced fit*) serta pengaruh suhu dan pH;
- menjelaskan pasangan basa **DNA**, peran **ATP**, dan kimia **fermentasi Nusantara** (tempe, tapai, kecap).

SARAPAN PENUH REAKSI

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kamu mengunyah sesuap nasi putih tawar selama dua menit tanpa menelannya. Apa yang terjadi pada rasanya?

- Tetap tawar, karena nasi sama sekali tidak mengandung gula.
- Makin asin, karena ludah mengandung banyak garam.
- Lama-lama terasa agak manis, karena ludah memecah pati menjadi gula.
- Menjadi pahit, karena pati mulai membusuk di mulut.

Jawabannya: terasa agak manis. Pati adalah rantai panjang ribuan unit glukosa yang terlalu besar untuk dikecap lidah. Ludah mengandung enzim **amilase** yang memotong rantai itu menjadi potongan kecil, terutama maltosa (dua unit glukosa), yang terasa manis. Jadi kamu baru saja melakukan reaksi hidrolisis di mulutmu sendiri!

36.1 Karbohidrat: dari gula sampai serat

Hampir semua molekul di tubuhmu tersusun dari segelintir unsur: C, H, O, N, ditambah sedikit S dan P. Ilmu yang mempelajari reaksi kimia di dalam makhluk hidup disebut **biokimia**. Kita mulai dari zat yang paling banyak kamu makan: karbohidrat.

Nama "karbohidrat" berarti *hidrat karbon*, karena rumusnya sering cocok dengan pola $\mathrm{C}_n(\mathrm{H_2O})_m$. Glukosa, $\mathrm{C_6H_{12}O_6}$, bisa ditulis $\mathrm{C_6(H_2O)_6}$. Namun hati-hati: tidak ada molekul air yang menempel di dalamnya. Atom H dan O tersebar sebagai gugus $-\mathrm{OH}$ dan gugus karbonil $\mathrm{C{=}O}$.

Bahasa sederhana · Bayangkan manik-manik. Satu manik adalah **gula sederhana**, misalnya glukosa. Dua manik yang disambung adalah gula pasir. Ribuan manik yang dirangkai menjadi kalung panjang adalah **pati** di dalam nasi dan singkong. Kalung yang dirangkai dengan cara berbeda menjadi **serat** yang membuat batang tanaman kokoh.

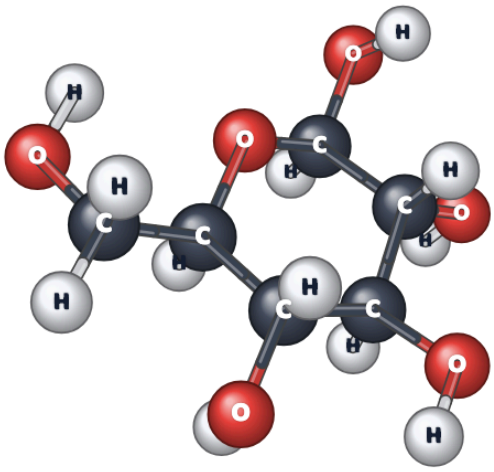
DEFINISI · KARBOHIDRAT

Karbohidrat adalah senyawa polihidroksi aldehida atau polihidroksi keton (banyak gugus $-\mathrm{OH}$ plus satu gugus karbonil), serta senyawa yang menghasilkan zat itu bila dihidrolisis. Berdasarkan jumlah unitnya:

- **monosakarida**: satu unit gula (glukosa, fruktosa, galaktosa);
- **disakarida**: dua unit gula yang dihubungkan **ikatan glikosidik** (sukrosa, laktosa, maltosa);
- **polisakarida**: ratusan sampai ribuan unit gula (amilum, glikogen, selulosa).

Golongan	Contoh	Tersusun dari	Ada di	Uji Benedict
Monosakarida	Glukosa	$\mathrm{C_6H_{12}O_6}$ (aldosa)	darah, madu, buah	+ merah bata
	Fruktosa	$\mathrm{C_6H_{12}O_6}$ (ketosa)	madu, buah, nira	+
	Galaktosa	$\mathrm{C_6H_{12}O_6}$ (aldosa)	bagian dari laktosa	+
Disakarida $\mathrm{C_{12}H_{22}O_{11}}$	Sukrosa	glukosa + fruktosa	gula pasir (tebu), gula aren	**– (tetap biru)**
	Laktosa	galaktosa + glukosa	susu	+
	Maltosa	glukosa + glukosa	kecambah, hasil cerna pati	+
Polisakarida	Amilum (pati)	α-glukosa, ikatan α(1→4) dan α(1→6)	nasi, singkong, sagu, jagung	– (uji iodin: biru-hitam)
	Glikogen	α-glukosa, sangat bercabang	hati dan otot	–
	Selulosa	β-glukosa, ikatan β(1→4)	serat sayur, kapas, kertas	–

MOLEKUL 3D **Gula di lidahmu: glukosa, fruktosa, sukrosa**



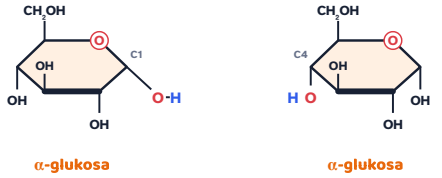
Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Glukosa (β-D-glukosa) $C_6H_{12}O_6$ Mr ≈ 180,16 PubChem ↗

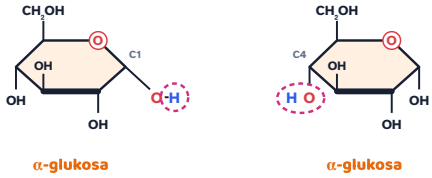
Gula darah; bahan bakar utama sel. Bentuk cincin enam.

Hitung atom karbon di cincin glukosa (cincin enam: 5 C + 1 O) dan fruktosa (cincin lima: 4 C + 1 O). Lalu buka sukrosa: temukan atom O yang menjembatani kedua cincin. Itulah ikatan glikosidik! Ketuk dua atom untuk mengukur panjang ikatan C–O (±1,43 Å).

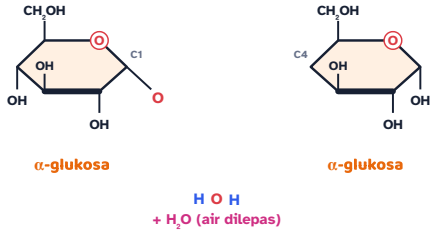
Glukosa di dalam air sebagian besar berbentuk **cincin**. Saat cincin menutup, gugus $-OH$ pada atom karbon nomor 1 (C1) bisa mengarah ke bawah bidang cincin (**α-glukosa**) atau ke atas (**β-glukosa**). Perbedaan kecil ini menentukan nasib makanan: **pati** tersusun dari α-glukosa sehingga rantainya melingkar seperti per dan mudah dicerna, sedangkan **selulosa** tersusun dari β-glukosa sehingga rantainya lurus, saling mengunci dengan ikatan hidrogen, dan tidak bisa dicerna manusia.



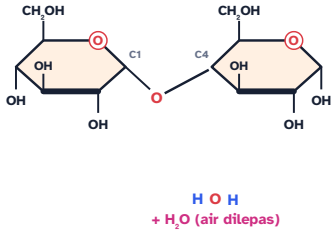
Langkah 1. Dua molekul α-glukosa (proyeksi Haworth; atom C cincin tidak ditulis). Perhatikan gugus $-\mathrm{OH}$ pada C1 molekul kiri dan pada C4 molekul kanan.



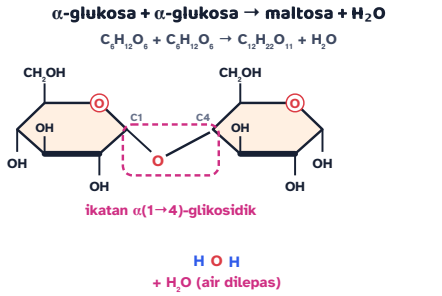
Langkah 2. Atom H dari $-\mathrm{OH}$ di C1 glukosa pertama dan gugus $-\mathrm{OH}$ di C4 glukosa kedua akan dilepas.



Langkah 3. Keduanya bergabung menjadi satu molekul air. Reaksi yang melepas molekul kecil seperti ini disebut **kondensasi**.



Langkah 4. Atom O yang tersisa kini menjembatani C1 dan C4: terbentuk **ikatan glikosidik** $\mathrm{C{-}O{-}C}$.



Langkah 5. Hasilnya maltosa, $\mathrm{C_{12}H_{22}O_{11}}$. Ulangi ribuan kali dan jadilah amilum. Kebalikannya, **hidrolisis** (penambahan air), terjadi saat kamu mencerna nasi.

Saat mencerna nasi, enzim memutus ikatan glikosidik dengan bantuan air:

$$(\mathrm{C_6H_{10}O_5})_n + n\,\mathrm{H_2O} \xrightarrow{\text{amilase, maltase}} n\,\mathrm{C_6H_{12}O_6}$$

Glukosa inilah yang dibawa darah ke seluruh sel sebagai bahan bakar. Kelebihannya disimpan di hati dan otot sebagai **glikogen**, "pati hewan" yang lebih bercabang.

Dua uji karbohidrat yang wajib kamu kenal

Uji iodin (amilum). Larutan iodin berwarna kuning-cokelat. Amilosa dalam pati membentuk heliks, dan ion poliiodida (misalnya I_3^- dan I_5^-) menyusup ke dalam heliks itu. Kompleks yang terbentuk menyerap kuat cahaya jingga dan merah sehingga tampak **biru-hitam**. Gula sederhana tidak punya heliks, jadi warnanya tetap kuning-cokelat.

Uji Benedict (gula pereduksi). Pereaksi Benedict berwarna biru karena mengandung ion Cu^{2+}. Gula yang punya gugus aldehida bebas (atau bisa membentuknya) disebut **gula pereduksi**. Saat dipanaskan, gula ini mereduksi Cu^{2+} menjadi endapan tembaga(I) oksida, Cu_2O, yang berwarna **merah bata**:

$$RCHO + 2\,Cu^{2+} + 5\,OH^- \xrightarrow{\Delta} RCOO^- + Cu_2O\downarrow\ +$$

✏️ **TRIK KAK TIRTA**

Warna Benedict itu seperti lampu lalu lintas yang kebablasan: **biru → hijau → kuning → jingga → merah bata**. Makin ke kanan, makin banyak gula pereduksinya. Untuk golongan: **mono** = satu, **di** = dua, **poli** = banyak, seperti monorel, dwiwarna, dan poligon.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Gula pasir (sukrosa) **bukan** gula pereduksi, padahal rasanya manis! Pada sukrosa, C1 glukosa dan C2 fruktosa sama-sama "terkunci" dalam ikatan glikosidik, sehingga tidak ada gugus aldehida bebas untuk mereduksi Cu^{2+}. Uji Benedict-nya tetap biru. Setelah dihidrolisis menjadi glukosa dan fruktosa, barulah hasilnya merah bata.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Kimiawan Jerman **Emil Fischer** menghabiskan bertahun-tahun di akhir abad ke-19 untuk memecahkan teka-teki gula: glukosa, fruktosa, dan mannosa ternyata sama-sama $C_6H_{12}O_6$ tetapi susunan atomnya berbeda. Ia meraih Nobel Kimia 1902. Cara menggambar gula yang ia ciptakan, proyeksi Fischer, masih dipakai sampai sekarang.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ANOMER DAN MUTAROTASI

Bentuk rantai terbuka glukosa punya gugus aldehida di C1. Gugus $-\mathrm{OH}$ di C5 menyerang karbonil itu dan membentuk **hemiasetal** siklik. C1 menjadi pusat kiral baru yang disebut **karbon anomerik**, sehingga ada dua anomer: α dan β.

Di dalam air, kedua anomer terus saling berubah melalui bentuk rantai terbuka (**mutarotasi**). Pada kesetimbangan, glukosa berisi ±36% α, ±64% β, dan kurang dari 0,1% bentuk rantai terbuka. β lebih banyak karena semua substituen besarnya berada pada posisi ekuatorial yang lebih longgar pada konformasi kursi.

Gula pereduksi = gula yang punya hemiasetal (atau hemiketal) bebas. Fruktosa adalah ketosa, tetapi dalam suasana basa pereaksi Benedict ia berubah sebagian menjadi aldosa melalui zat antara enediol, sehingga tetap positif.

36.2 Protein: kalung dari 20 jenis manik

Ototmu, rambutmu, kuku, hemoglobin di darah, antibodi, dan hampir semua enzim adalah **protein**. Protein adalah polimer yang monomernya **asam amino**. Setiap asam amino punya kerangka yang sama, yaitu atom karbon pusat (C-α) yang mengikat gugus amina $\mathrm{NH_2}$, gugus karboksil COOH, satu atom H, dan satu gugus samping **R** yang berbeda-beda.

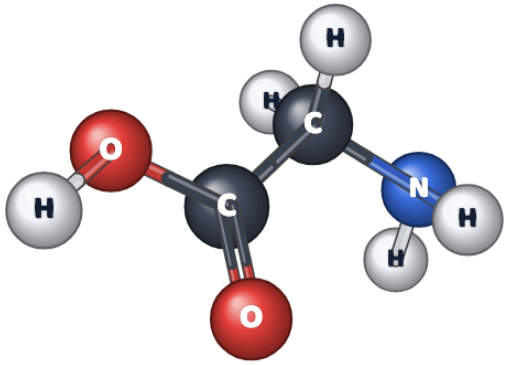
$$\mathrm{H_2N-CH(R)-COOH}$$

Bahasa sederhana · Bayangkan kamu punya manik-manik dari 20 warna berbeda. Dengan merangkai ratusan manik dalam urutan tertentu, kamu bisa membuat kalung yang tak terhitung jenisnya. Begitulah tubuhmu membuat puluhan ribu jenis protein hanya dari 20 jenis asam amino.

DEFINISI · ASAM AMINO DAN IKATAN PEPTIDA

Asam amino adalah senyawa yang memiliki gugus amina dan gugus karboksil pada atom karbon yang sama (C-α). Protein tubuh disusun dari 20 jenis asam amino; 9 di antaranya adalah **asam amino esensial** yang harus didapat dari makanan. Gugus karboksil satu asam amino dan gugus amina asam amino berikutnya bergabung melalui kondensasi membentuk **ikatan peptida** $-\mathrm{CO-NH^-}$ sambil melepas satu molekul air.

MOLEKUL 3D **Empat asam amino, satu kerangka**

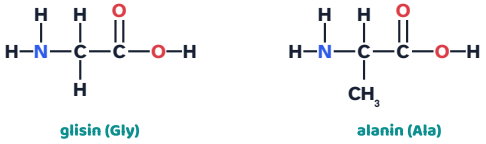


Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Glisin $C_2H_5NO_2$ Mr ≈ 75,07 PubChem ↗

Asam amino paling sederhana; tidak kiral.

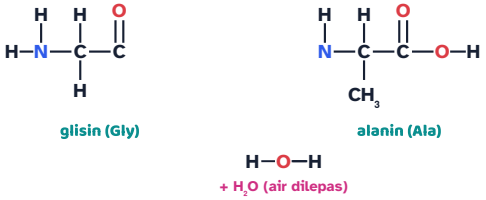
Temukan kerangka yang sama pada keempat molekul: N–C-α–C(=O)–O. Lalu bandingkan gugus R-nya: glisin hanya punya H, alanin CH_3, sistein CH_2SH (atom S kuning!), triptofan sebuah cincin ganda besar. Glisin adalah satu-satunya yang tidak kiral. Mengapa?



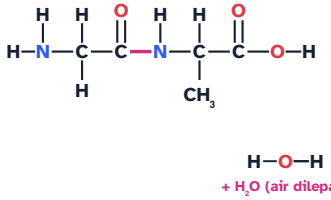
Langkah 1. Dua asam amino: glisin (R = H) dan alanin (R = CH_3). Masing-masing punya gugus amina (N biru) dan gugus karboksil.



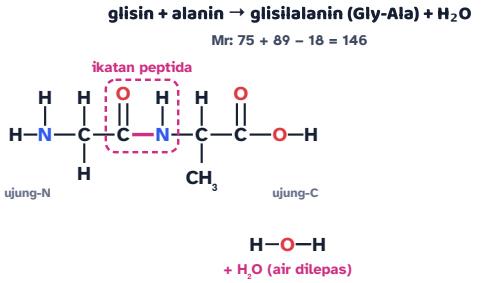
Langkah 2. Gugus $-OH$ dari karboksil glisin dan satu atom H dari gugus amina alanin akan dilepas.



Langkah 3. $-OH$ dan H bergabung menjadi air: reaksi **kondensasi**, sama seperti pembentukan maltosa.



Langkah 4. Atom C karbonil glisin kini berikatan langsung dengan atom N alanin.



Langkah 5. Ikatan $-CO-NH-$ inilah **ikatan peptida**. Dipeptida Gly-Ala masih punya ujung-N dan ujung-C bebas, jadi rantainya bisa terus memanjang.

Setiap ikatan peptida melepas satu molekul air. Rantai berisi n asam amino punya $n-1$ ikatan peptida, jadi massanya adalah jumlah massa asam amino dikurangi $(n-1)$ kali massa air.

RUMUS HIDUP

Massa polipeptida

$$M_r = n\,\bar{M} - (n-1) \times 18$$

Jumlahkan massa semua asam amino, lalu kurangi 18 (satu molekul air) untuk setiap ikatan peptida yang terbentuk.

- n Jumlah asam amino
- $\bar{M}$ Massa rata-rata asam amino g/mol
- M_r Massa molar polipeptida g/mol

MASSA MOLAR POLIPEPTIDA

5.628

g/mol

seukuran insulin (Mr nyata ±5.800)

51 asam amino → **50** ikatan peptida dan **50** molekul air dilepas. Mr ≈ **5.628** (sekitar **5,628** kDa).

Cek satuan: (g/mol) – (g/mol) = g/mol ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MASSA-POLIPEPTIDA

KERJAKAN BERSAMA

Glutation, tripeptida penjaga sel

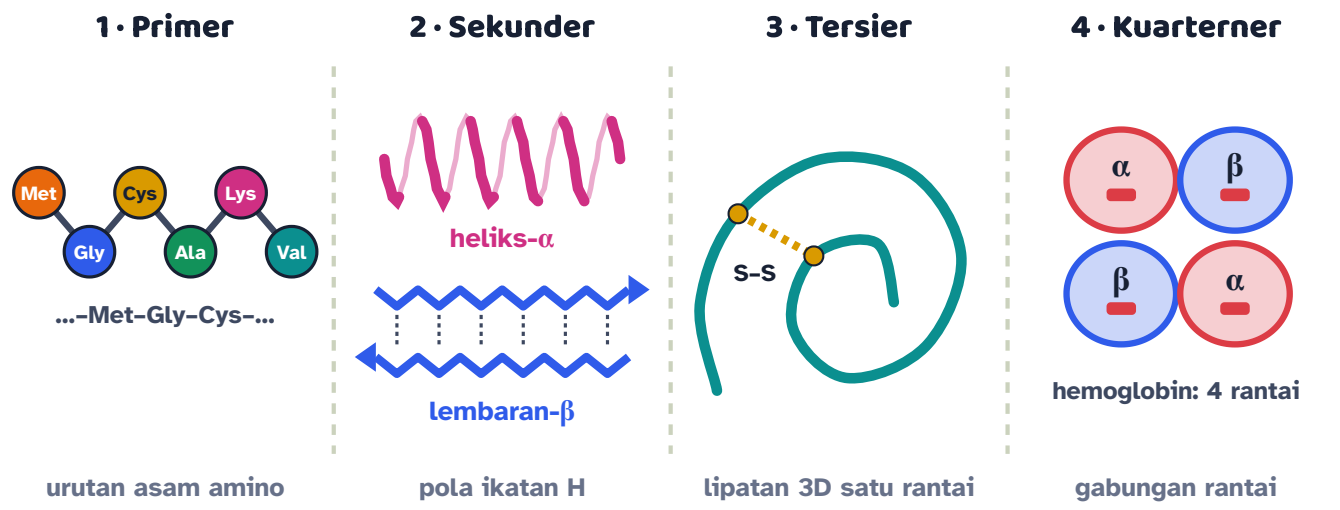
Glutation adalah tripeptida antioksidan di dalam sel, tersusun dari asam glutamat (Mr 147), sistein (Mr 121), dan glisin (Mr 75). Hitung Mr glutation.

1. Tiga asam amino membentuk $3 - 1 = 2$ ikatan peptida, jadi 2 molekul air dilepas.
2. Jumlah massa asam amino: $147 + 121 + 75 = 343$.
3. Kurangi air: $343 - 2 \times 18 = 307$.

Mr glutation = 307. Cek: rumus molekulnya $\mathrm{C_{10}H_{17}N_3O_6S}$, dan $10(12) + 17(1) + 3(14) + 6(16) + 32 = 307$ ✔

Empat tingkat struktur protein

Rantai asam amino tidak dibiarkan lurus. Ia melipat menjadi bentuk tiga dimensi yang khas, dan **bentuk itulah yang menentukan fungsinya**.



Struktur primer menentukan cara rantai melipat. Hemoglobin terdiri atas empat rantai (2 α dan 2 β), masing-masing membawa satu gugus heme berisi ion besi.

Tingkat	Apa itu?	Dijaga oleh
Primer	urutan asam amino dalam rantai	ikatan peptida (kovalen)
Sekunder	heliks-α dan lembaran-β	ikatan hidrogen antara $\mathrm{C{=}O}$ dan $\mathrm{N{-}H}$ tulang punggung
Tersier	lipatan 3D seluruh rantai	interaksi gugus R: ikatan hidrogen, ikatan ion, jembatan disulfida $\mathrm{S{-}S}$, interaksi hidrofobik
Kuarterner	gabungan beberapa rantai	interaksi yang sama dengan tersier, antarrantai

Denaturasi adalah rusaknya struktur sekunder, tersier, dan kuarterner protein sehingga bentuknya terurai dan fungsinya hilang. Pemicunya: panas, asam atau basa kuat, alkohol, garam logam berat, bahkan kocokan kuat. Putih telur yang bening menjadi putih padat saat digoreng adalah denaturasi yang bisa kamu lihat. Di Maluku Utara ada **gohu ikan**, ikan tuna mentah yang "dimatangkan" dengan perasan jeruk: asam sitrat mendenaturasi protein ikan sehingga dagingnya memutih tanpa api.

Uji biuret (protein). Pereaksi biuret adalah larutan basa (NaOH) dengan sedikit $\mathrm{CuSO_4}$, berwarna biru muda. Ion $\mathrm{Cu^{2+}}$ membentuk kompleks dengan atom N dari ikatan peptida dan warnanya berubah menjadi **ungu** (violet). Uji ini tidak perlu dipanaskan.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Denaturasi **tidak** memutus ikatan peptida. Urutan asam amino (struktur primer) tetap utuh; yang rusak hanya lipatannya, seperti tali yang kusut terurai tetapi tidak putus. Itu sebabnya telur matang masih bergizi, dan malah lebih mudah dicerna karena rantainya sudah terbuka.

KIMIA NUSANTARA · RENDANG DAN REAKSI MAILLARD

Mengapa rendang berwarna cokelat gelap dan harum? Selama berjam-jam dimasak, santan menguap airnya dan suhu minyak naik jauh di atas 100 °C. Pada suhu itu terjadi **reaksi Maillard**: gugus karbonil gula pereduksi bereaksi dengan gugus amina asam amino dan protein daging. Hasilnya ratusan senyawa aroma (seperti pirazina dan furan) dan pigmen cokelat yang disebut **melanoidin**. Reaksi yang sama memberi warna pada kerak nasi, roti panggang, kopi sangrai, dan kecap manis. Kimiawan Prancis Louis-Camille Maillard menelitinya pada 1912; para juru masak Minang sudah "menguasainya" jauh sebelum itu.

MITOS

"Telur yang dimasak sampai matang kehilangan proteinnya."

FAKTA

Memasak hanya mendenaturasi protein; ikatan peptidanya tetap utuh, jadi jumlah proteinnya sama. Protein telur matang justru lebih mudah dipotong enzim pencernaan.

MITOS

"Protein hanya ada di daging."

FAKTA

Tempe, tahu, kacang-kacangan, dan ikan teri adalah sumber protein yang sangat baik. Tempe berisi sekitar 19 g protein per 100 g, hampir setara daging ayam yang jauh lebih mahal.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ION ZWITER DAN TITIK ISOELEKTRIK

Dalam padatan dan larutan netral, asam amino tidak berbentuk $\mathrm{H_2N{-}CHR{-}COOH}$, melainkan **ion zwiter** $\mathrm{H_3N^+{-}CHR{-}COO^-}$: proton dari gugus karboksil pindah ke gugus amina. Itulah sebabnya asam amino bertitik leleh tinggi (glisin terurai ±233 °C) dan larut baik dalam air, mirip garam.

Pada pH rendah, bentuk dominannya kation $\mathrm{H_3N^+{-}CHR{-}COOH}$; pada pH tinggi, anion $\mathrm{H_2N{-}CHR{-}COO^-}$. pH saat muatan bersihnya nol disebut **titik isoelektrik** (pI). Untuk glisin, $\mathrm{pI} = \frac{1}{2}(\mathrm{p}K_{a1} + \mathrm{p}K_{a2}) = \frac{1}{2}(2{,}34 + 9{,}60) = 5{,}97$. Pada pI, protein paling sukar larut, prinsip di balik penggumpalan kasein susu saat dibuat dadih atau keju.

Ikatan peptida bersifat **planar** karena pasangan elektron bebas N berdelokalisasi ke C=O (karakter ikatan rangkap parsial, C–N ±1,33 Å). Satu catatan untuk olimpiade: uji biuret butuh minimal **dua** ikatan peptida, jadi asam amino bebas dan dipeptida memberi hasil negatif.

36.3 Lipid: lemak, minyak, dan sabun

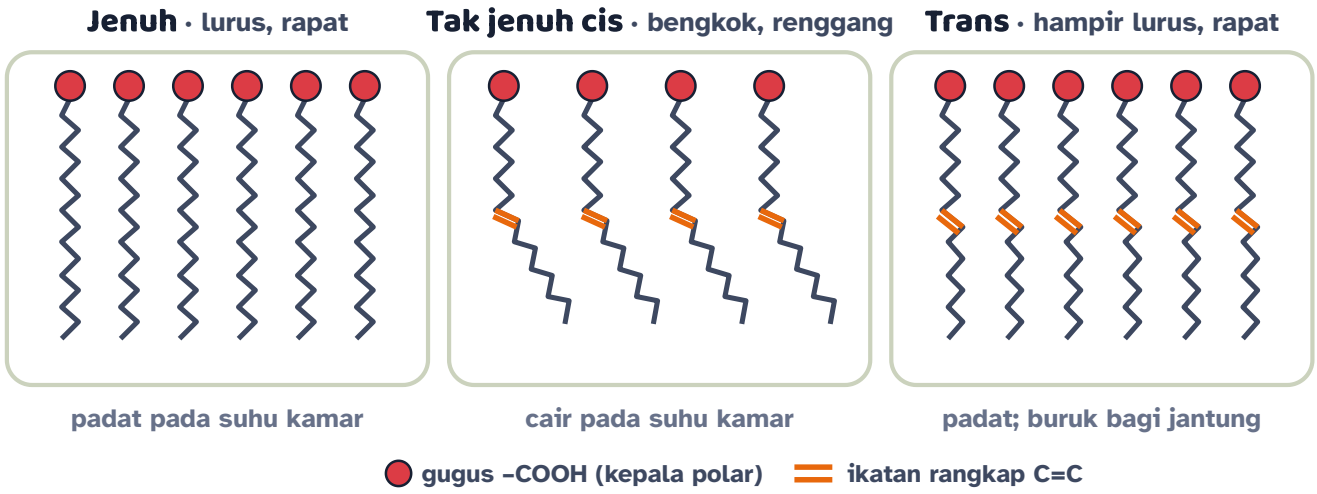
Lipid adalah kelompok biomolekul yang sukar larut dalam air tetapi larut dalam pelarut nonpolar. Anggotanya beragam: lemak dan minyak, fosfolipid penyusun membran sel, lilin, dan steroid seperti kolesterol. Lemak dan minyak di dapurmu sebagian besar berupa **trigliserida**, yaitu ester dari satu molekul gliserol dan tiga molekul asam lemak:

$$\mathrm{C_3H_5(OH)_3 + 3\,RCOOH \longrightarrow C_3H_5(OOCR)_3 + 3\,H_2C}$$

Gugus R adalah rantai hidrokarbon panjang (umumnya 12–22 atom C). Bentuk rantai inilah yang membedakan mentega yang padat dari minyak goreng yang cair.

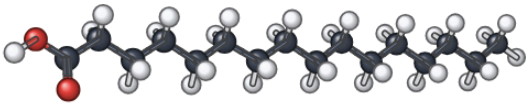
DEFINISI · ASAM LEMAK JENUH, TAK JENUH, DAN TRANS

- **Asam lemak jenuh**: semua ikatan C–C tunggal; rantainya lurus dan bisa tersusun rapat. Contoh: asam palmitat (16 C), asam stearat (18 C), asam laurat (12 C).
- **Asam lemak tak jenuh**: punya satu atau lebih ikatan rangkap $\mathrm{C{=}C}$. Di alam, ikatan rangkapnya hampir selalu berbentuk **cis** sehingga rantai **bengkok** ±30°. Contoh: asam oleat (1 ikatan rangkap), asam linoleat (2).
- **Lemak trans**: asam lemak tak jenuh dengan ikatan rangkap **trans**; rantainya hampir lurus seperti lemak jenuh. Terbentuk terutama saat minyak dihidrogenasi sebagian di pabrik.



Rantai lurus (jenuh dan trans) berjajar rapat sehingga gaya London antarrantai kuat dan titik lelehnya tinggi. Tekukan cis membuat rantai renggang, gaya antarmolekul lemah, dan minyak tetap cair.

MOLEKUL 3D — Lurus atau bengkok? Asam lemak dan kawan-kawannya



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam palmitat $C_{16}H_{32}O_2$ Mr ≈ 256,43 PubChem ↗

Asam lemak jenuh 16 karbon, banyak di minyak sawit (dinamai dari palma).

Bandingkan asam palmitat yang lurus dengan asam oleat yang bengkok tepat di ikatan rangkapnya. Lalu lihat versi mininya: *cis*-2-butena (bengkok) dan *trans*-2-butena (lurus). Ganti ke model isi ruang: mana yang lebih mudah ditumpuk rapat? Terakhir, gliserol (tulang punggung trigliserida) dan kolesterol (empat cincin menyatu).

Lemak/minyak	Asam lemak jenuh	Tak jenuh tunggal	Tak jenuh ganda	Wujud pada ±27 °C
Minyak kelapa	±90% (terutama laurat)	±7%	±2%	cair, membeku di bawah ±24 °C
Minyak sawit	±50% (terutama palmitat)	±40% (oleat)	±10%	cair–semipadat
Mentega	±65%	±28%	±4%	padat lunak
Minyak kedelai	±15%	±23%	±58%	cair

KIMIA NUSANTARA · NEGERI SAWIT DAN KELAPA

Indonesia adalah produsen minyak sawit terbesar di dunia. Buah sawit menghasilkan dua minyak berbeda: minyak dari daging buah (kaya palmitat dan oleat) dan minyak inti sawit (kaya laurat, mirip minyak kelapa). Minyak sawit mentah berwarna jingga kemerahan karena kaya β-karoten, bahan baku vitamin A. Di dapur Indonesia, minyak goreng sawit yang disimpan di tempat sejuk kadang tampak keruh atau berbutir: itu trigliserida jenuh yang mulai membeku, bukan tanda minyak rusak.

Mengapa lemak "menggemukkan"? Rantai hidrokarbon kaya ikatan C–H dan miskin oksigen, sehingga saat dioksidasi di sel ia melepas energi jauh lebih banyak per gram daripada karbohidrat yang sudah setengah teroksidasi (banyak gugus $-\mathrm{OH}$). Ahli gizi memakai **angka Atwater**: karbohidrat dan protein ±4 kkal/g, lemak ±9 kkal/g (1 kkal = 4,184 kJ).

RUMUS HIDUP **Energi makanan (angka Atwater)**

$$E = 4\,m_K + 4\,m_P + 9\,m_L$$

Setiap gram karbohidrat dan protein memberi sekitar 4 kkal, sedangkan setiap gram lemak memberi sekitar 9 kkal.

m_K Karbohidrat g | m_P Protein g | m_L Lemak g | E Energi kkal

ENERGI
578
kkal

kira-kira sepiring nasi uduk lengkap

75 g karbohidrat + **20** g protein + **22** g lemak ≈ **578** kkal = **2.418,352** kJ. Lemak menyumbang **34,256**% energinya.

Cek satuan: g × (kkal/g) = kkal ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENERGI-MAKANAN

CONTOH **Energi sepotong tempe goreng**

Sepotong tempe goreng mengandung 10 g protein, 9 g lemak (termasuk minyak yang terserap), dan 6 g karbohidrat. Berapa kkal energinya?

1. Protein: $10 \times 4 = 40$ kkal.
2. Lemak: $9 \times 9 = 81$ kkal.
3. Karbohidrat: $6 \times 4 = 24$ kkal. Jumlah: $40 + 81 + 24 = 145$ kkal.

±145 kkal (±607 kJ). Lebih dari separuhnya berasal dari lemak, padahal massa lemaknya lebih kecil daripada protein. Itulah kekuatan angka 9!

Trigliserida juga bahan baku **sabun**. Jika dipanaskan dengan basa kuat, ikatan esternya terhidrolisis (**penyabunan** atau saponifikasi) menjadi gliserol dan garam asam lemak, yaitu sabun:

$$\mathrm{C_3H_5(OOCC_{15}H_{31})_3 + 3\,NaOH \longrightarrow C_3H_5(OH)_3 + 3\,C}$$

Ujung $-\mathrm{COO^-}$ sabun suka air, ekornya yang panjang suka minyak. Ribuan molekul sabun mengepung tetes minyak membentuk misel, lalu terbawa air bilasan (ingat koloid di Bab 25).

⚠ **KESELAMATAN**
Jangan membuat sabun sendiri dengan soda api (NaOH) di rumah tanpa pengawasan guru. Soda api sangat korosif: dapat membakar kulit dan membutakan mata, dan pelarutannya melepas panas hebat. Di laboratorium, pakai kacamata pelindung dan sarung tangan.

MITOS
"Semua lemak itu jahat dan harus dihindari."

FAKTA
Tubuh butuh lemak untuk membran sel, hormon, dan menyerap vitamin A, D, E, K. Yang perlu dibatasi adalah lemak trans dan kelebihan lemak jenuh, bukan semua lemak.

MITOS
"Minyak goreng berlabel 'nonkolesterol' lebih sehat daripada minyak nabati lain."

FAKTA
Kolesterol hanya dibuat oleh hewan. Semua minyak dari tumbuhan (sawit, kelapa, kedelai) memang tidak mengandung kolesterol, jadi label itu tidak membedakan apa-apa.

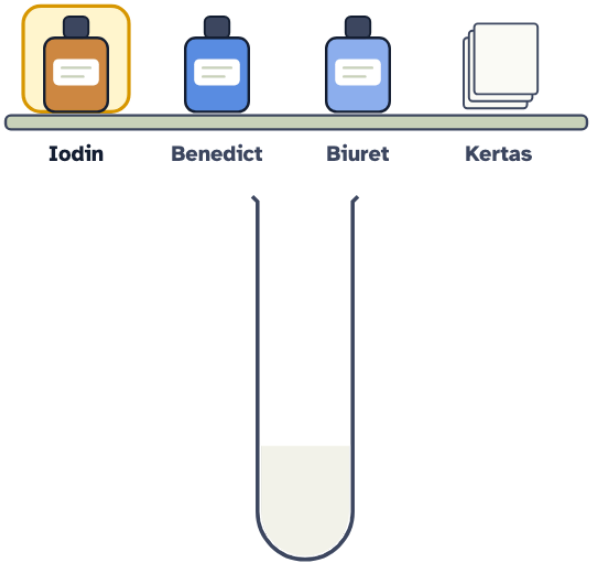
Saatnya jadi detektif gizi

Kamu sudah mengenal empat uji: iodin untuk amilum, Benedict untuk gula pereduksi, biuret untuk protein, dan noda pada kertas untuk lemak (lemak membuat kertas tembus cahaya dan nodanya tidak hilang setelah kering). Sekarang ujilah bahan pangan di laboratorium virtual ini.

LAB MINI

Detektif Gizi: uji makanan virtual

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-36



Tabel hasil uji

	Iodin	Bened.	Biuret	Noda
Air (kontrol)	·	·	·	·
Tapioka	·	·	·	·
Nasi	·	·	·	·
Gula pasir	·	·	·	·
Air kelapa	·	·	·	·
Madu	·	·	·	·
Pisang matang	·	·	·	·
Susu	·	·	·	·
Putih telur	·	·	·	·
Tempe	·	·	·	·
Minyak goreng	·	·	·	·

– negatif + lemah ++ sedang +++ kuat

Sampel: Nasi yang dihaluskan

Ketuk botol pereaksi di rak atas.

Pengamatan

`Sampel di dalam tabung. Ketuk botol pereaksi.`

Kesimpulan

—

Pilih sampel (atau ketuk barisnya di tabel), lalu ketuk botol pereaksi untuk meneteskannya. Uji Benedict harus **dipanaskan** di penangas air dulu! Isi seluruh tabel. Tantangan: sampel mana yang manis tetapi Benedict-nya negatif? Sampel mana yang positif pada tiga uji sekaligus?

36.4 Enzim: katalis kehidupan

Tebak Dulu!

Laras membuat dua mangkuk jeli dari gelatin. Mangkuk A diberi potongan nanas segar, mangkuk B diberi nanas yang sudah direbus 5 menit. Setelah semalam di kulkas, apa yang terjadi?

- Keduanya mengeras sama baiknya.
- A mengeras, B tetap cair karena nanas rebus lebih berair.
- A tetap lembek dan berair, B mengeras.
- Keduanya tetap cair karena nanas terlalu asam.

Jawabannya: A lembek, B mengeras. Gelatin adalah protein. Nanas segar mengandung enzim **bromelain** yang memotong rantai protein gelatin sehingga jaringannya tidak bisa terbentuk. Perebusan merusak bentuk bromelain (denaturasi), jadi nanas rebus atau nanas kaleng tidak lagi "memakan" gelatin. Asamnya sama saja; yang berbeda adalah enzimnya.

Di laboratorium, memecah protein menjadi asam amino butuh asam klorida 6 M dan pemanasan ±110 °C selama sehari. Di ususmu, pekerjaan yang sama selesai dalam beberapa jam pada 37 °C dan pH hampir netral. Rahasianya adalah **enzim**.

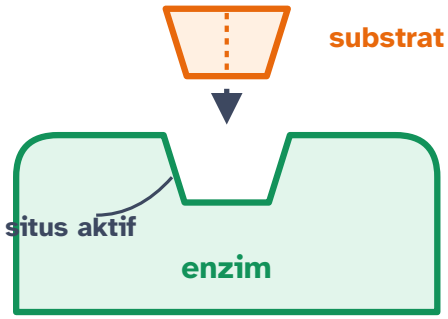
Bahasa sederhana · Enzim seperti tukang potong yang sangat cekatan dan sangat pemilih. Setiap enzim hanya mau memotong satu jenis "barang". Amilase hanya memotong pati, laktase hanya memotong gula susu. Enzim tidak ikut habis: setelah selesai memotong, ia siap bekerja lagi, ribuan kali per detik.

DEFINISI · ENZIM

Enzim adalah katalis biologis, hampir selalu berupa protein, yang mempercepat reaksi di makhluk hidup dengan menurunkan energi aktivasi (Bab 21) tanpa ikut habis bereaksi. Zat yang diubah enzim disebut **substrat**. Substrat terikat pada bagian kecil enzim yang bentuknya khas, yaitu **situs aktif**, membentuk kompleks enzim–substrat:

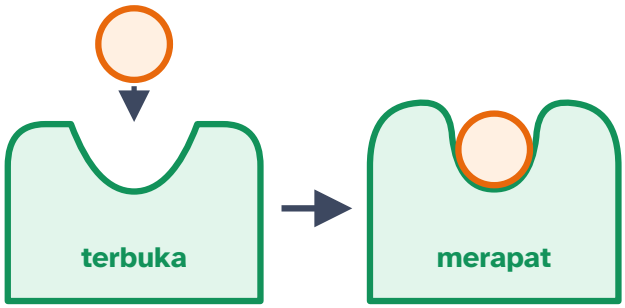
$$\mathrm{E} + \mathrm{S} \rightleftharpoons \mathrm{ES} \longrightarrow \mathrm{E} + \mathrm{P}$$

Model gembok–kunci (1894)



bentuk situs aktif kaku, pas seperti kunci

Model *induced fit* (1958)



situs aktif berubah bentuk saat substrat datang

Kedua model sama-sama menjelaskan mengapa enzim sangat spesifik. Model *induced fit* lebih sesuai data modern: situs aktif lentur dan "merapat" sehingga ikatan dalam substrat tertekan dan lebih mudah putus.

TAMU DARI MASA LALU

Lagi-lagi **Emil Fischer**: pada 1894 ia mengusulkan bahwa enzim dan substratnya cocok "seperti gembok dan kunci". Tetapi apakah enzim itu protein? Banyak ilmuwan meragukannya, sampai **James Sumner** (AS) berhasil mengkristalkan enzim urease dari kacang koro pada 1926 dan membuktikan bahwa kristal itu protein. Ia meraih Nobel Kimia 1946. Pada 1958, **Daniel Koshland** menyempurnakan gagasan Fischer dengan model *induced fit*.

ATURAN · FAKTOR YANG MEMENGARUHI KERJA ENZIM

- **Suhu.** Laju naik seiring suhu (tumbukan makin sering dan bertenaga) sampai **suhu optimum**. Di atasnya, enzim terdenaturasi dan laju anjlok tajam.
- **pH.** Setiap enzim punya **pH optimum**. pH yang jauh dari optimum mengubah muatan gugus R di situs aktif sehingga bentuknya berubah.
- **Konsentrasi substrat.** Laju naik, lalu mendatar saat semua situs aktif sudah sibuk (jenuh).
- **Konsentrasi enzim** dan **inhibitor** (zat penghambat, misalnya beberapa obat dan racun).

Enzim	Sumber	Substrat → hasil	pH optimum	Suhu optimum
Amilase ludah	kelenjar ludah	pati → maltosa	±6,8	±37 °C
Pepsin	lambung	protein → peptida	±2	±37 °C
Tripsin	pankreas (usus halus)	protein → peptida	±8	±37 °C
Papain	getah pepaya	protein → peptida	±6–7	±60–70 °C

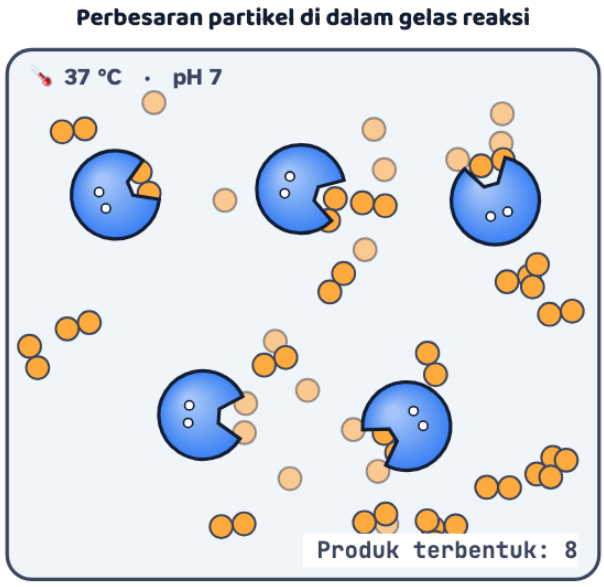
Bromelain	buah dan batang nanas	protein → peptida	±6–7	±50–60 °C
Katalase	hati, kentang	$2\,H_2O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + O_2$	±7	±37 °C

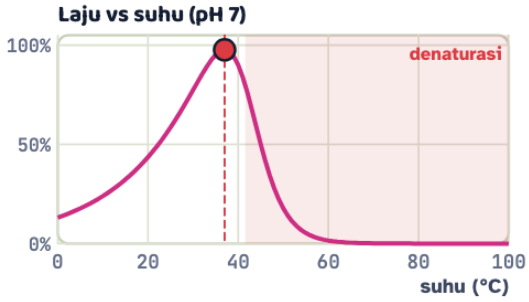
TRIK KAK TIRTA

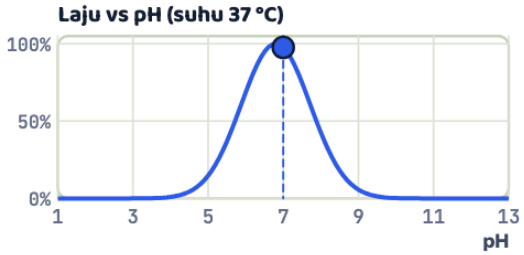
Nama enzim hampir selalu berakhiran **-ase** dan menyebut substratnya: **amil**ase memecah **amil**um, **lip**ase memecah **lip**id, **lakt**ase memecah **lakt**osa, **prote**ase memecah **prote**in. Kalau ketemu nama aneh seperti "ure-ase", tebak saja: pemecah urea. Biasanya benar!

LAB MINI **Enzim di Dapur: cari suhu dan pH terbaiknya**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-36







Kurva = laju awal enzim segar · ▪ = titik catatanmu

Laju sekarang: 98% · enzim utuh 100%

Laju relatif	Enzim utuh	Keadaan	Optimum enzim ini
98 %	100 %	mendekati optimum 👍	37 °C · pH 6,8

Produk terbentuk
8

Pilih enzim, lalu geser suhu dan pH (atau ketuk langsung grafiknya). Kapan potongan substrat paling banyak dihasilkan? Coba panaskan amilase sampai 70 °C, lalu dinginkan lagi ke 37 °C. Apakah lajunya kembali? Tekan 📌 untuk mencatat titik data dan bandingkan enzim pepaya dengan enzim bakteri sumber air panas.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Enzim tidak "mati" saat dipanaskan, karena enzim memang bukan makhluk hidup; ia hanya molekul protein. Yang terjadi adalah **denaturasi**: ikatan hidrogen dan interaksi lain yang menjaga lipatannya putus, bentuk situs aktif rusak, dan substrat tidak bisa lagi "masuk". Pada banyak enzim kerusakan ini permanen, jadi mendinginkannya kembali tidak memulihkan aktivitasnya. Di bawah suhu optimum, enzim tidak rusak, hanya lambat.

KERJAKAN BERSAMA **Membaca data percobaan amilase**

Bima mencampur larutan pati dengan ekstrak ludah pada berbagai suhu. Setiap 10 detik ia meneteskan sedikit campuran ke iodin, sampai warna biru-hitam tidak muncul lagi. Waktunya: 20 °C → 240 s; 30 °C → 120 s; 37 °C → 60 s; 45 °C → 90 s; 60 °C → tidak pernah hilang. Tentukan laju relatif (1000/t) dan suhu optimumnya.

1. Laju berbanding terbalik dengan waktu: 20 °C → 4,2; 30 °C → 8,3; 37 °C → 16,7; 45 °C → 11,1 (satuan $s^{-1} \times 10^{-3}$).
2. Laju tertinggi pada 37 °C, jadi suhu optimum ±37 °C (antara 30 dan 45 °C).
3. Pada 60 °C pati tidak pernah habis: amilase sudah terdenaturasi sehingga lajunya praktis nol.

Suhu optimum amilase ludah ±37 °C, sama dengan suhu tubuh. Kenaikan 20 → 30 °C hampir menggandakan laju, tetapi di atas optimum laju jatuh jauh lebih tajam.

Bagaimana jika suhu dan pH sudah optimum, tetapi substrat terus ditambah? Laju tidak naik tanpa batas. Bayangkan loket karcis: jika semua petugas sudah sibuk, menambah antrean tidak mempercepat pelayanan. Grafik di bawah menunjukkan kejenuhan itu.

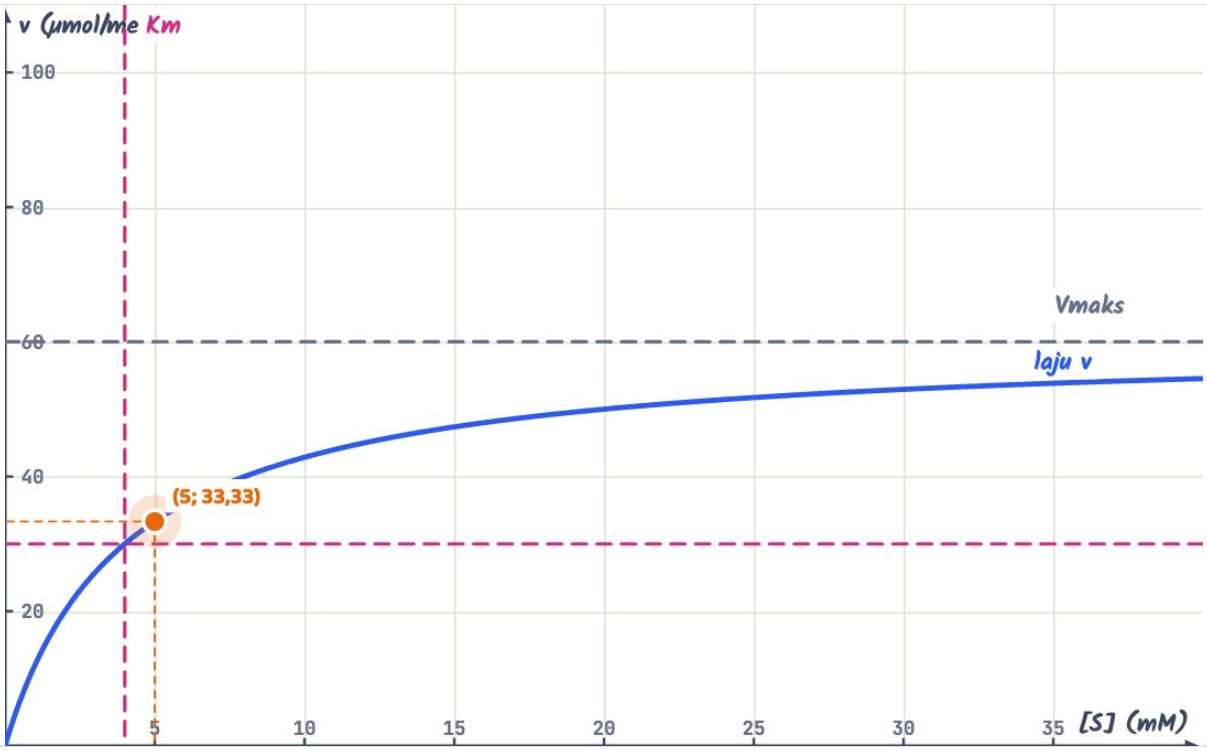
GRAFIK HIDUP

Laju enzim makin jenuh: semua 'gembok' sibuk

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-36

$$v = \frac{V_{\max}\,[S]}{K_M + [S]}$$

$[S] = 5$ mM: $v = 33{,}33\ \mu$mol/menit $= 55{,}56\%$ dari $V_{\max}$



laju v
33,3 µmol/menit

situs aktif yang sibuk
56 %

Seret titik jingga ke kanan. Pada [S] kecil, laju naik hampir lurus; pada [S] besar, kurva mendatar mendekati Vmaks. Perkecil Km: enzim yang lebih "lengket" pada substratnya cepat jenuh.

ID

KIMIA NUSANTARA · PELUNAK DAGING DARI KEBUN

Ibu-ibu di banyak daerah membungkus daging dengan **daun pepaya** atau mengolesinya dengan parutan **nanas** sebelum dimasak. Getah pepaya mengandung **papain** dan nanas mengandung **bromelain**. Keduanya protease yang memotong serat protein otot dan kolagen sehingga daging lebih empuk. Papain cukup tahan panas (optimum ±65 °C), jadi ia tetap bekerja di awal pemasakan. Jangan terlalu lama: daging yang dibiarkan semalaman dengan nanas bisa menjadi lembek seperti bubur!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERSAMAAN MICHAELIS–MENTEN

Untuk mekanisme $\mathrm{E} + \mathrm{S} \rightleftharpoons \mathrm{ES} \longrightarrow \mathrm{E} + \mathrm{P}$ dengan anggapan keadaan tunak ([ES] tetap), laju awal adalah

$$v = \frac{V_{\max}[S]}{K_M + [S]} \qquad V_{\max} = k_{\mathrm{cat}}[E]_0$$

K_M adalah konsentrasi substrat saat $v = \tfrac{1}{2}V_{\max}$; makin kecil K_M, makin besar afinitas enzim terhadap substrat. Pada $[S] \ll K_M$ reaksi orde satu terhadap S; pada $[S] \gg K_M$ orde nol. k_{cat} (bilangan pergantian) bisa sangat besar: satu molekul katalase mengurai jutaan molekul $\mathrm{H_2O_2}$ per detik. Kebalikan persamaan ini, $\frac{1}{v} = \frac{K_M}{V_{\max}} \cdot \frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_{\max}}$, memberi garis lurus (plot Lineweaver–Burk) yang dipakai untuk membedakan jenis inhibitor.

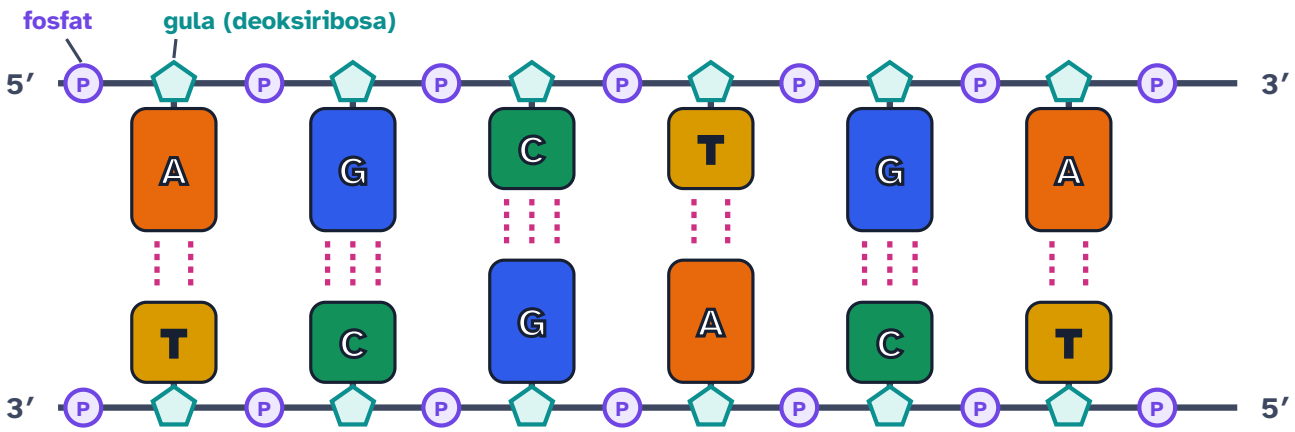
36.5 Asam nukleat: DNA, RNA, dan kode kehidupan

Resep untuk membuat semua proteinmu tersimpan dalam molekul raksasa bernama **DNA** (asam deoksiribonukleat). Jika DNA dari satu sel tubuhmu direntangkan, panjangnya sekitar 2 meter, padahal semuanya dilipat di dalam inti sel yang ukurannya hanya beberapa mikrometer!

Bahasa sederhana · DNA bentuknya seperti tangga tali yang dipilin. Kedua tiang tangganya terbuat dari gula dan fosfat. Anak tangganya adalah pasangan "huruf" kimia: A selalu bergandengan dengan T, dan G selalu bergandengan dengan C. Urutan huruf-huruf itulah resep kehidupan.

DEFINISI · NUKLEOTIDA DAN ASAM NUKLEAT

Nukleotida adalah monomer asam nukleat, tersusun atas tiga bagian: **gula pentosa** (deoksiribosa pada DNA, ribosa pada RNA), **gugus fosfat**, dan **basa nitrogen**. Basa DNA ada empat: adenin (A) dan guanin (G) yang berupa **purin** (dua cincin), serta timin (T) dan sitosin (C) yang berupa **pirimidin** (satu cincin). Pada RNA, timin diganti **urasil** (U). Nukleotida saling terhubung lewat ikatan fosfodiester membentuk rantai **asam nukleat**.



A = T: 2 ikatan hidrogen · G ≡ C: 3 ikatan hidrogen (garis putus-putus)

purin (A, G: dua cincin, kotak panjang) selalu berpasangan dengan pirimidin (T, C: satu cincin)

Dua untai DNA berjalan berlawanan arah (antiparalel, 5′→3′ dan 3′→5′). Purin selalu berhadapan dengan pirimidin, sehingga lebar "tangga" tetap ±2 nm di sepanjang molekul.

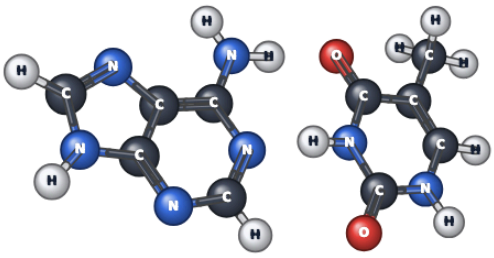
ATURAN · PASANGAN BASA KOMPLEMENTER (WATSON–CRICK)

A berpasangan dengan **T** melalui **dua** ikatan hidrogen; **G** berpasangan dengan **C** melalui **tiga** ikatan hidrogen. Akibatnya, dalam DNA beruntai ganda berlaku **aturan Chargaff**:

$$\%A = \%T \qquad \%G = \%C \qquad \%A + \%G = 50\%$$

MOLEKUL 3D

Pasangan basa DNA: siapa bergandengan dengan siapa?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Pasangan basa A–T $C_{10}H_{11}N_7O_2$ Mr ≈ 261,24

Adenin (kiri) dan timin (kanan) dalam satu bidang, dihubungkan dua ikatan hidrogen: N–H···N (N4···N18) dan N–H···O (N5···O16), masing-masing ±2,9 Å. Atom H di bawah (pada N9 adenin dan N1 timin) menggantikan gula deoksiribosa.

Mulai dari pasangan A–T: ketuk atom N4 (adenin) lalu N18 (timin), kemudian N5 dan O16. Keduanya berjarak ±2,9 Å: itulah dua ikatan hidrogen. Ganti ke pasangan G–C dan ukur O1–N19, N3–N18, N6–O17: ada tiga! Lalu bandingkan basa-basa tunggalnya. Apa beda timin dan urasil?

⏱ ADU CEPAT Aturan Chargaff kilat

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-36

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

A = T dan G = C, jadi A + G = 50%. Maka G = 50 − A.

COBA SENDIRI Menghitung ikatan hidrogen dalam DNA

Sepotong DNA beruntai ganda terdiri atas 100 pasang basa dan mengandung 30% adenin (dari semua basa). Berapa jumlah ikatan hidrogen antarbasanya?

1. Jumlah basa = $2 \times 100 = 200$. Adenin = 30% × 200 = 60, maka timin juga 60.
2. Guanin + sitosin = 200 − 120 = 80, jadi G = C = 40.
3. Pasangan A–T = 60, masing-masing 2 ikatan H: $60 \times 2 = 120$.
4. Pasangan G–C = 40, masing-masing 3 ikatan H: $40 \times 3 = 120$.

Total 240 ikatan hidrogen. DNA yang kaya G–C lebih sukar "dibuka" (dipisahkan untainya) daripada DNA yang kaya A–T.

RNA (asam ribonukleat) berbeda dari DNA dalam tiga hal: gulanya ribosa (punya $-\mathrm{OH}$ tambahan di C2′), basanya urasil menggantikan timin, dan umumnya beruntai tunggal. RNA membawa salinan resep dari DNA ke ribosom, "dapur" sel tempat asam amino dirangkai menjadi protein sesuai urutan basa: setiap tiga basa (kodon) menyandi satu asam amino.

🕰 TAMU DARI MASA LALU

Pada 1950, **Erwin Chargaff** menemukan bahwa jumlah A selalu sama dengan T, dan G sama dengan C. Pada 1952, **Rosalind Franklin** dan mahasiswanya Raymond Gosling memotret DNA dengan sinar-X; "Foto 51" mereka menunjukkan pola heliks yang jelas. Memakai data itu, **James Watson** dan **Francis Crick** membangun model heliks ganda pada 1953. Watson, Crick, dan Maurice Wilkins meraih Nobel 1962. Franklin telah wafat pada 1958, dan sumbangannya yang sangat penting kini diakui luas.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENCAIRKAN DNA DAN MESIN FOTOKOPI GEN

Jika dipanaskan, untai ganda DNA terpisah ("meleleh"). Suhu saat separuh DNA telah terpisah disebut T_m. DNA kaya G–C punya T_m lebih tinggi karena tiap pasangan G–C punya tiga ikatan hidrogen, dan susunan bertumpuk basa G–C juga lebih stabil.

Teknik **PCR** (reaksi berantai polimerase) memanfaatkan hal ini: DNA dipanaskan ±95 °C agar untainya terpisah, didinginkan ±55 °C agar primer menempel, lalu ±72 °C agar enzim DNA polimerase menyalin untai baru. Enzim biasa akan terdenaturasi pada 95 °C, jadi dipakai polimerase dari bakteri sumber air panas (*Thermus aquaticus*), yang strukturnya tetap kokoh pada suhu itu. Setiap siklus menggandakan jumlah DNA: 30 siklus memberi $2^{30} \approx 10^9$ salinan.

36.6 Fermentasi Nusantara dan energi sel

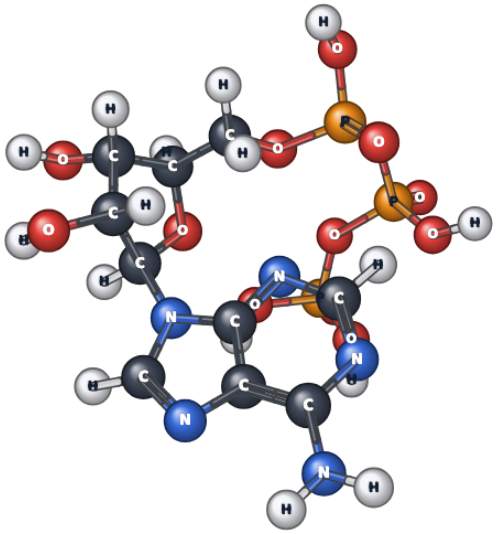
Semua energi di piringmu berasal dari Matahari. Tumbuhan menangkapnya lewat **fotosintesis**, lalu sel-selmu melepaskannya kembali lewat **respirasi**. Kedua reaksi ini saling berkebalikan:

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \xrightarrow[\text{klorofil}]{\text{cahaya}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \qquad \Delta H = +2$$

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O \qquad \Delta H = -280$$

Energi respirasi tidak dilepas sekaligus seperti api, tetapi dicicil lewat puluhan langkah enzim dan disimpan dalam molekul **ATP** (adenosin trifosfat), "mata uang energi" sel. Saat ATP dihidrolisis menjadi ADP dan fosfat, energi dilepas untuk kontraksi otot, mengirim sinyal saraf, dan membangun protein.

MOLEKUL 3D **ATP: baterai isi ulang di setiap sel**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

ATP (adenosin trifosfat) $C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3$ Mr ≈ 507,18 PubChem ↗

'Mata uang energi' sel; energi dilepas saat ikatan fosfat terakhir dihidrolisis.

Temukan tiga bagian ATP: basa adenin (cincin ganda dengan banyak N), gula ribosa (cincin lima), dan rantai tiga gugus fosfat (atom P jingga). Ikatan fosfat terakhirlah yang "dipatahkan" untuk melepas energi.

Tanpa oksigen, sel ragi dan beberapa bakteri tetap bisa memperoleh sedikit energi lewat **fermentasi**. Glukosa hanya dipecah sebagian, menghasilkan etanol atau asam laktat:

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{ragi}} 2\,C_2H_5OH + 2\,CO_2 \qquad C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{bal}}$$

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi kehidupan**

$$[-\ 1\ +]\ CO_2 + [-\ 1\ +]\ H_2O \rightarrow [-\ 1\ +]\ C_6H_{12}O_6 + [-\ 1\ +]\ O_2$$

Unsur	Kiri	Kanan	
C	1 ●	6 ●●●●●●	✕
O	3 ●●●	8 ●●●●●●●●	✕
H	2 ○○	12 ○○○○○○○○○○○○	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 6 null

Mulailah dari fotosintesis dan respirasi: apa yang kamu perhatikan tentang koefisiennya? Lalu fermentasi alkohol (tapai), fermentasi asam laktat (yoghurt dan otot yang lelah), hidrolisis sukrosa menjadi glukosa + fruktosa (keduanya $C_6H_{12}O_6$), dan penyabunan tripalmitin.

Indonesia adalah surga makanan fermentasi. Di setiap daerah, kapang, khamir (ragi), dan bakteri bekerja sebagai "koki kimia" yang memecah molekul besar menjadi molekul kecil yang lebih lezat dan lebih mudah dicerna.

Pangan	Bahan	Mikroba utama	Perubahan kimia
Tempe	kedelai rebus	kapang *Rhizopus*	protease: protein → peptida & asam amino; lipase: lemak → asam lemak + gliserol
Tapai singkong/ketan	singkong atau ketan kukus	ragi tapai (campuran kapang & khamir)	pati → glukosa (manis) → etanol + CO_2; sebagian menjadi asam
Kecap	kedelai	kapang *Aspergillus*, lalu bakteri & khamir dalam air garam	protein → asam amino (gurih, glutamat); dengan gula aren dimasak: reaksi Maillard
Tauco	kedelai	kapang, lalu fermentasi dalam air garam	protein → peptida & asam amino
Terasi	udang rebon + garam	bakteri tahan garam	protein → asam amino & amina (aroma tajam)
Dadih	susu kerbau dalam bambu	bakteri asam laktat	laktosa → asam laktat; pH turun, kasein menggumpal

KIMIA NUSANTARA · TEMPE, WARISAN KIMIA DARI JAWA

Tempe sudah disebut dalam *Serat Centhini*, naskah Jawa awal abad ke-19, dan kini dikenal di seluruh dunia dengan nama aslinya: *tempeh*. Selama ±36–48 jam pada suhu kamar tropis (±30 °C), benang-benang kapang *Rhizopus* merajut butir kedelai menjadi satu lempeng putih. Enzim protease kapang memecah sebagian protein menjadi peptida dan asam amino, lipase memecah sebagian lemak, dan beberapa zat antigizi kedelai berkurang. Hasilnya, protein tempe lebih mudah dicerna daripada kedelai rebus. Fermentasi ini juga menghasilkan panas: kalau kamu memegang bungkus tempe yang sedang "jadi", terasa hangat!

Mari menghitung hasil fermentasi tapai. Dari persamaan reaksinya, 1 mol glukosa (180 g) menghasilkan 2 mol etanol ($2 \times 46 = 92$ g) dan 2 mol CO_2 (88 g).

RUMUS HIDUP **Etanol dan CO_2 dari fermentasi**

$$m_{\text{etanol}} = \frac{m_{\text{gula}}}{180} \times 2 \times 46 \times \frac{\eta}{100}$$

Setiap molekul glukosa dipecah ragi menjadi dua molekul etanol dan dua molekul karbon dioksida.

m_{gula} Glukosa yang difermentasi g

η Bagian glukosa yang menjadi etanol %

m_{etanol} Massa etanol g

MASSA ETANOL

46

g

100 g glukosa (**0,556** mol) → **46** g etanol (**±58,302** mL) dan **44** g CO_2 (**±24** L gas pada suhu kamar).

Cek satuan: g ÷ (g/mol) × (mol/mol) × (g/mol) = g ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ETANOL-FERMENTASI

KERJAKAN BERSAMA

Alkohol dalam tapai ketan

Dalam sewadah tapai ketan, kapang mengubah pati menjadi 54 g glukosa, lalu khamir memfermentasi 50% glukosa itu menjadi etanol. Berapa gram etanol yang terbentuk, dan berapa liter CO_2 (suhu kamar, 24 L/mol)?

1. Glukosa yang difermentasi: $50\% \times 54 = 27$ g, yaitu $27/180 = 0{,}15$ mol.
2. Etanol: $2 \times 0{,}15 = 0{,}30$ mol → $0{,}30 \times 46 = 13{,}8$ g.
3. CO_2: $0{,}30$ mol → $0{,}30 \times 24 = 7{,}2$ L.

13,8 g etanol dan 7,2 L CO_2. Gas inilah yang membuat wadah tapai yang ditutup rapat menggembung, dan sisa glukosa membuat tapai tetap manis.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PEMBUKUAN ENERGI SEL: RESPIRASI LAWAN FERMENTASI

Hidrolisis ATP pada kondisi standar biokimia melepas $\Delta G^{\circ\prime} \approx -30{,}5$ kJ/mol:

$$\mathrm{ATP} + \mathrm{H_2O} \longrightarrow \mathrm{ADP} + \mathrm{P_i}$$

Respirasi aerob satu mol glukosa ($\Delta G^{\circ} \approx -2870$ kJ/mol) menghasilkan ±30–32 mol ATP. Efisiensinya $\pm\dfrac{32 \times 30{,}5}{2870} \approx 34\%$, lebih baik daripada kebanyakan mesin bensin. Fermentasi hanya menghasilkan 2 ATP per glukosa (dari glikolisis), sehingga ragi tanpa oksigen harus "membakar" glukosa ±15 kali lebih banyak untuk energi yang sama. Itulah sebabnya fermentasi menghasilkan banyak etanol dan CO_2 dari sedikit sel ragi. Tubuhmu mendaur ulang ATP dengan cepat: setiap hari kamu membuat dan memakai ATP kira-kira seberat badanmu sendiri!

Kimia di sekitarmu

Tempe di meja makan

Kapang *Rhizopus* memotong protein dan lemak kedelai sehingga tempe lebih mudah dicerna dan aromanya khas.

Tapai singkong

Kapang mengubah pati menjadi glukosa (manis), lalu khamir mengubah glukosa menjadi etanol dan CO_2 (rasa "hangat" dan sedikit menyengat).

Pelunak daging

Bubuk pelunak daging di pasar berisi papain dari getah pepaya: protease yang memotong serat protein daging.

Cek gula darah

Strip alat cek gula darah memakai enzim glukosa oksidase yang hanya bereaksi dengan glukosa; arus listrik yang timbul sebanding dengan kadar glukosa.

Deterjen enzim

Protease dan lipase dalam deterjen "bio" mengurai noda darah, telur, dan minyak bahkan pada air dingin.

Susu bebas laktosa

Enzim laktase memecah laktosa menjadi glukosa dan galaktosa, sehingga susu aman bagi orang yang tubuhnya kekurangan laktase.

Cek Cepat

Pasangan basa DNA yang dihubungkan oleh tiga ikatan hidrogen adalah ...

- A–T
- G–C
- A–U
- A–G

Mengapa nanas segar membuat jeli gelatin gagal mengeras, tetapi nanas kaleng tidak?

- Nanas segar lebih asam sehingga menetralkan gelatin.
- Nanas kaleng mengandung pengawet yang mengeraskan gelatin.
- Bromelain di nanas segar memotong protein gelatin; pada nanas kaleng enzim itu sudah terdenaturasi oleh pemanasan.
- Gula di nanas kaleng mengikat air.

Zat gizi yang memberi energi paling besar per gram adalah ...

- lemak
- karbohidrat
- protein
- serat (selulosa)

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: nanas lawan jeli

Bahan: 1 bungkus bubuk gelatin (pilih yang berlabel halal bila perlu), 1 bungkus kecil agar-agar bubuk sebagai pembanding, nanas segar, air panas, panci kecil, 4 gelas plastik, sendok, spidol, kulkas.

1. Minta orang dewasa memotong nanas menjadi dadu kecil. Rebus setengah bagiannya selama 5 menit (oleh orang dewasa), lalu dinginkan.
2. Larutkan gelatin dalam air panas sesuai petunjuk kemasan, lalu tunggu sampai hangat (±40 °C, nyaman disentuh).
3. Isi tiga gelas dengan larutan gelatin: A diberi 2 sendok nanas segar, B diberi 2 sendok nanas rebus, C tanpa nanas (kontrol). Beri label.
4. Masak agar-agar sesuai petunjuk, tuang ke gelas D, tunggu hangat, lalu beri 2 sendok nanas segar.
5. Simpan keempat gelas di kulkas semalam. Miringkan setiap gelas dan catat: padat, lembek, atau cair?

Keselamatan: Air mendidih, panci, dan pisau hanya ditangani orang dewasa; tuang larutan panas perlahan agar tidak terciprat. Jangan memakan jeli yang sudah dibiarkan di suhu ruang lebih dari dua jam. Cuci tangan dan alat setelah selesai.

Pertanyaan: Gelas mana yang tidak mengeras? Mengapa gelas D (agar-agar + nanas segar) tetap bisa mengeras? Petunjuk: agar-agar adalah polisakarida dari rumput laut, bukan protein. Apa yang ditunjukkannya tentang kespesifikan enzim?

RINGKASAN KILAT **Bab 36 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- mengelompokkan **karbohidrat** (mono-, di-, polisakarida), menjelaskan ikatan glikosidik, dan mengujinya dengan **iodin** dan **Benedict**

- menjelaskan **asam amino**, **ikatan peptida**, empat tingkat struktur protein, **denaturasi**, dan uji **biuret**
- membedakan lemak **jenuh**, **tak jenuh cis**, dan **trans**, lalu menghitung **energi makanan** (4/4/9 kkal per gram)
- menjelaskan kerja **enzim** (model gembok–kunci dan *induced fit*) serta pengaruh suhu dan pH
- menjelaskan pasangan basa **DNA**, peran **ATP**, dan kimia **fermentasi Nusantara** (tempe, tapai, kecap)

🔑 Istilah kunci

biokimia · Karbohidrat · monosakarida · disakarida · ikatan glikosidik · polisakarida · α-glukosa · β-glukosa · gula pereduksi · protein · asam amino · Asam amino · ikatan peptida · reaksi Maillard · Lipid · trigliserida

🧮 Rumus penting

$$M_r = n\,\bar{M} - (n-1) \times 18$$

Massa polipeptida. Jumlahkan massa semua asam amino, lalu kurangi 18 (satu molekul air) untuk setiap ikatan peptida yang terbentuk.

$$E = 4\,m_K + 4\,m_P + 9\,m_L$$

Energi makanan (angka Atwater). Setiap gram karbohidrat dan protein memberi sekitar 4 kkal, sedangkan setiap gram lemak memberi sekitar 9 kkal.

$$m_{\text{etanol}} = \frac{m_{\text{gula}}}{180} \times 2 \times 46 \times \frac{\eta}{100}$$

Etanol dan CO_2 dari fermentasi. Setiap molekul glukosa dipecah ragi menjadi dua molekul etanol dan dua molekul karbon dioksida.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Gula pasir (sukrosa) bukan gula pereduksi, padahal rasanya manis!
- Denaturasi tidak memutus ikatan peptida.
- Jangan membuat sabun sendiri dengan soda api (NaOH) di rumah tanpa pengawasan guru.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=36

Teka-teki untuk Bab 37

Semua molekul kehidupan di bab ini dibangun dari atom karbon. Arkeolog menentukan umur tulang dan arang purba dari jumlah satu jenis karbon yang tersisa di dalamnya. Mengapa atom bisa "berdetak" seperti jam, dan mengapa jam itu mulai berjalan tepat saat makhluk hidup mati?

▼ Intip petunjuk

Sebagian kecil karbon di udara adalah karbon-14 yang radioaktif. Selama hidup, tumbuhan dan hewan terus menyerapnya lewat fotosintesis dan makanan, sehingga kadarnya tetap. Setelah mati, penyerapan berhenti dan C-14 meluruh dengan waktu paruh ±5.730 tahun. Bab 37 akan membuka rahasia inti atom yang tidak stabil.

37 Kimia Inti: Atom yang Berdetak, Pecah, dan Menyala

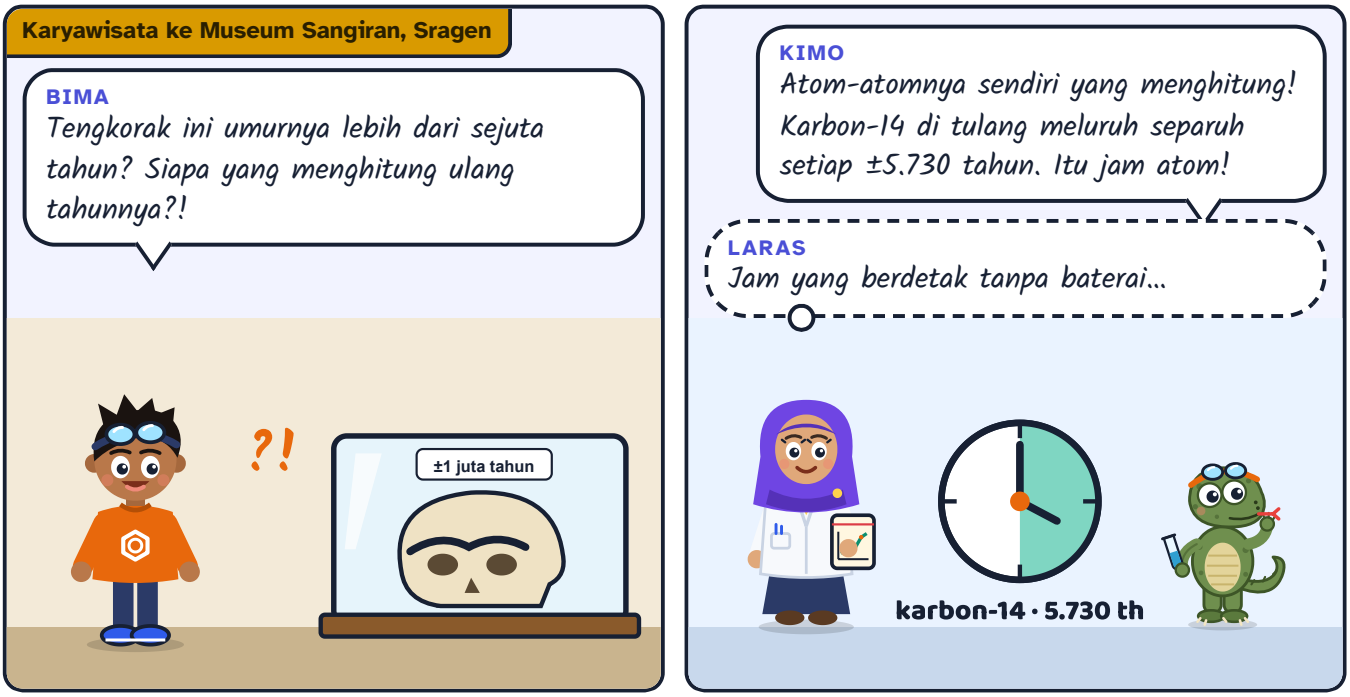
Selama ini inti atom hanya duduk diam di tengah, sementara elektron sibuk bereaksi. Di bab ini giliran inti yang beraksi: ia bisa memancarkan sinar, berubah menjadi unsur lain, pecah, bahkan bergabung. Dari jam fosil Sangiran sampai obat kanker dan cahaya Matahari, semuanya bermula di titik mungil itu.

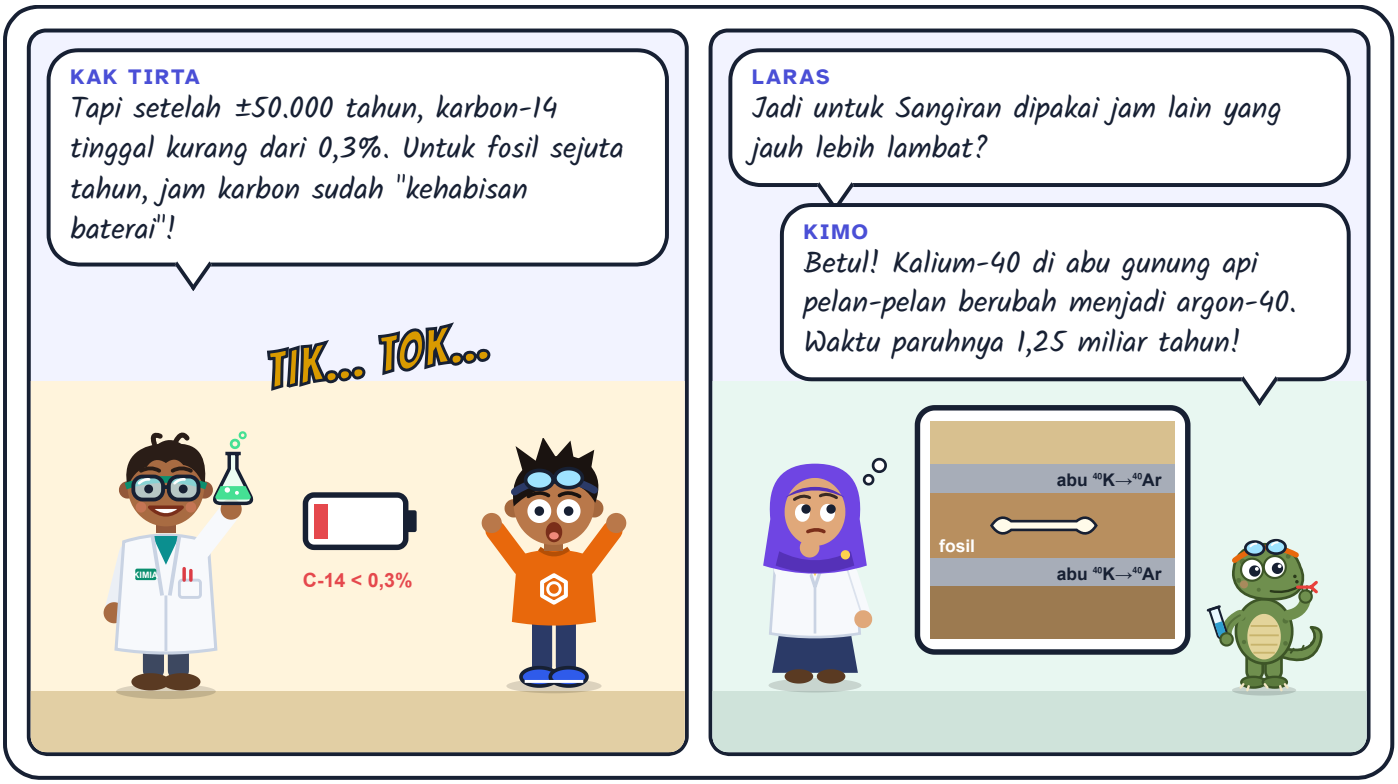
Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan mengapa sebagian inti **stabil** dan sebagian **radioaktif** memakai rasio n/p dan **pita kestabilan**;
- menuliskan dan menyetarakan **persamaan inti** untuk peluruhan α, β^-, β^+, tangkap elektron, dan γ;
- menghitung sisa zat radioaktif dan **umur benda purba** dari **waktu paruh**, termasuk memilih "jam" penanggalan yang tepat;
- membedakan **fisi** dan **fusi** serta menghitung energinya dari **defek massa** ($E = \Delta m\, c^2$);
- menjelaskan manfaat **radioisotop** di kedokteran, pertanian, dan industri, serta menakar keselamatan radiasi dalam **sievert**.

JAM ATOM DI MUSEUM SANGIRAN

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Seorang pasien menerima 1 gram iodin-131 (waktu paruh 8,0 hari) untuk pengobatan. Berapa iodin-131 yang masih tersisa setelah 16 hari?

- 0 gram, karena dua waktu paruh berarti habis.
- 0,5 gram
- 0,25 gram
- 0,125 gram

Jawabannya: 0,25 gram. Setiap waktu paruh, yang tersisa tinggal separuh *dari yang ada saat itu*, bukan separuh dari jumlah awal. Setelah 8 hari tinggal 0,5 g, setelah 16 hari tinggal 0,25 g, setelah 24 hari 0,125 g, dan seterusnya. Kurvanya terus turun tetapi tidak pernah tiba-tiba menyentuh nol. Inilah "detak" jam atom yang akan kita pelajari.

37.1 Inti stabil dan inti yang gelisah

Ingat Bab 6: inti atom tersusun atas **proton** (bermuatan positif) dan **neutron** (netral), yang bersama-sama disebut **nukleon**. Jenis inti dengan jumlah proton dan neutron tertentu disebut **nuklida**, ditulis ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, dengan Z nomor atom (jumlah proton) dan A nomor massa (proton + neutron). Jumlah neutronnya $N = A - Z$.

Di dalam inti terjadi tarik-menarik yang menegangkan. Proton-proton saling **menolak** karena muatannya sama. Namun, semua nukleon juga saling **menarik** lewat **gaya inti kuat**, "lem" yang sangat kuat tetapi hanya bekerja pada jarak sangat dekat (sekitar lebar satu nukleon). Neutron menambah lem tanpa menambah tolakan. Karena itu, inti butuh campuran proton dan neutron yang pas.

Bahasa sederhana · Bayangkan sekelompok anak yang saling bergandengan tangan di atas rakit. Ada anak yang suka saling dorong (proton) dan ada anak penengah yang hanya memegang erat (neutron). Kalau terlalu banyak anak yang saling dorong, rakit jadi goyah. Kalau penengahnya terlalu banyak, rakit juga tidak seimbang. Inti yang tidak seimbang akan "menyesuaikan diri" dengan membuang sesuatu. Itulah **radioaktivitas**.

DEFINISI · RADIOAKTIVITAS

Radioaktivitas adalah peristiwa inti atom yang tidak stabil berubah secara spontan menjadi inti lain (atau keadaan energi yang lebih rendah) sambil memancarkan radiasi. Inti seperti ini disebut **radionuklida**, dan isotop yang intinya radioaktif disebut **radioisotop**. Peristiwa ini bersifat acak untuk tiap inti, tetapi sangat teratur untuk kumpulan inti yang besar.

Dari sekitar 3.300 nuklida yang sudah dikenal, hanya **251** yang stabil. Kalau semua nuklida digambar pada grafik jumlah neutron N terhadap jumlah proton Z, inti-inti stabil berkumpul pada sebuah jalur sempit yang disebut **pita kestabilan**.

ATURAN · CIRI INTI YANG STABIL

1. Untuk inti ringan ($Z \leq 20$), inti stabil mempunyai $N \approx Z$, jadi **rasio n/p ≈ 1**. Contoh: $^{12}_{6}\mathrm{C}$, $^{16}_{8}\mathrm{O}$, $^{40}_{20}\mathrm{Ca}$.
2. Makin berat inti, makin banyak neutron "ekstra" yang dibutuhkan untuk mengimbangi tolakan proton. Rasio n/p naik sampai ±1,5 pada $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$ (126 neutron untuk 82 proton).
3. Tidak ada inti yang benar-benar stabil untuk $Z > 82$. Bismut-209 meluruh sangat lambat, dan semua unsur setelahnya radioaktif.
4. Inti dengan proton **genap** dan neutron **genap** paling sering stabil. Jumlah proton atau neutron 2, 8, 20, 28, 50, 82, dan 126 (**angka ajaib**) memberi kestabilan ekstra, mirip kulit elektron yang penuh pada gas mulia.

Jumlah proton	Jumlah neutron	Banyaknya nuklida stabil	Contoh
genap	genap	±146	$^{4}\mathrm{He}$, $^{12}\mathrm{C}$, $^{16}\mathrm{O}$, $^{56}\mathrm{Fe}$, $^{208}\mathrm{Pb}$
genap	ganjil	±53	$^{13}\mathrm{C}$, $^{17}\mathrm{O}$, $^{119}\mathrm{Sn}$
ganjil	genap	±48	$^{19}\mathrm{F}$, $^{23}\mathrm{Na}$, $^{127}\mathrm{I}$
ganjil	ganjil	hanya 4	$^{2}\mathrm{H}$, $^{6}\mathrm{Li}$, $^{10}\mathrm{B}$, $^{14}\mathrm{N}$

Letak sebuah inti terhadap pita kestabilan meramalkan cara ia meluruh. Inti yang berada **di atas** pita kelebihan neutron. Inti yang berada **di bawah** pita kekurangan neutron. Inti yang **terlalu berat** berada di luar ujung pita. Seret titik magenta pada grafik di bawah ini.

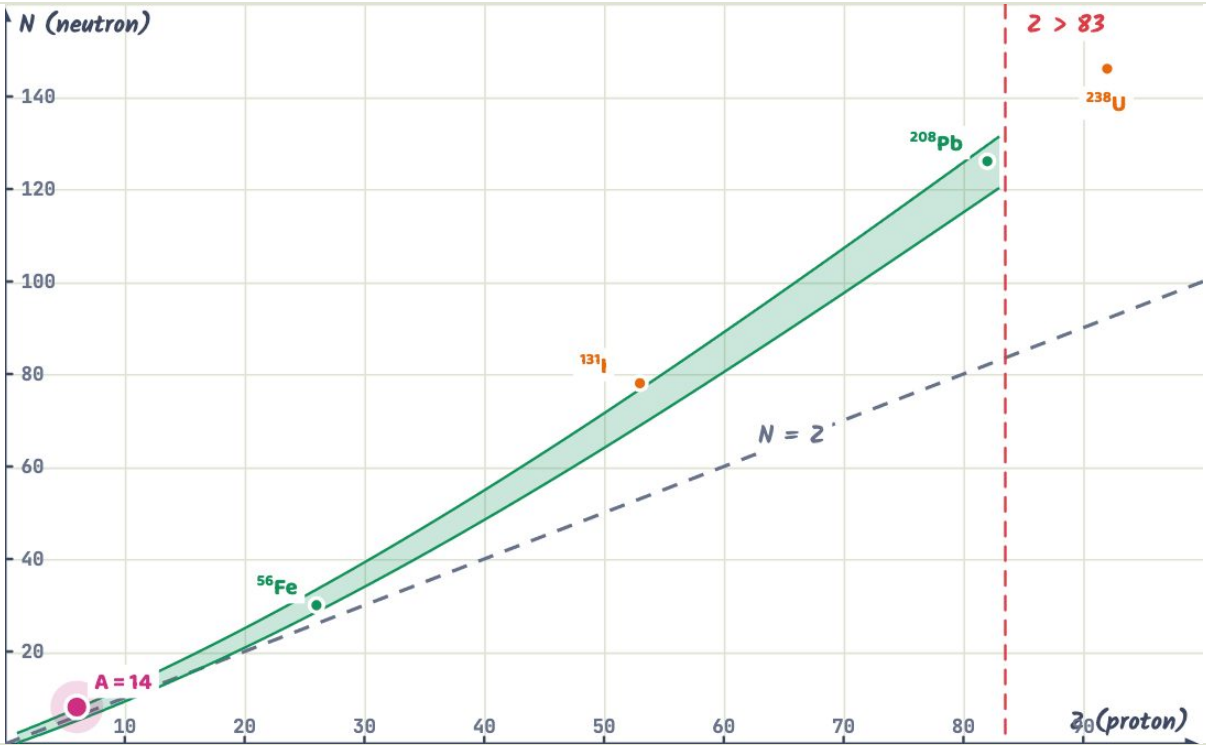
GRAFIK HIDUP

Pita kestabilan: di mana letak intimu?

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37

$$\frac{n}{p} = \frac{N}{Z}$$

$$^{14}_{6}\mathrm{X}: \quad \frac{n}{p} = \frac{8}{6} = 1{,}33$$



karbon-14: kelebihan 2 neutron → β⁻ menjadi nitrogen-14

nomor massa A	rasio n/p	pusat pita (N)	ramalan kasar
14	1,33	6,4	β⁻ (kelebihan neutron)

Seret titik magenta, atau geser Z dan N. Mula-mula pita mengikuti garis N = Z, lalu melengkung ke atas. Coba letakkan titik di karbon-12 (Z = 6, N = 6), lalu tambahkan dua neutron. Apa ramalannya? Pita hijau di sini hanya pendekatan; data lengkap tiap nuklida ada di Lab Mini 37.2.

TABEL PERIODIK HIDUP

Unsur yang tak punya satu pun isotop stabil

Warnai menurut Kategori

1 H



Unsur yang menyala hanya punya isotop radioaktif. Perhatikan dua "lubang" di tengah tabel: **teknesium** (Z = 43) dan **prometium** (Z = 61). Ganti pewarnaan ke "Tahun ditemukan": teknesium baru ditemukan pada 1937 sebagai unsur buatan pertama, karena di alam ia sudah lama meluruh habis. Bismut ikut menyala karena satu-satunya isotop alaminya meluruh sangat lambat (waktu paruh ±2 × 10^{19} tahun).

37.2 Empat cara inti meluruh

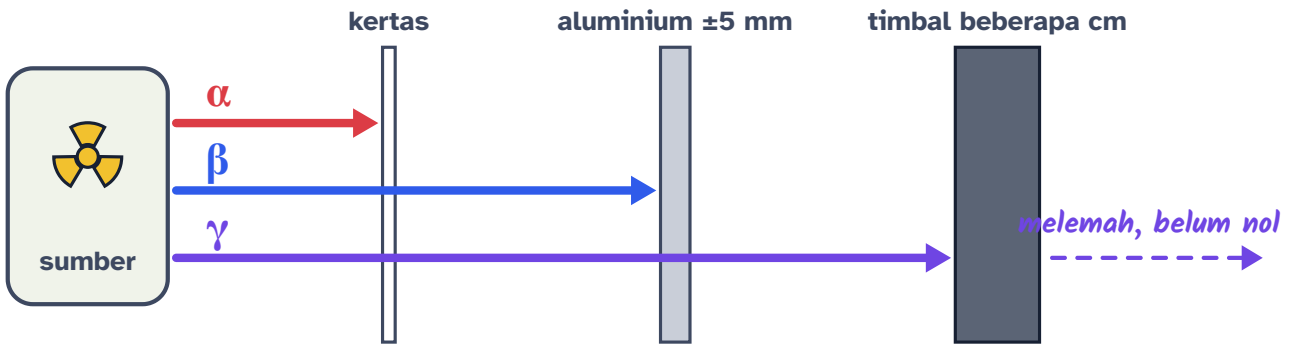
TAMU DARI MASA LALU · PELAT FOTO YANG BERKABUT

Pada 1896, **Henri Becquerel** di Paris menyimpan garam uranium di atas pelat foto yang terbungkus kertas hitam di laci. Beberapa hari kemudian, pelat itu berkabut walaupun tidak pernah terkena cahaya. Uranium memancarkan sinar tak terlihat dengan sendirinya! **Marie Curie** dan **Pierre Curie** menyelidiki gejala ini, menamainya *radioaktivitas*, dan pada 1898 menemukan dua unsur baru: polonium (dinamai menurut Polandia, tanah air Marie) dan radium. Marie Curie menjadi orang pertama yang meraih dua Hadiah Nobel di dua bidang sains berbeda: Fisika 1903 dan Kimia 1911. Tak lama kemudian, **Ernest Rutherford** memilah pancarannya menjadi sinar alfa, beta, dan gamma.

Radiasi dari inti bukan satu jenis. Masing-masing punya muatan, massa, dan daya tembus yang berbeda.

Radiasi	Lambang	Hakikatnya	Muatan	Massa (u)	Daya tembus	Daya ionisasi

Alfa	${}_{2}^{4}\alpha$ atau ${}_{2}^{4}\mathrm{He}$	inti helium (2 p + 2 n)	+2	±4	kecil: ±5 cm di udara, terhenti selembar kertas atau kulit mati	sangat besar
Beta minus	${}_{-1}^{0}\beta$ atau ${}_{-1}^{0}\mathrm{e}$	elektron berkecepatan tinggi dari inti	–1	±0,00055	sedang: terhenti aluminium beberapa milimeter	sedang
Positron (beta plus)	${}_{+1}^{0}\beta$ atau ${}_{+1}^{0}\mathrm{e}$	"kembaran" elektron yang bermuatan positif	+1	±0,00055	segera bertemu elektron dan musnah menjadi 2 sinar γ	sedang
Gamma	${}_{0}^{0}\gamma$	gelombang elektromagnetik berenergi sangat tinggi	0	0	besar: dilemahkan timbal beberapa cm atau beton tebal	kecil
Neutron	${}_{0}^{1}\mathrm{n}$	neutron bebas (dari fisi atau reaksi inti)	0	±1	besar: diperlambat dan ditangkap oleh air, beton, atau boron	tidak langsung



α: ionisasi besar, daya tembus kecil

γ: daya tembus besar, ionisasi kecil

Daya tembus berbanding terbalik dengan daya ionisasi. Partikel α yang besar dan bermuatan +2 menabrak banyak atom sehingga energinya cepat habis. Sinar γ jarang menabrak, sehingga menembus jauh.

Saat inti meluruh, berlaku "neraca" yang mirip neraca atom pada reaksi kimia. Bedanya, yang dihitung adalah nomor massa dan nomor atom.

HUKUM · KEKEKALAN PADA REAKSI INTI

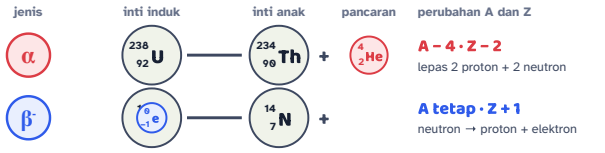
Pada setiap persamaan inti:

$$\sum A_{\text{kiri}} = \sum A_{\text{kanan}} \qquad \text{dan} \qquad \sum Z_{\text{kiri}} = \sum Z_{\text{kanan}}$$

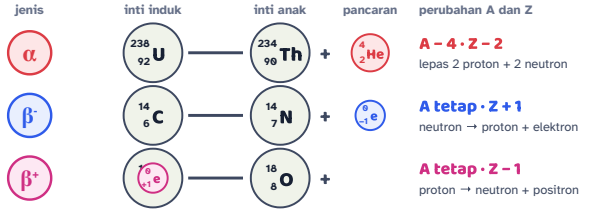
Jumlah nukleon (nomor massa) dan jumlah muatan (nomor atom) tidak berubah. Partikel ditulis dengan notasi yang sama: elektron ${}^{0}_{-1}\text{e}$, positron ${}^{0}_{+1}\text{e}$, neutron ${}^{1}_{0}\text{n}$, proton ${}^{1}_{1}\text{p}$, alfa ${}^{4}_{2}\text{He}$.



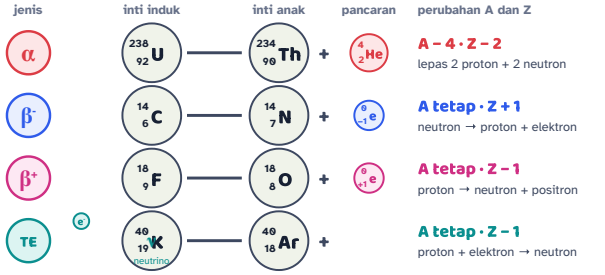
Langkah 1. Alfa: inti yang terlalu berat membuang "paket" 2 proton + 2 neutron. $^{238}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Cek: 238 = 234 + 4 dan 92 = 90 + 2.



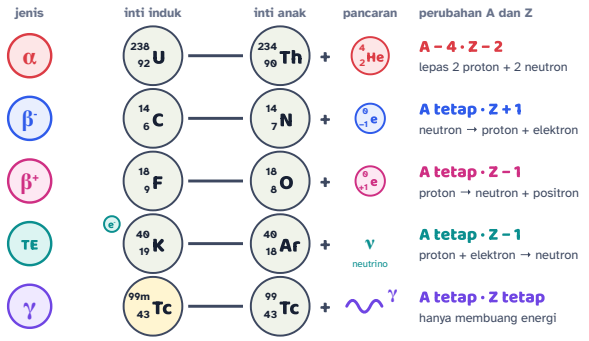
Langkah 2. Beta minus: inti yang kelebihan neutron mengubah satu neutron menjadi proton. Elektronnya dilempar keluar (bersama antineutrino). $^{14}_{6}\mathrm{C} \longrightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$



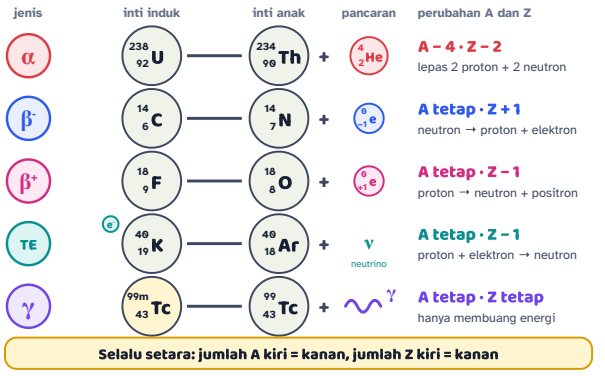
Langkah 3. Positron (β⁺): inti yang kekurangan neutron mengubah satu proton menjadi neutron dan melempar positron. $^{18}_{9}\mathrm{F} \longrightarrow {}^{18}_{8}\mathrm{O} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e}$. Fluorin-18 inilah "lampu" pada pemindaian PET di rumah sakit.



Langkah 4. Tangkap elektron (TE): cara lain untuk inti yang kekurangan neutron. Inti menelan satu elektron dari kulit terdalamnya. $^{40}_{19}\mathrm{K} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \longrightarrow {}^{40}_{18}\mathrm{Ar}$. Inilah jam argon untuk menanggali abu gunung api Sangiran!



Langkah 5. Gamma: inti yang tereksitasi (huruf m = metastabil) turun ke keadaan dasar sambil memancarkan sinar γ. Nomor massa dan nomor atom tidak berubah: $^{99\mathrm{m}}_{43}\mathrm{Tc} \longrightarrow {}^{99}_{43}\mathrm{Tc} + \gamma$.



Langkah 6. Apa pun jenisnya, persamaan inti selalu setara dalam nomor massa (A) dan nomor atom (Z). Inilah kunci untuk melengkapi persamaan yang "bolong".

AWAS JEBAKAN

Elektron pada peluruhan β^- **bukan** elektron dari kulit atom. Elektron itu "lahir" di dalam inti saat sebuah neutron berubah menjadi proton: $^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ (ditambah antineutrino yang hampir tak berinteraksi). Karena itu nomor atom bertambah satu, sedangkan nomor massa tetap.



TRIK KAK TIRTA

Hafalkan "ALBA-BEPA-GA": **AL**fa → **BA**wa pergi 4 dan 2 (A – 4, Z – 2). **BE**ta minus → **PA**ngkat naik (Z + 1). Beta plus dan tangkap elektron → pangkat turun (Z – 1). **GA**mma → **GA**k ada yang berubah selain energinya. Lalu selalu cek: "atas" (A) dijumlah, "bawah" (Z) dijumlah, harus sama di kedua sisi.

CONTOH **Melengkapi persamaan inti**

Radium-226 meluruh dengan memancarkan partikel alfa. Tentukan inti hasilnya.

1. Tulis kerangkanya: $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.
2. Neraca nomor massa: $226 = A + 4$, jadi $A = 222$.
3. Neraca nomor atom: $88 = Z + 2$, jadi $Z = 86$. Unsur bernomor atom 86 adalah radon.

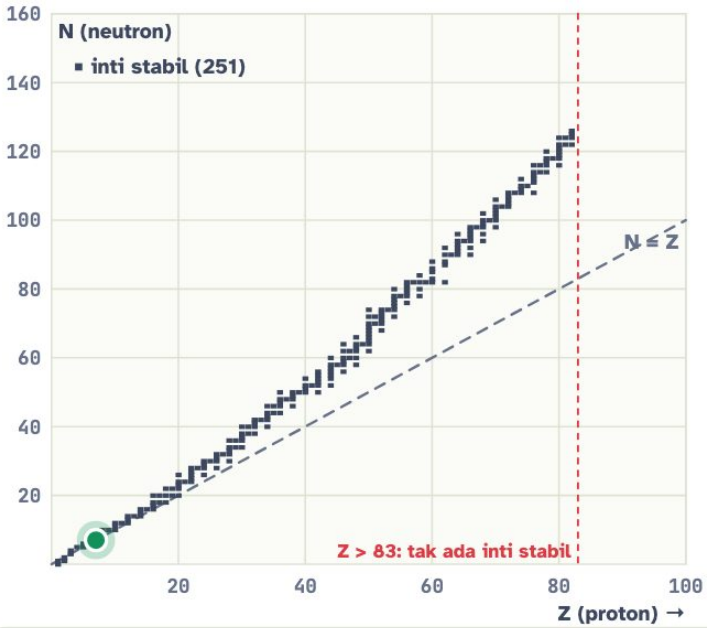
$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$**. Gas radon inilah yang merembes dari tanah dan batuan, sumber terbesar radiasi alam yang kita hirup.**

Inti hasil peluruhan sering kali masih radioaktif, sehingga ia meluruh lagi, dan lagi. Rangkaian ini disebut **deret radioaktif**. Uranium-238, misalnya, melewati 14 langkah sebelum berhenti sebagai timbal-206 yang stabil. Cobalah sendiri di Lab Mini berikut: tebak cara setiap inti meluruh!

LAB MINI

Pita Kestabilan: tebak cara inti meluruh

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37



$^{14}_{7}N$

Nitrogen-14

Z = 7 · N = 7 · A = 14

n/p = 1

N stabil untuk Z ini: 7–8

STABIL ✔

Akhir rantai peluruhan.

Rantai: 1 langkah · α × 0 · β^- × 1 · β^+/TE × 0 · γ × 0

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} \qquad \beta^-$$

Inti	Keadaan	Tebakanmu
N-14	stabil	0 benar · 0 meleset

Pilih inti awal, atau ketuk titik mana pun di grafik N–Z. Lalu **tebak** cara ia meluruh dengan menekan α, β^-, β^+ / tangkap e^-, atau γ. Jika benar, inti berpindah dan persamaan intinya muncul di bawah grafik. Pilih **Uranium-238**, lalu tekan ▶ Jalankan untuk melihat seluruh deret uranium sampai timbal. Hitung: berapa kali α dan berapa kali β^-? Coba juga **Molibdenum-99** dan **Kobalt-60**: kapan sinar γ muncul?

KERJAKAN BERSAMA

Menghitung langkah sebuah deret

Deret torium dimulai dari $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ dan berakhir pada $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$. Berapa partikel α dan β^- yang dipancarkan?

1. Hanya α yang mengubah nomor massa. Penurunan A = 232 − 208 = 24, jadi jumlah α = 24 ÷ 4 = **6**.
2. Enam α menurunkan Z sebanyak 6 × 2 = 12, dari 90 menjadi 78.
3. Padahal Z akhir 82. Kekurangan 82 − 78 = 4 harus ditutup oleh β^- (masing-masing Z + 1), jadi jumlah β^- = **4**.

6 α dan 4 β^-. Cek: $232 - 6(4) = 208$ ✔ **dan** $90 - 6(2) + 4(1) = 82$ ✔**. Bandingkan dengan hitungan rantai di Lab Mini!**

ADU CEPAT **Rantai uranium: berapa nomor atomnya?**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Setiap α menurunkan Z sebesar 2, setiap β^- menaikkan Z sebesar 1. Jadi $Z = 92 - 2\alpha + \beta^-$.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA DERET URANIUM BERSELANG-SELING A DAN B⁻?

Partikel α membawa pergi neutron dan proton sama banyak (2 dan 2). Namun inti berat punya rasio n/p sekitar 1,55, jadi setelah α, rasio n/p inti anak justru *naik* sedikit: $^{238}\mathrm{U}$ punya n/p = 146/92 = 1,587, sedangkan $^{234}\mathrm{Th}$ punya 144/90 = 1,600. Inti anak menjadi "kelebihan neutron" dibanding pita, sehingga beberapa langkah kemudian ia harus meluruh β^- untuk menurunkan rasionya. Itulah pola α, β^-, β^-, α, … dalam deret.

Pada 1930, Wolfgang Pauli memperhatikan bahwa elektron β^- keluar dengan energi yang bermacam-macam, seolah-olah energi hilang. Ia meramalkan partikel netral yang sangat ringan ikut terbawa: **neutrino** (untuk β^-, tepatnya antineutrino $\bar{\nu}$). Partikel ini baru terdeteksi pada 1956 di dekat reaktor nuklir. Persamaan lengkapnya: ${}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}$.

37.3 Waktu paruh dan jam atom

Kita tidak pernah bisa meramalkan *kapan* satu inti tertentu akan meluruh. Mungkin sedetik lagi, mungkin sejuta tahun lagi. Namun, kalau intinya ada triliunan, perilaku kelompoknya sangat bisa diramalkan, seperti hasil ribuan lemparan koin.

Bahasa sederhana · Lempar 100 koin. Koin yang menunjukkan angka kita anggap "meluruh" dan kita sisihkan. Kira-kira separuhnya hilang, tersisa ±50. Lempar lagi yang tersisa: tinggal ±25. Lalu ±12, ±6, ±3… Setiap lemparan, separuh dari yang *masih ada* menghilang. Waktu untuk satu lemparan itu adalah "waktu paruh" koin. Atom radioaktif bekerja dengan cara yang sama, hanya saja waktunya bisa sekejap atau miliaran tahun.

DEFINISI · WAKTU PARUH

Waktu paruh ($T_{1/2}$ atau $t_{1/2}$) adalah waktu yang dibutuhkan sampai separuh inti radioaktif dalam suatu sampel meluruh. Setelah n kali waktu paruh, yang tersisa adalah $\left(\frac{1}{2}\right)^n$ bagian:

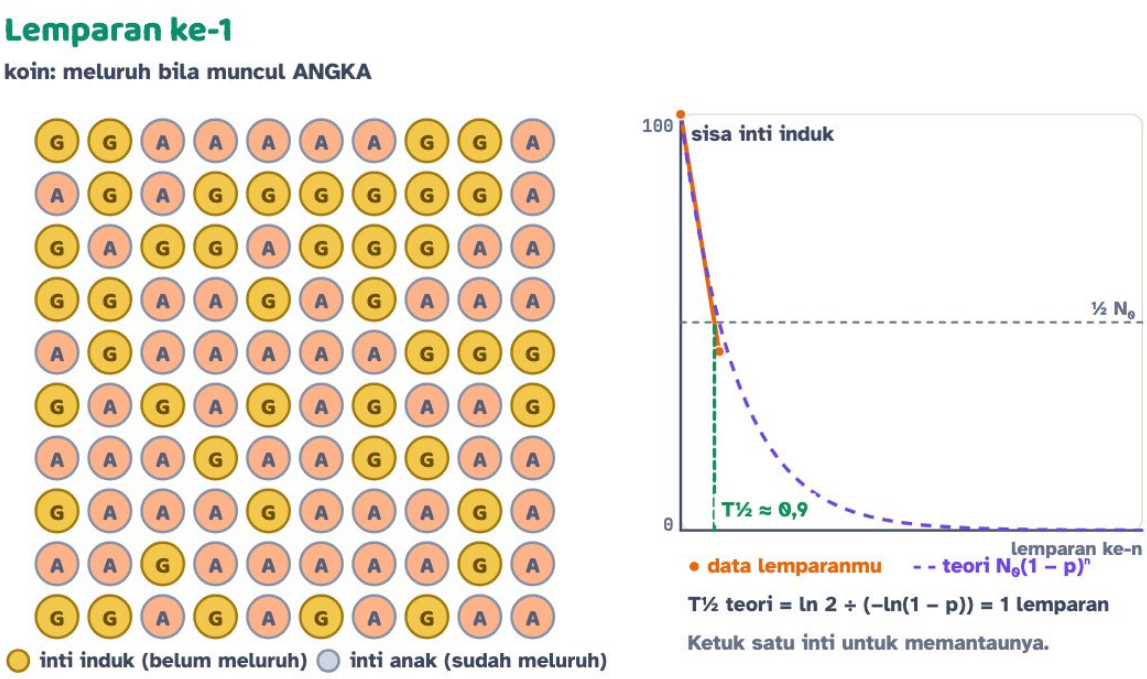
$$N = N_0 \left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Waktu paruh setiap radioisotop **tetap**: tidak dipengaruhi suhu, tekanan, maupun bentuk senyawanya.

LAB MINI

Peluruhan Koin & Dadu: ribuan inti sekaligus

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37



Lemparan ke-	Inti induk tersisa	Meluruh di lemparan ini	T½ terukur
1	43	57	0,88 lemparan

T½ teori	Inti pilihanmu
1 lemparan	ketuk satu inti

Tekan ▶ Jalankan atau 🎲 Lempar sekali. Setiap koin atau dadu adalah satu "inti". Lihat titik-titik oranye: apakah mereka mengikuti kurva teori yang ungu putus-putus? Ganti dengan **dadu** (meluruh jika mata 6): waktu paruhnya kini sekitar 3,8 lemparan. Pilih 2.000 inti: datanya makin rapi. Ketuk satu koin sebelum mulai, lalu pantau. Dapatkah kamu menebak kapan koin pilihanmu "meluruh"?

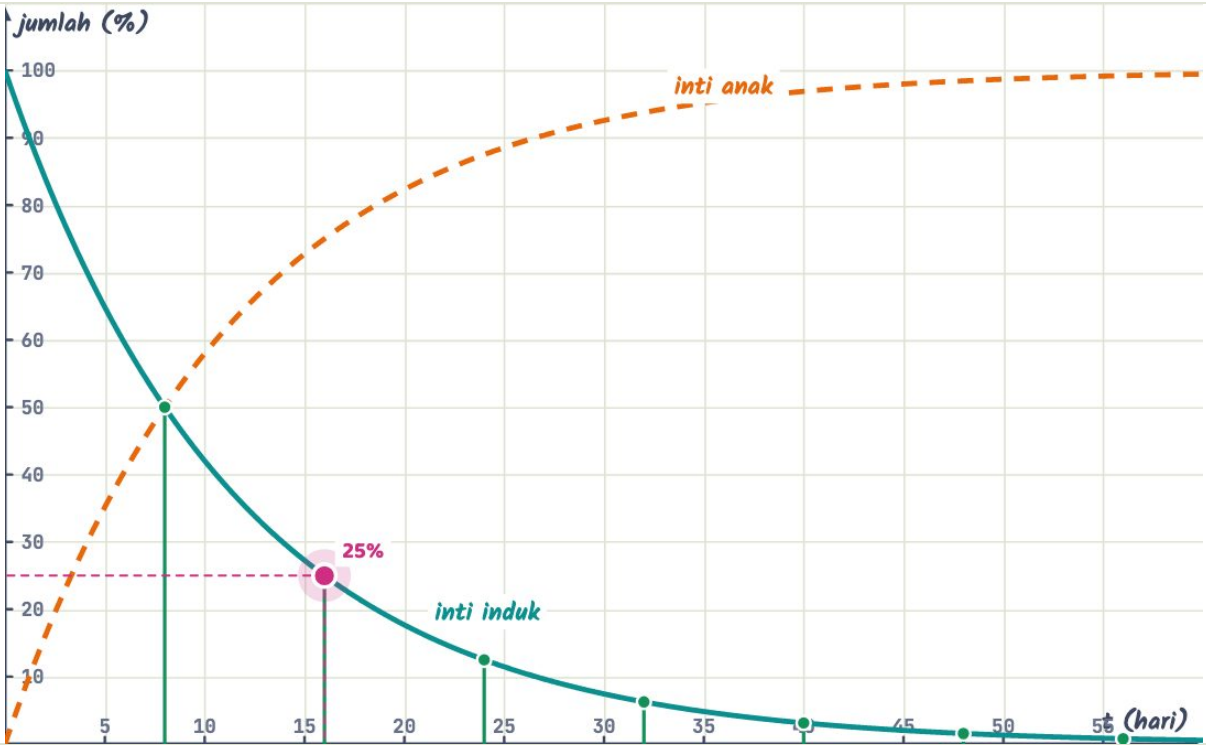
GRAFIK HIDUP

Kurva peluruhan: geser waktu paruhnya

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37

$$N = N_0 \left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = 8 \text{ hari},\ t = 16 \text{ hari}: \quad \frac{N}{N_0} = \left(\tfrac{1}{2}\right)^2 = 25\%$$



≈ iodin-131 (8,0 hari)

2 waktu paruh: tinggal ¼, bukan nol!

sisa inti induk	banyaknya waktu paruh	tetapan peluruhan λ
25 %	2	0,0866 per hari

Seret titik magenta di sepanjang kurva. Batang hijau menandai setiap kelipatan waktu paruh: tingginya selalu separuh batang sebelumnya. Lalu geser T½: kurva memanjang atau memendek, tetapi bentuknya tetap sama. Kurva oranye adalah inti anak: jumlah keduanya selalu 100%.

RUMUS HIDUP

Sisa zat radioaktif setelah waktu t

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Setiap lewat satu waktu paruh, yang tersisa tinggal separuh dari jumlah sebelumnya.

- N_0 Jumlah awal mg
- t Waktu yang berlalu hari
- $T_{1/2}$ Waktu paruh hari
- N Sisa mg

SISA
25
mg

2 waktu paruh: seperempat, bukan nol! **≈ iodin-131**

Setelah **16** hari (**2** kali waktu paruh) tersisa **25** mg, yaitu **25**% dari semula. Yang sudah meluruh: **75** mg.

Cek satuan: mg × (tanpa satuan) = mg; t dan T½ wajib bersatuan sama ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-INTI-PELURUHAN

Radioisotop	Waktu paruh	Cara meluruh	Kegunaan atau tempat ditemui
polonium-214	164 mikrodetik	α	salah satu anggota deret uranium
fluorin-18	110 menit	β^+	pemindaian PET
teknesium-99m	6,0 jam	γ	diagnosis (pencitraan organ)
radon-222	3,8 hari	α	gas dari tanah dan batuan
iodin-131	8,0 hari	β^-, γ	terapi kelenjar tiroid
fosfor-32	14,3 hari	β^-	perunut pupuk di tanaman
kobalt-60	5,27 tahun	β^-, γ	radioterapi, sterilisasi, mutasi benih
tritium (hidrogen-3)	12,3 tahun	β^-	umur air tanah, tanda keluar bercahaya

sesium-137	30,1 tahun	β^-, γ	alat ukur industri, pencemar dari kecelakaan PLTN
radium-226	1.600 tahun	α	temuan keluarga Curie
karbon-14	5.730 tahun	β^-	penanggalan sisa organik
uranium-235	704 juta tahun	α	bahan bakar fisi
kalium-40	1,25 miliar tahun	β^-, tangkap elektron	pisang, tubuhmu, penanggalan batuan
uranium-238	4,47 miliar tahun	α	umur Bumi dan batuan tertua

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

"Setelah dua waktu paruh, semua inti habis" adalah keliru. Setelah satu waktu paruh tersisa ½, setelah dua waktu paruh tersisa ½ × ½ = **¼**, setelah tiga waktu paruh ⅛. Untuk sampel yang berisi triliunan inti, jumlahnya tidak pernah tiba-tiba menjadi nol. Kesalahan lain: mengira waktu paruh bisa dipercepat dengan memanaskan atau melarutkan zatnya. Tidak bisa: peluruhan terjadi di inti, jauh dari jangkauan reaksi kimia.

CONTOH **Sisa iodin di kelenjar tiroid**

Sebanyak 80 mg iodin-131 (waktu paruh 8,0 hari) disiapkan untuk terapi. Berapa mg yang tersisa setelah 24 hari?

1. Banyaknya waktu paruh: $n = 24/8{,}0 = 3$.
2. Bagi dua tiga kali: 80 → 40 → 20 → **10** mg. Atau langsung: $80 \times \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 80/8 = 10$ mg.

Tersisa 10 mg (12,5%). Yang 70 mg lainnya sudah menjadi xenon-131 yang stabil.

⏱️ **ADU CEPAT** **Waktu paruh kilat**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Hitung dulu banyaknya waktu paruh: t ÷ T½. Lalu bagi dua sebanyak itu.

TRIK KAK TIRTA

"Sepuluh paruh, seperseribu." Karena $2^{10} = 1.024 \approx 1.000$, setelah 10 waktu paruh yang tersisa hanya ±0,1%. Rumah sakit memakai patokan ini: limbah teknesium-99m (6 jam) disimpan ±60 jam, yaitu dua setengah hari, sampai radioaktivitasnya praktis hilang.

Penanggalan radiometrik: memilih jam yang tepat

Di lapisan atas atmosfer, neutron dari sinar kosmik terus-menerus menabrak nitrogen dan membuat karbon-14:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow ^{14}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Karbon-14 bergabung dengan oksigen menjadi $\mathrm{CO_2}$, diserap tumbuhan saat fotosintesis, lalu masuk ke hewan dan manusia lewat makanan. Selama hidup, perbandingan C-14 terhadap C-12 di tubuh makhluk hidup tetap, sekitar 1 banding 1 triliun. Begitu mati, pasokan berhenti, dan C-14 yang ada meluruh dengan waktu paruh 5.730 tahun. Dengan mengukur sisa C-14, kita tahu sudah berapa lama makhluk itu mati.

RUMUS HIDUP **Umur dari sisa karbon-14**

$$t = T_{1/2} \times \frac{\ln\left(100\% \,/\, p\right)}{\ln 2}$$

Hitung berapa kali C-14 sudah 'dibagi dua', lalu kalikan dengan 5.730 tahun.

p C-14 yang tersisa %

t Umur sampel tahun

UMUR SAMPEL

11.460

tahun

2 waktu paruh: 11.460 tahun

25% C-14 tersisa berarti sudah lewat **2** kali waktu paruh. Umurnya **±11.460** tahun.

Cek satuan: tahun × (tanpa satuan) = tahun ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-INTI-UMUR-C14

KERJAKAN BERSAMA **Umur arang dari sebuah gua**

Arang dari perapian purba di sebuah gua mengandung karbon-14 sebanyak 35% dari kadar pada kayu yang masih hidup. Perkirakan umur arang itu. ($T_{1/2}$ = 5.730 tahun)

1. Tulis $\left(\frac{1}{2}\right)^{n} = 0{,}35$, dengan n = banyaknya waktu paruh.
2. Logaritmakan: $n = \dfrac{\ln(1/0{,}35)}{\ln 2} = \dfrac{1{,}050}{0{,}693} = 1{,}515.$
3. Umur $t = n \times T_{1/2} = 1{,}515 \times 5.730 \approx 8.680$ tahun.

Sekitar 8.700 tahun. Cek kewajaran: 35% berada di antara 50% (5.730 tahun) dan 25% (11.460 tahun) ✔. Arang itu masih jauh di bawah batas ±50.000 tahun, jadi C-14 adalah jam yang tepat.

Setiap "jam" radioaktif punya jangkauan sendiri. Jam yang cepat cocok untuk benda muda; jam yang lambat untuk batuan tua. Memakai jam yang salah sama seperti mengukur umur gunung dengan stopwatch.

Metode	Induk → anak	Waktu paruh	Jangkauan umur	Bahan yang diukur
tritium	$^{3}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}\mathrm{He}$	12,3 tahun	sampai ±100 tahun	air tanah, anggur, es
radiokarbon	$^{14}\mathrm{C} \longrightarrow {}^{14}\mathrm{N}$	5.730 tahun	±100 sampai ±50.000 tahun	sisa organik: arang, kayu, tulang, kain, biji
deret uranium	$^{234}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{230}\mathrm{Th}$	245.500 tahun	sampai ±500.000 tahun	kerak kapur gua, karang, gigi
kalium–argon (dan argon–argon)	$^{40}\mathrm{K} \longrightarrow {}^{40}\mathrm{Ar}$	1,25 miliar tahun	puluhan ribu sampai miliaran tahun	batuan dan abu gunung api
uranium–timbal	$^{238}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{206}\mathrm{Pb}$	4,47 miliar tahun	jutaan sampai miliaran tahun	kristal zirkon di batuan

KIMIA NUSANTARA · MENANGGALI LELUHUR DI SANGIRAN DAN LIANG BUA

Situs **Sangiran** di Sragen, Jawa Tengah (Warisan Dunia UNESCO), menyimpan fosil *Homo erectus* berumur ratusan ribu hingga lebih dari satu juta tahun. Karbon-14 tidak sanggup menanggalinya. Fosil itu terselip di antara lapisan **abu gunung api**. Saat abu baru meletus, argon (gas) lepas ke udara, sehingga "jam" dimulai dari nol. Sejak itu kalium-40 di mineralnya perlahan menghasilkan argon-40 yang terperangkap. Umur abu di bawah dan di atas fosil mengapit umur fosilnya.

Di gua **Liang Bua**, Flores, kerangka *Homo floresiensis* semula diperkirakan berumur ±18.000 tahun. Penelitian ulang memakai beberapa jam sekaligus: deret uranium pada tulang, luminesens pada endapan, argon–argon pada abu gunung api, dan karbon-14 pada arang di lapisan yang lebih muda. Hasilnya, kerangka itu ternyata berumur sekitar 100.000–60.000 tahun. Pelajarannya: ilmuwan selalu mencocokkan beberapa jam dan memilih jam yang sesuai dengan bahannya.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TETAPAN PELURUHAN DAN AKTIVITAS

Peluruhan radioaktif mengikuti kinetika **orde satu** (Bab 21): laju peluruhan sebanding dengan jumlah inti yang ada.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \Longrightarrow \quad N = N_0\, e^{-\lambda t}, \qquad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Banyaknya peluruhan per detik disebut **aktivitas**, $A = \lambda N$, dengan satuan **becquerel** (1 Bq = 1 peluruhan per detik). Satuan lama, **curie** (1 Ci = $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq), kira-kira sama dengan aktivitas 1 gram radium-226. Karena aktivitas sebanding dengan N, aktivitas juga turun separuh setiap waktu paruh. Itulah sebabnya laboratorium karbon-14 cukup mencacah "klik" peluruhan per menit per gram karbon.

Kalimat kunci: **waktu paruh pendek berarti aktivitas tinggi**. Satu kapsul terapi iodin-131 beraktivitas miliaran becquerel, padahal massanya kurang dari satu mikrogram!

RUMUS HIDUP **Aktivitas sumber radioaktif**

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \frac{m}{M} \times N_A$$

Makin banyak inti dan makin pendek waktu paruhnya, makin sering terdengar 'klik' peluruhan setiap detik.

m Massa radioisotop `g` | M Massa molar (≈ nomor massa) `g/mol` | $T_{1/2}$ Waktu paruh `tahun`

A Aktivitas `Bq`

AKTIVITAS

3,658 × 10¹⁰

Bq

≈ 1 curie: aktivitas 1 gram radium-226

Setiap detik terjadi **3,658 × 10¹⁰** peluruhan, setara **0,989** Ci (curie).

Cek satuan: (1/s) × (g ÷ g/mol) × (1/mol) = 1/s = Bq ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-INTI-AKTIVITAS

37.4 Fisi dan fusi: memecah dan menyatukan inti

Peluruhan terjadi dengan sendirinya. Namun, inti juga bisa "dipaksa" berubah. Ada dua cara yang melepaskan energi luar biasa besar: memecah inti yang sangat berat (**fisi**) dan menyatukan inti yang sangat ringan (**fusi**).



TAMU DARI MASA LALU · BARIUM YANG TAK TERDUGA

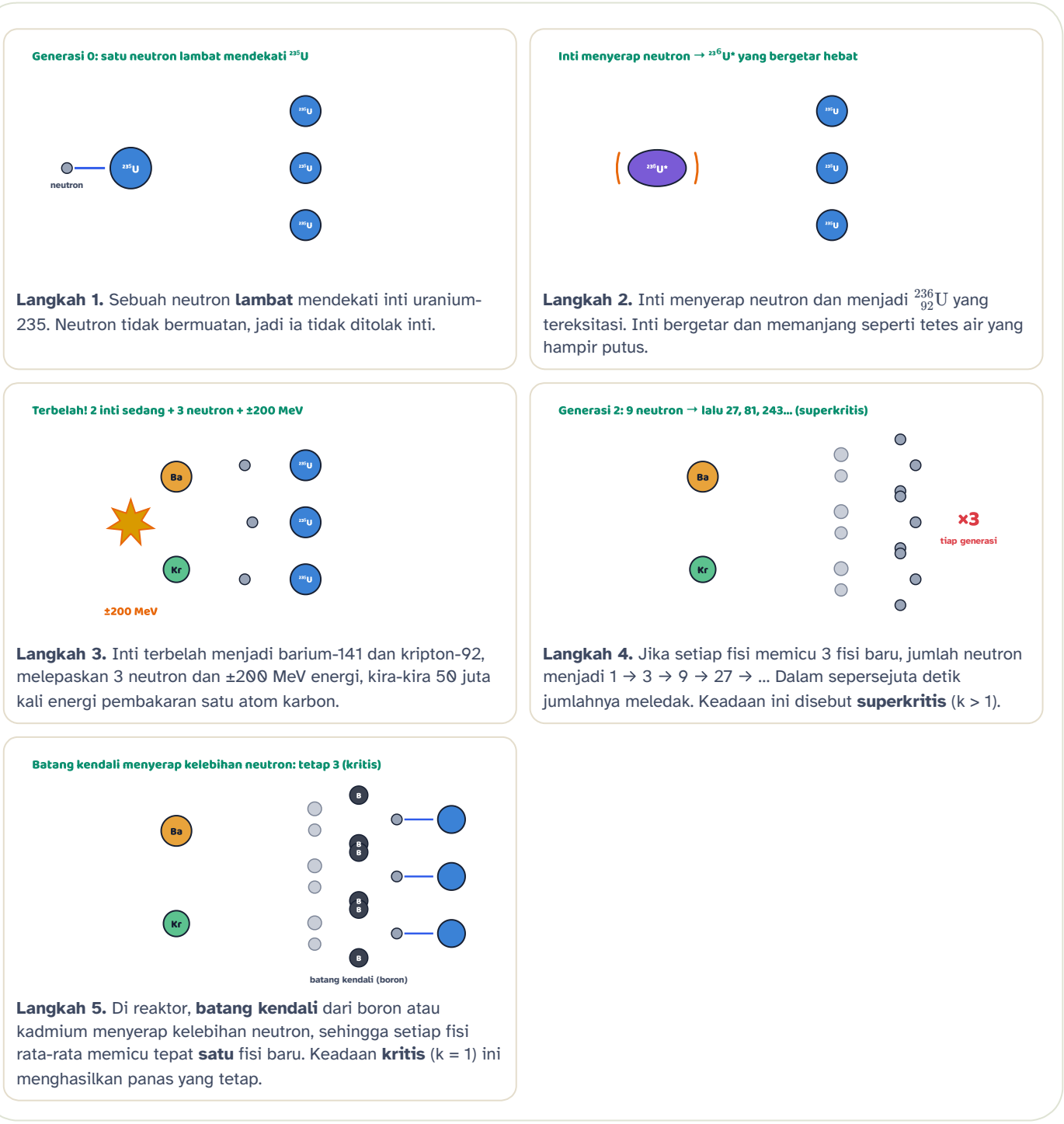
Pada akhir 1938, kimiawan **Otto Hahn** dan **Fritz Strassmann** di Berlin menembaki uranium dengan neutron. Mereka mengharapkan unsur yang lebih berat, tetapi analisis kimia yang teliti justru menemukan **barium**, unsur yang massanya kira-kira separuh uranium. Fisikawan **Lise Meitner**, yang saat itu harus mengungsi ke Swedia, bersama keponakannya **Otto Frisch** menjelaskan teka-teki itu: inti uranium terbelah dua! Mereka menamainya *fisi*, meminjam istilah pembelahan sel. Hahn menerima Nobel Kimia 1944, sedangkan jasa Meitner baru diakui luas belakangan. Unsur ke-109, meitnerium, dinamai untuk menghormatinya.

Saat neutron lambat diserap inti uranium-235, terbentuk inti uranium-236 yang sangat bergejolak. Dalam sekejap ia terbelah menjadi dua inti sedang, dua atau tiga neutron baru, dan energi sekitar 200 MeV. Salah satu

kemungkinannya:

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3{}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Cek neraca: nomor massa $1 + 235 = 141 + 92 + 3(1) = 236$ ✔, nomor atom $92 = 56 + 36$ ✔. Neutron-neutron baru dapat membelah inti uranium-235 lain, yang menghasilkan neutron lebih banyak lagi. Inilah **reaksi berantai**.



Langkah 1. Sebuah neutron **lambat** mendekati inti uranium-235. Neutron tidak bermuatan, jadi ia tidak ditolak inti.

Langkah 2. Inti menyerap neutron dan menjadi ${}^{236}_{92}\mathrm{U}$ yang tereksitasi. Inti bergetar dan memanjang seperti tetes air yang hampir putus.

Langkah 3. Inti terbelah menjadi barium-141 dan kripton-92, melepaskan 3 neutron dan ±200 MeV energi, kira-kira 50 juta kali energi pembakaran satu atom karbon.

Langkah 4. Jika setiap fisi memicu 3 fisi baru, jumlah neutron menjadi 1 → 3 → 9 → 27 → … Dalam sepersejuta detik jumlahnya meledak. Keadaan ini disebut **superkritis** (k > 1).

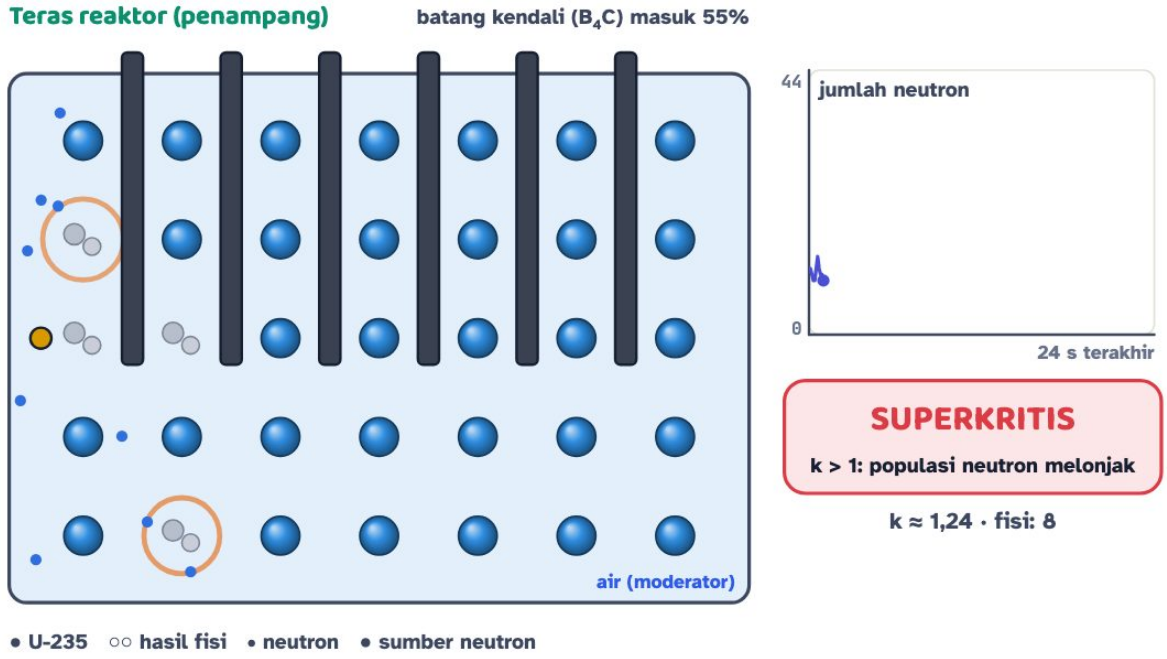
Langkah 5. Di reaktor, **batang kendali** dari boron atau kadmium menyerap kelebihan neutron, sehingga setiap fisi rata-rata memicu tepat **satu** fisi baru. Keadaan **kritis** (k = 1) ini menghasilkan panas yang tetap.

Banyaknya neutron dari satu generasi yang berhasil memicu fisi berikutnya disebut **faktor perbanyakan** k. Jika $k < 1$ reaksi meredup (**subkritis**), jika $k = 1$ reaksi berlangsung tetap (**kritis**), dan jika $k > 1$ reaksi membesar (**superkritis**). Sebuah reaktor nuklir tersusun atas:

- **Bahan bakar**: uranium yang diperkaya sampai ±3–5% U-235 (uranium alam hanya 0,72% U-235).
- **Moderator**: air atau grafit yang memperlambat neutron, sebab neutron lambat jauh lebih mudah ditangkap U-235.
- **Batang kendali**: boron, kadmium, atau hafnium yang menyerap neutron. Dimasukkan lebih dalam, reaksi melambat.
- **Pendingin**: membawa panas ke luar teras untuk menghasilkan uap yang memutar turbin (pada PLTN).
- **Perisai**: beton tebal dan air yang menahan radiasi.

LAB MINI **Reaktor Mini: kendalikan reaksi berantai**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37



Neutron bebas	Faktor perbanyakan k	Fisi total	Energi dilepas
9	1,24	8	$2{,}56 \times 10^{-10}$ J

Keadaan
superkritis (k > 1)

Bola biru adalah inti U-235, titik biru kecil adalah neutron. Tarik **batang kendali** ke atas (angka kecil) dan amati grafik neutron melonjak: superkritis! Sistem keselamatan akan menjatuhkan batang secara otomatis. Carilah posisi batang yang membuat keadaannya **kritis** (k ≈ 1). Lalu matikan **moderator**: mengapa reaksi padam walaupun batang kendali ditarik habis? (Di simulasi ini bahan bakar "diisi ulang" cepat supaya permainan tidak habis; di reaktor sungguhan, bahan bakar dipakai berbulan-bulan.)

KIMIA NUSANTARA · REAKTOR RISET DAN URANIUM INDONESIA

Indonesia sudah lama memiliki tiga **reaktor riset** yang dioperasikan BRIN (dahulu BATAN) dan diawasi **BAPETEN**:

- **Reaktor TRIGA Mark II, Bandung**: reaktor pertama di Indonesia, mulai beroperasi pada 1960-an, untuk riset dan produksi radioisotop.
- **Reaktor Kartini, Yogyakarta** (100 kW): dinamai menurut R.A. Kartini, beroperasi sejak 1979 dan banyak dipakai untuk pendidikan.
- **Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy, Serpong** (30 MW): mencapai kritis pada 1987, salah satu reaktor riset terbesar di Asia Tenggara, menghasilkan radioisotop untuk rumah sakit dan industri.

Di **Kalan**, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat, para ahli sejak 1970-an meneliti endapan bijih uranium. Indonesia juga sedang mengkaji pembangunan **PLTN** pertamanya. Karena Indonesia berada di Cincin Api, pemilihan tapak yang jarang gempa dan sistem keselamatan berlapis menjadi syarat utama.

Fusi adalah kebalikan fisi: dua inti ringan bergabung menjadi inti yang lebih berat. Di inti Matahari yang bersuhu ±15 juta °C, hidrogen terus-menerus diubah menjadi helium. Hasil bersih rangkaiannya:

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \text{energi}\ (26{,}7\ \mathrm{MeV})$$

Setiap detik, Matahari mengubah sekitar 600 juta ton hidrogen menjadi helium, dan sekitar 4 juta ton massa "lenyap" menjadi cahaya dan panas yang sampai ke sawah dan pantai kita. Di Bumi, ilmuwan berusaha meniru fusi deuterium–tritium di dalam reaktor berbentuk donat (*tokamak*) pada suhu ±150 juta °C:

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + 17{,}6\ \mathrm{MeV}$$

Dari mana energi sebesar itu? Jika semua massa ditimbang dengan teliti, massa hasil reaksi inti selalu sedikit **lebih kecil** daripada massa pereaksinya. Selisih ini disebut **defek massa** (Δm). Massa itu tidak hilang, tetapi berubah menjadi energi menurut persamaan Einstein $E = \Delta m\, c^2$. Dalam satuan inti, 1 u massa setara dengan 931,5 MeV energi.

RUMUS HIDUP

Energi dari defek massa

$$E = \Delta m \times 931{,}5 \ \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

Massa yang 'hilang' dalam reaksi inti berubah menjadi energi. Setiap 1 u massa setara dengan 931,5 MeV.

Δm Defek massa (pereaksi – hasil) u

E Energi per reaksi MeV

ENERGI PER REAKSI

17,61

MeV

≈ fusi deuterium + tritium

Satu reaksi melepas **17,61** MeV = **2,82 × 10⁻¹²** J. Untuk 1 mol reaksi: **1,699 × 10⁹** kJ, setara membakar **±51,738** ton arang (karbon murni).

Cek satuan: u × (MeV/u) = MeV ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-INTI-DEFEK-MASSA

COBA SENDIRI **Satu gram uranium melawan batu bara**

Setiap fisi U-235 melepas ±200 MeV. Berapa energi dari fisi sempurna 1,00 g U-235? Bandingkan dengan pembakaran batu bara (±30 MJ per kg). (1 MeV = $1{,}602 \times 10^{-13}$ **J,** $N_A = 6{,}022 \times 10^{23}$**)**

1. Jumlah inti: $n = 1{,}00/235 = 4{,}26 \times 10^{-3}$ mol, jadi $N = 4{,}26 \times 10^{-3} \times 6{,}022 \times 10^{23} = 2{,}56 \times 10^{21}$ inti.
2. Energi per fisi: $200 \times 1{,}602 \times 10^{-13} = 3{,}20 \times 10^{-11}$ J.
3. Energi total: $2{,}56 \times 10^{21} \times 3{,}20 \times 10^{-11} = 8{,}2 \times 10^{10}$ J = 82 GJ.
4. Batu bara yang setara: $8{,}2 \times 10^{10} \div (30 \times 10^{6}\ \mathrm{J/kg}) \approx 2.700$ kg.

Satu gram U-235, seukuran kacang hijau, setara dengan ±2,7 ton batu bara. Itulah sebabnya PLTN butuh bahan bakar yang sangat sedikit dan tidak menghasilkan CO_2 saat beroperasi. Tantangannya adalah keselamatan dan pengelolaan limbah radioaktifnya.

MITOS

"PLTN bisa meledak seperti bom atom."

FAKTA

Bahan bakar PLTN hanya diperkaya ±3–5% U-235, jauh di bawah kadar senjata, sehingga tak bisa meledak seperti bom. Namun kecelakaan tetap mungkin (panas berlebih, ledakan uap atau hidrogen), maka keselamatan berlapis wajib.

MITOS

"Fusi dan fisi sama-sama memecah atom."

FAKTA

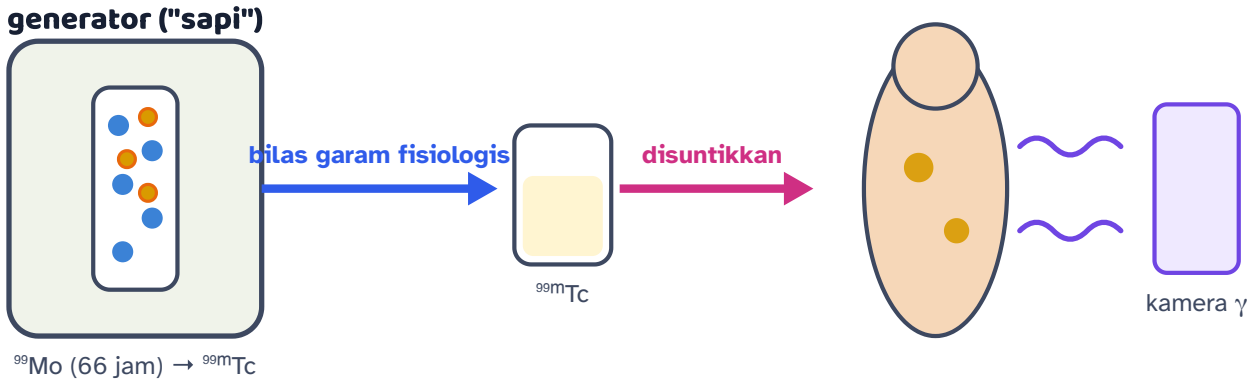
Fisi memecah inti berat (uranium) menjadi dua inti sedang. Fusi justru menyatukan inti ringan (hidrogen) menjadi inti lebih berat. Keduanya melepas energi karena hasilnya lebih "kokoh" daripada pereaksinya.

37.5 Radioisotop untuk manusia

Radioisotop bekerja seperti "mata-mata yang memakai lonceng". Atom radioaktif bersifat kimia sama dengan isotop stabilnya, jadi tubuh, tanaman, atau pipa memperlakukannya sama persis. Bedanya, ia terus "berbunyi" (memancarkan radiasi) sehingga jejaknya dapat dilacak dari luar. Radiasinya pun bisa diarahkan untuk membunuh sel kanker atau mikroba.

Radioisotop	Waktu paruh	Radiasi	Kegunaan	Mengapa cocok

teknesium-99m	6,0 jam	γ (140 keV)	pencitraan tulang, jantung, ginjal, tiroid	γ menembus keluar tubuh untuk dipotret kamera gama; cepat hilang sehingga dosis pasien kecil
fluorin-18	110 menit	$\beta^+ \rightarrow 2\ \gamma$	PET: melihat sel kanker yang "rakus" glukosa	ditempelkan pada glukosa (FDG); positron musnah menjadi dua sinar γ yang berlawanan arah
iodin-131	8,0 hari	β^- dan γ	terapi hipertiroid dan kanker tiroid	kelenjar tiroid menimbun iodin, sehingga β^- merusak sel tiroid dari dalam
kobalt-60	5,27 tahun	γ (1,17 dan 1,33 MeV)	radioterapi, sterilisasi alat medis, mutasi benih	sinar γ kuat dan menembus; waktu paruh cukup panjang untuk sumber bertahun-tahun
fosfor-32	14,3 hari	β^-	perunut serapan pupuk fosfat	tanaman memperlakukannya seperti fosfor biasa
iridium-192	73,8 hari	γ	radiografi sambungan las pipa dan kapal	"rontgen" untuk logam tebal di lapangan
amerisium-241	432 tahun	α	detektor asap	α mengionkan udara; asap memutus arus kecil sehingga alarm berbunyi



Rumah sakit tidak bisa menyimpan teknesium-99m lama-lama karena waktu paruhnya hanya 6 jam. Solusinya: "sapi perah" radioaktif. Induknya, molibdenum-99 (66 jam), terus meluruh di dalam kolom menjadi teknesium-99m, yang "diperah" setiap pagi.

TAMU DARI MASA LALU · DOKTER DARI MALUKU

Reaktor di Serpong dinamai untuk menghormati **Prof. Dr. G.A. Siwabessy** (1904–1982), dokter ahli radiologi kelahiran Pulau Saparua, Maluku. Ia memimpin lembaga tenaga atom Indonesia pada masa awalnya dan pernah menjadi Menteri Kesehatan. Cita-citanya: tenaga nuklir untuk kesehatan dan kesejahteraan rakyat, bukan untuk perang.

KERJAKAN BERSAMA

Menyiapkan dosis teknesium

Seorang pasien perlu disuntik 400 MBq teknesium-99m pada pukul 15.00. Sediaan disiapkan di laboratorium pukul 06.00. Berapa aktivitas yang harus disiapkan? ($T_{1/2}$ = 6,0 jam)

1. Selang waktu: 06.00 sampai 15.00 = 9 jam = 9/6 = 1,5 waktu paruh.
2. Aktivitas saat disuntik $= A_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{1,5}$, sehingga $A_0 = 400 \times 2^{1,5} = 400 \times 2{,}83$.

$A_0 \approx$ **1.130 MBq. Hampir tiga kali lipat dosis yang diperlukan harus disiapkan, karena teknesium terus meluruh selama menunggu.**

KIMIA NUSANTARA · PADI UNGGUL DARI SINAR GAMMA

Peneliti BRIN (dahulu BATAN) menyinari benih padi dengan sinar γ dari kobalt-60 dalam dosis terukur. Radiasi memicu **mutasi** acak pada DNA benih. Ribuan tanaman hasilnya lalu ditanam dan diseleksi bertahun-tahun untuk mencari sifat unggul: batang lebih pendek dan kokoh, umur panen lebih singkat, hasil lebih banyak, atau tahan hama. Dari cara ini lahir puluhan varietas, misalnya padi **Sidenuk** dan **Rojolele Srinuk** (Rojolele asal Klaten yang dibuat lebih pendek dan cepat panen), juga varietas kedelai dan sorgum. Berasnya sama sekali tidak radioaktif: yang disinari hanya benih induknya, puluhan generasi sebelumnya. Teknik serupa, **teknik serangga mandul**, juga diuji untuk nyamuk: nyamuk jantan dimandulkan dengan radiasi lalu dilepas, sehingga telurnya tidak menetas.

Kimia di sekitarmu

Kedokteran nuklir

Teknesium-99m memotret organ yang "bekerja", bukan hanya bentuknya. Iodin-131 mengobati tiroid tanpa operasi.

Padi hasil mutasi

Benih yang disinari sinar γ melahirkan varietas padi, kedelai, dan sorgum unggul yang ditanam petani Indonesia.

Sterilisasi alat suntik

Alat suntik, sarung tangan, dan perban dalam kemasan tertutup disinari γ. Kuman mati tanpa pemanasan yang bisa melelehkan plastik.

Detektor asap

Sekeping kecil amerisium-241 memancarkan α yang membuat udara sedikit menghantar listrik. Asap mengganggu arusnya, lalu alarm berbunyi.

Pipa dan kilang

Iridium-192 "merontgen" sambungan las pipa minyak. Perunut radioaktif menemukan kebocoran pipa bawah tanah tanpa menggali.

Kalender purbakala

Karbon-14, deret uranium, dan kalium–argon menanggali arang, lukisan gua Maros–Pangkep, dan fosil Sangiran.

37.6 Radiasi yang aman: dosis dan sievert

Tebak Dulu!

Dari mana sebagian besar radiasi yang diterima rata-rata orang setiap tahun?

- Dari pembangkit listrik tenaga nuklir.
- Dari ponsel, wifi, dan menara pemancar.
- Dari alam: gas radon, sinar kosmik, tanah dan bangunan, serta makanan.
- Dari foto rontgen di rumah sakit.

Jawabannya: dari alam. Rata-rata dosis radiasi alam di dunia sekitar 2,4 mSv per tahun, dan hampir separuhnya dari gas radon. Ponsel dan wifi memancarkan gelombang radio yang *tidak mengionkan*, jenis radiasi yang sama sekali berbeda. Tubuhmu sendiri pun radioaktif: ada ±4.000 peluruhan kalium-40 dan ±3.000 peluruhan karbon-14 setiap detik di dalamnya.

Radiasi pengion (α, β, γ, sinar-X, neutron) dapat merusak molekul di dalam sel, termasuk DNA. Seberapa besar bahayanya bergantung pada **dosis**: berapa banyak energi radiasi yang diserap tubuh, dan jenis radiasinya.

Bahasa sederhana · Radiasi itu seperti sinar matahari. Berjemur sebentar di pagi hari tidak apa-apa, bahkan baik. Berjemur seharian di siang bolong bisa membuat kulit terbakar. Yang penting adalah **berapa banyak** dan **berapa lama**. Itulah sebabnya ilmuwan mengukur radiasi dengan satuan dosis, dan petugas radiasi memakai alat kecil di bajunya untuk mencatat dosis yang mereka terima.

DEFINISI · SATUAN DOSIS

Dosis serap diukur dalam **gray** (Gy): 1 Gy = 1 joule energi radiasi yang diserap tiap kilogram jaringan. Karena α jauh lebih merusak daripada β atau γ untuk energi yang sama, dosis serap dikalikan faktor bobot radiasi (α: 20; β dan γ: 1) dan faktor kepekaan organ menjadi **dosis efektif**, dengan satuan **sievert** (Sv). Dosis sehari-hari biasanya ditulis dalam milisievert (1 mSv = 0,001 Sv) atau mikrosievert (1 µSv = 0,001 mSv).

Sumber atau keadaan	Dosis efektif (perkiraan)
makan satu buah pisang (kalium-40)	±0,1 µSv
foto rontgen dada	±0,02–0,1 mSv
penerbangan Jakarta–Jeddah (±9 jam)	±0,03–0,05 mSv
batas tambahan dosis untuk masyarakat umum dari kegiatan nuklir	1 mSv per tahun
radiasi alam rata-rata dunia	**±2,4 mSv per tahun** (umumnya 1–3 mSv)
CT scan perut	±8 mSv
batas dosis pekerja radiasi	20 mSv per tahun (rata-rata 5 tahun)
gejala sakit radiasi akut (sekaligus, seluruh tubuh)	di atas ±1.000 mSv (1 Sv)

PRINSIP · WAKTU, JARAK, PERISAI

Petugas radiasi berpegang pada tiga cara sederhana untuk menekan dosis "serendah yang wajar dapat dicapai":

1. **Waktu**: makin singkat berada di dekat sumber, makin kecil dosisnya.
2. **Jarak**: untuk sumber kecil, laju dosis turun sebanding kuadrat jarak. Mundur dua kali lebih jauh, dosis tinggal seperempatnya.
3. **Perisai**: kertas untuk α, plastik atau aluminium untuk β, timbal atau beton untuk γ, serta air dan beton tebal untuk neutron.

RUMUS HIDUP

Jarak adalah perisai: hukum kuadrat terbalik

$$D_2 = D_1 \times \left(\frac{1\ \text{m}}{r}\right)^2$$

Menjauh dua kali lipat dari sumber titik membuat laju dosis tinggal seperempatnya.

- D_1 Laju dosis pada jarak 1 m µSv/jam
- r Jarak baru m
- D_2 Laju dosis baru µSv/jam

LAJU DOSIS BARU

10

µSv/jam

2× lebih jauh → ¼ dosis

Pada jarak **2** m laju dosis menjadi **10** µSv/jam, yaitu **25**% dari laju dosis pada 1 m.

Cek satuan: (µSv/jam) × (m/m)² = µSv/jam ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-INTI-JARAK

⚠ **KESELAMATAN**

Jangan pernah memungut, membuka, atau membawa pulang benda logam asing bertanda radiasi (lambang baling-baling tiga daun berwarna kuning–hitam), misalnya dari tempat rongsokan. Jauhi, ingat lokasinya, dan laporkan kepada orang dewasa, aparat setempat, atau BAPETEN. Sumber α paling berbahaya bila **tertelan atau terhirup**, walaupun dari luar tertahan oleh kulit. Percobaan di bab ini hanya memakai simulasi koin, dadu, atau permen, tanpa bahan radioaktif sungguhan.

ID **KIMIA NUSANTARA · RADIASI ALAM DI MAMUJU**

Beberapa daerah di **Mamuju**, Sulawesi Barat, dikenal memiliki radiasi latar alami yang lebih tinggi daripada rata-rata, karena batuan setempat kaya uranium dan torium. Para peneliti BRIN dan BAPETEN memetakan dan memantaunya, termasuk kadar radon di dalam rumah. Ini contoh nyata bahwa radiasi tidak selalu buatan manusia, dan bahwa pengukuran ilmiahlah, bukan rasa takut, yang menentukan langkah aman.

MITOS

"Setelah dua waktu paruh, zat radioaktif habis."

FAKTA

Setelah dua waktu paruh masih tersisa ¼, setelah tiga waktu paruh ⅛. Setiap waktu paruh hanya mengurangi separuh dari yang masih ada.

MITOS

"Radiasi selalu buatan manusia."

FAKTA

Sebagian besar dosis kita berasal dari alam: radon dari tanah, sinar kosmik, batuan, makanan, bahkan kalium-40 dan karbon-14 di tubuh sendiri.

MITOS

"Makanan yang diiradiasi menjadi radioaktif."

FAKTA

Sinar γ membunuh mikroba lalu lewat begitu saja. Makanannya tidak menjadi radioaktif, sama seperti tubuhmu tidak bercahaya setelah difoto rontgen.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ENERGI IKAT PER NUKLEON DAN $E = MC^2$

Massa sebuah inti selalu lebih kecil daripada jumlah massa proton dan neutron penyusunnya. Untuk helium-4: $2(1{,}007276) + 2(1{,}008665) = 4{,}031882$ u, sedangkan inti $^4\mathrm{He}$ hanya 4,001506 u. Defek massanya 0,030376 u, setara $0{,}030376 \times 931{,}5 = 28{,}3$ MeV. Inilah **energi ikat**: energi yang dibutuhkan untuk mencerai-beraikan inti, atau yang dilepas saat inti terbentuk. Dibagi 4 nukleon, energi ikat per nukleonnya 7,07 MeV.

Kalau energi ikat per nukleon digambar terhadap nomor massa, kurvanya naik tajam, memuncak di sekitar **besi-56 dan nikel-62** (±8,8 MeV), lalu turun perlahan sampai uranium (±7,6 MeV). Inti di puncak paling kokoh. Akibatnya:

- **Fusi** inti ringan (kiri puncak) menjadi inti yang lebih berat menaikkan energi ikat per nukleon, sehingga melepas energi.
- **Fisi** inti berat (kanan puncak) menjadi dua inti sedang juga menaikkan energi ikat per nukleon, sehingga melepas energi.
- Besi adalah "abu" terakhir di bintang: membakar atau membelah besi tidak lagi menghasilkan energi.

Satu kilogram massa yang seluruhnya berubah menjadi energi menghasilkan $E = mc^2 = 1 \times (3{,}0 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$ J, cukup untuk menyalakan seluruh Indonesia selama berminggu-minggu. Reaksi kimia biasa juga mengubah massa menjadi energi, tetapi bagiannya amat kecil (sekitar sepermiliar), sehingga tak terukur oleh neraca.

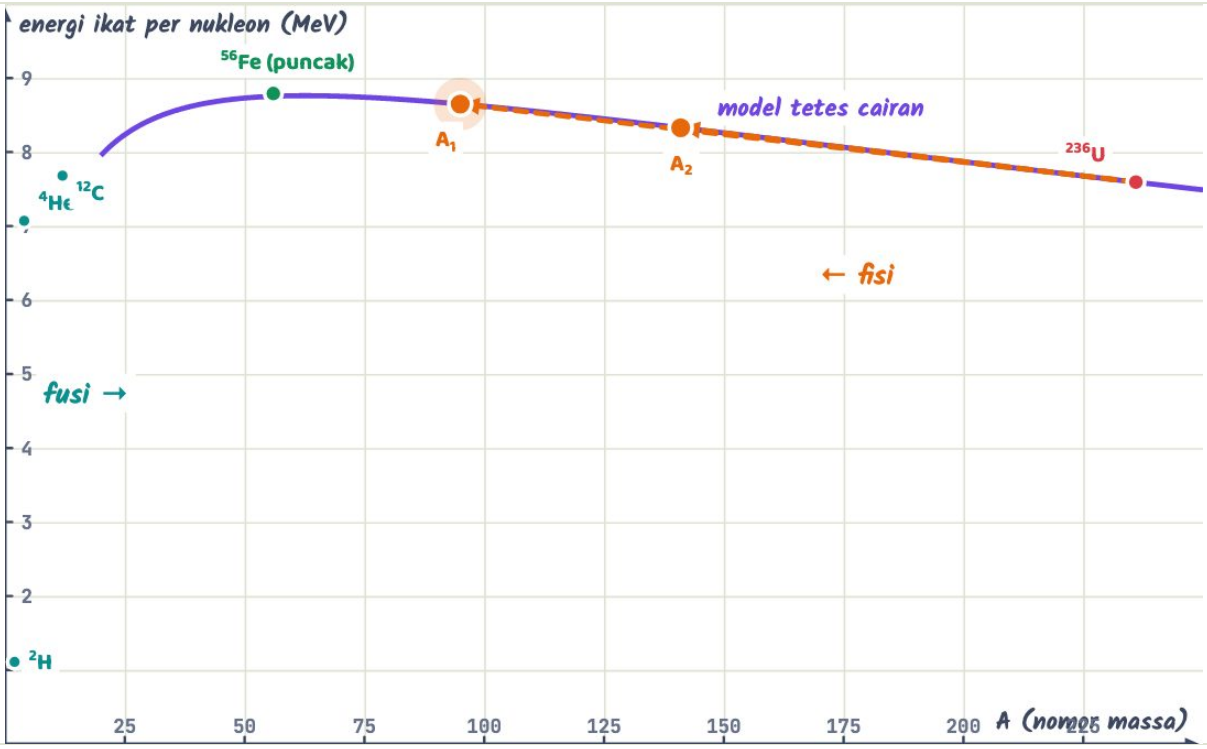
GRAFIK HIDUP

Membelah uranium-236 di kurva energi ikat

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37

$$E_{\text{lepas}} = A_1\, b_1 + A_2\, b_2 - 236\, b_{\text{U}}$$

$$A_1 = 95,\ A_2 = 141 : \quad E_{\text{lepas}} \approx 203{,}89\ \text{MeV}$$



mirip pecahan nyata, misalnya Kr-92 + Ba-141: ±200 MeV

pecahan 1 (A_1)	pecahan 2 (A_2)	energi dilepas
95	141	204 MeV

Seret titik oranye A_1 untuk memilih cara uranium-236 terbelah. Kedua pecahan selalu berada lebih tinggi daripada uranium di kurva, jadi fisi selalu melepas energi (sekitar 200 MeV). Kurva ungu dihitung dari model "tetes cairan" yang kurang cocok untuk inti sangat ringan, maka titik ^{2}H, ^{4}He, dan ^{12}C diambil dari data nyata.

Cek Cepat

Inti $^{40}_{19}\mathrm{K}$ yang menangkap sebuah elektron dari kulit K berubah menjadi …

- $^{40}_{20}\mathrm{Ca}$
- $^{40}_{18}\mathrm{Ar}$
- $^{36}_{17}\mathrm{Cl}$
- $^{41}_{19}\mathrm{K}$

Setelah tiga kali waktu paruh, bagian zat radioaktif yang masih tersisa adalah …

- $\frac{1}{3}$
- $\frac{1}{6}$
- $\frac{1}{8}$
- 0

Mengapa fosil *Homo erectus* Sangiran tidak ditanggali dengan karbon-14?

- Umurnya ratusan ribu tahun lebih, sedangkan C-14 hampir habis setelah ±50.000 tahun.
- Fosil sama sekali tidak mengandung karbon.
- Karbon-14 meluruh lebih cepat di tanah Jawa yang panas.
- Karbon-14 hanya bisa dipakai untuk batuan.

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. A

Tantangan Rumah: jam koin di meja makan

Bahan: 100 koin (atau 100 permen pipih yang salah satu sisinya bertanda, atau 30 dadu), nampan atau kotak sepatu, kertas grafik, pensil, ponsel untuk memotret.

1. Taruh 100 koin di kotak. Kocok kotaknya (tutup dulu!), lalu tumpahkan pelan ke nampan.
2. Semua koin yang menunjukkan **angka** dianggap sudah "meluruh". Sisihkan dan hitung yang tersisa.
3. Masukkan lagi koin yang tersisa ke kotak, kocok, tumpahkan, dan sisihkan lagi yang angka. Ulangi sampai koin habis atau 8 kali lemparan.
4. Catat jumlah koin tersisa setiap lemparan, lalu gambar grafik sisa koin terhadap nomor lemparan.
5. Ulangi dengan dadu: dadu "meluruh" jika muncul mata 6. Bandingkan kurvanya dengan kurva koin.

Keselamatan: Lakukan bersama orang dewasa. Kerjakan di atas nampan di meja supaya koin tidak menggelinding ke lantai dan membuat orang terpeleset. Jauhkan koin dan permen kecil dari adik balita karena bisa tertelan. Permen yang sudah dipegang-pegang atau jatuh jangan dimakan, dan cuci tangan setelah memegang koin.

Pertanyaan: Setelah berapa lemparan koinmu tinggal sekitar separuh? Mengapa dadu butuh lebih banyak lemparan? Jika satu lemparan koin dianggap 5.730 tahun, berapa umur "fosil" yang koinnya tinggal seperempat?

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 37 dalam 3 menit

☑ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan mengapa sebagian inti **stabil** dan sebagian **radioaktif** memakai rasio n/p dan **pita kestabilan**
- menuliskan dan menyetarakan **persamaan inti** untuk peluruhan α, β^-, β^+, tangkap elektron, dan γ
- menghitung sisa zat radioaktif dan **umur benda purba** dari **waktu paruh**, termasuk memilih "jam" penanggalan yang tepat
- membedakan **fisi** dan **fusi** serta menghitung energinya dari **defek massa** ($E = \Delta m\, c^2$)
- menjelaskan manfaat **radioisotop** di kedokteran, pertanian, dan industri, serta menakar keselamatan radiasi dalam **sievert**

🔑 Istilah kunci

nukleon · nuklida · gaya inti kuat · Radioaktivitas · radionuklida · radioisotop · pita kestabilan · angka ajaib · deret radioaktif · Waktu paruh · aktivitas · becquerel · fisi · fusi · reaksi berantai · faktor perbanyakan

🧮 Rumus penting

$$N = N_0 \left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Sisa zat radioaktif setelah waktu t. Setiap lewat satu waktu paruh, yang tersisa tinggal separuh dari jumlah sebelumnya.

$$t = T_{1/2} \times \frac{\ln\left(100\% \,/\, p\right)}{\ln 2}$$

Umur dari sisa karbon-14. Hitung berapa kali C-14 sudah 'dibagi dua', lalu kalikan dengan 5.730 tahun.

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \frac{m}{M} \times N_A$$

Aktivitas sumber radioaktif. Makin banyak inti dan makin pendek waktu paruhnya, makin sering terdengar 'klik' peluruhan setiap detik.

$$E = \Delta m \times 931{,}5 \ \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

Energi dari defek massa. Massa yang 'hilang' dalam reaksi inti berubah menjadi energi. Setiap 1 u massa setara dengan 931,5 MeV.

$$D_2 = D_1 \times \left(\frac{1\ \text{m}}{r}\right)^2$$

Jarak adalah perisai: hukum kuadrat terbalik. Menjauh dua kali lipat dari sumber titik membuat laju dosis tinggal seperempatnya.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Elektron pada peluruhan β^- bukan elektron dari kulit atom.
- "Setelah dua waktu paruh, semua inti habis" adalah keliru.
- Jangan pernah memungut, membuka, atau membawa pulang benda logam asing bertanda radiasi (lambang baling-baling tiga daun berwarna kuning–hitam), misalnya dari tempat rongsokan.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=37

🧩 Teka-teki untuk Bab 38

Hujan di kota industri bisa membuat patung marmer dan candi batu kapur "meleleh" perlahan, garis-garis ukirannya makin kabur dari tahun ke tahun. Air hujan biasa tidak sekuat itu. Zat apa yang terlarut di dalam hujan kota, dan dari mana asalnya?

▼ **Intip petunjuk**

Cerobong pabrik dan knalpot melepaskan belerang dioksida dan nitrogen oksida. Di udara, gas-gas ini bereaksi dengan oksigen dan uap air menjadi asam sulfat dan asam nitrat, lalu turun sebagai **hujan asam**. Asam bereaksi dengan kalsium karbonat dalam marmer: $\mathrm{CaCO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2}$. Di Bab 38 kita menyelidiki kimia udara, air, dan cara membuat kimia lebih "hijau".

BAB 38 · INTI, LINGKUNGAN & ANALISIS

38 Kimia Lingkungan & Kimia Hijau: Merawat Labu Reaksi Terbesar Kita

Bumi adalah satu labu reaksi raksasa: udaranya campuran gas, lautnya larutan, dan hujannya membawa asam. Di bab ini kamu belajar membaca "hasil lab" planet kita, lalu merancang kimia yang sejak awal tidak meninggalkan masalah.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan sumber dan dampak **polutan udara** (CO, NO_x, SO_2, $PM_{2,5}$, ozon permukaan) dan membaca **ISPU**;
- menuliskan reaksi pembentukan **hujan asam** dan **perusakan ozon** oleh CFC, lalu membedakan keduanya dari **efek rumah kaca**;
- menghitung **jejak karbon** pembakaran serta mengonversi ppm, mg/L, mol/L, dan $\mu g/m^3$;
- menjelaskan **kesadahan**, **BOD/COD**, bahaya **merkuri**, dan tahap pengolahan air di **PDAM**;
- menerapkan **12 prinsip kimia hijau** dan menghitung **ekonomi atom** suatu reaksi.

LANGIT JINGGA DI ATAS SEKOLAH

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Apa penyebab utama pemanasan global yang sedang terjadi sekarang?

- Lubang ozon yang membuat panas matahari masuk lebih banyak.
- Bertambahnya gas rumah kaca, terutama CO_2 dan metana, dari kegiatan manusia.
- Panas yang dibuang mesin, AC, dan lampu di kota-kota besar.
- Gunung berapi yang makin sering meletus.

Jawabannya: gas rumah kaca. Lubang ozon membuat lebih banyak sinar *ultraviolet* sampai ke permukaan (bahaya bagi kulit dan mata), tetapi hampir tidak menambah panas. Pemanasan global terjadi karena gas seperti CO_2 dan CH_4 menahan sinar *inframerah* yang dipancarkan Bumi. Dua masalah yang berbeda, dengan zat dan reaksi yang berbeda pula. Bab ini memisahkan keduanya dengan jelas.

38.1 Udara yang kita hirup: atmosfer & polutan

Setiap napasmu menghirup ±0,5 liter campuran gas. Udara kering terdiri atas nitrogen N_2 ±78%, oksigen O_2 ±21%, argon ±0,93%, dan karbon dioksida ±0,04% (sekitar 420 ppm). Sisanya, dalam jumlah sangat kecil, adalah neon, helium, metana, ozon, dan banyak lagi.

Hampir semua cuaca dan hampir semua polusi berada di lapisan terbawah, **troposfer**, setinggi ±12 km (di atas khatulistiwa sampai ±16–18 km). Di atasnya ada **stratosfer** (sampai ±50 km), tempat lapisan ozon pelindung berada.

Bahasa sederhana · Bayangkan udara seperti kuah sayur bening yang terlihat bersih. Kalau ada sedikit garam atau cabai yang larut, kuahnya tetap tampak jernih, tetapi rasanya berubah. Udara juga begitu: zat pencemar sering tidak terlihat, padahal jumlah yang sangat sedikit pun sudah bisa membuat kita batuk dan sesak.

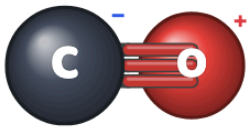
DEFINISI · POLUTAN UDARA

Polutan udara adalah zat di udara yang kadarnya cukup tinggi untuk mengganggu kesehatan makhluk hidup atau merusak benda. **Polutan primer** langsung keluar dari sumbernya (CO, SO_2, NO, jelaga). **Polutan sekunder** terbentuk di udara dari reaksi polutan primer, misalnya ozon permukaan dan asam sulfat dalam hujan.

Polutan	Sumber utama	Dampak
CO (karbon monoksida)	pembakaran tak sempurna: knalpot, kebakaran gambut, asap rokok, genset di ruang tertutup	mengikat hemoglobin ±200–250 kali lebih kuat daripada O_2, sehingga darah kekurangan oksigen
NO_x (NO, NO_2)	mesin kendaraan dan pembangkit bersuhu tinggi: $N_2 + O_2 \longrightarrow 2\,NO$	iritasi saluran napas, hujan asam (HNO_3), pembentuk ozon permukaan
SO_2 (belerang dioksida)	batu bara dan minyak bersulfur, peleburan bijih logam, gunung api	sesak napas, hujan asam (H_2SO_4)
$PM_{2,5}$ dan PM_{10}	asap kebakaran hutan dan gambut, knalpot diesel, debu jalan	$PM_{2,5}$ masuk sampai ke alveolus paru, bahkan sebagian ke darah: asma, penyakit jantung
O_3 permukaan	polutan sekunder: NO_2 + sinar matahari + hidrokarbon	pedih di mata, iritasi paru, merusak daun tanaman
HC (hidrokarbon)	bensin yang menguap, pembakaran tak sempurna	bahan baku kabut fotokimia; beberapa (mis. benzena) bersifat karsinogen

Ozon permukaan adalah contoh polutan sekunder yang menarik. Di siang terik, sinar matahari memecah NO_2 dari knalpot: $NO_2 \xrightarrow{\text{cahaya}} NO + O$. Atom O yang sangat reaktif langsung bergabung dengan O_2: $O + O_2 \longrightarrow O_3$. Itulah sebabnya kadar ozon di kota padat biasanya memuncak pada siang hari, bukan pada jam macet pagi.

MOLEKUL 3D **Kenali wajah para polutan udara**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Karbon monoksida CO Mr ≈ 28,01

Ikatan rangkap tiga (dua kovalen biasa + satu kovalen koordinasi dari O), panjang 113 pm. Gas tak berbau dan beracun dari pembakaran tidak sempurna; mengikat hemoglobin lebih kuat daripada O_2.

Putar setiap molekul. CO hanya dua atom, tetapi sangat berbahaya karena "merebut" tempat O_2 di hemoglobin. Ketuk tiga atom SO_2, NO_2, dan O_3 untuk mengukur sudutnya: mengapa ketiganya bengkok?

ISPU: rapor harian udara

Di Indonesia, kualitas udara dilaporkan dengan **Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)**. Alat pemantau mengukur tujuh parameter: PM_{10}, $PM_{2,5}$, CO, NO_2, SO_2, O_3, dan hidrokarbon. Setiap kadar diubah menjadi angka indeks, lalu angka **tertinggi** menjadi ISPU hari itu. Parameter yang paling tinggi disebut **parameter kritis**, seperti $PM_{2,5}$ di aplikasi Laras.

Rentang ISPU	Kategori	Artinya bagi kita
0–50	**Baik** (hijau)	aman untuk semua kegiatan di luar ruang
51–100	**Sedang** (biru)	masih dapat diterima; orang yang sangat sensitif tetap waspada
101–200	**Tidak Sehat** (kuning)	anak-anak, lansia, dan penderita asma mengurangi kegiatan di luar
201–300	**Sangat Tidak Sehat** (merah)	semua orang mengurangi kegiatan di luar; pakai masker yang rapat

≥ 301	**Berbahaya** (hitam)	tetap di dalam ruangan dan ikuti arahan pemerintah

Alat pemantau gas sering memberi kadar dalam **ppm volume** (mililiter gas per meter kubik udara), sedangkan baku mutu memakai **µg/m³**. Konversinya memakai konsep mol dan volume molar gas (24,45 L/mol pada 25 °C dan 1 atm):

RUMUS HIDUP

Dari ppm ke µg/m³ (gas di udara)

$$c = \frac{\text{ppm} \times M_r \times 1000}{24{,}45}$$

Satu ppm berarti satu mililiter gas di setiap meter kubik udara. Ubah mililiter itu menjadi mol, lalu menjadi mikrogram.

- ppm — Kadar gas (volume) ppm
- M_r — Massa molar gas g/mol
- c — Kadar massa µg/m³

KADAR MASSA

130,9

µg/m³

ini SO_2

0,05 ppm gas bermassa molar **64** g/mol = **130,9** µg di setiap m³ udara (25 °C, 1 atm), atau **0,131** mg/m³.

Cek satuan: (mL/m³) ÷ (1000 mL/L) ÷ (24,45 L/mol) × (g/mol) × (10^6 µg/g) = µg/m³ ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-UDARA-PPM-UGM3

CONTOH **CO di jalan macet**

Di sebuah perempatan yang macet, alat mengukur kadar CO 9 ppm. Nyatakan kadar itu dalam µg/m³ (25 °C, 1 atm; Mr CO = 28).

1. 9 ppm berarti 9 mL CO dalam 1 m³ udara = 0,009 L.
2. Mol CO: $n = 0{,}009/24{,}45 = 3{,}68 \times 10^{-4}$ mol.
3. Massa: $3{,}68 \times 10^{-4} \times 28 = 0{,}0103$ g = 10.300 µg.

Kadar CO ±10.300 µg/m³ (±10,3 mg/m³). Hasil yang sama didapat dari rumus: $9 \times 28 \times 1000/24{,}45$**.**

KIMIA NUSANTARA · KABUT ASAP DARI GAMBUT

Gambut di Riau, Jambi, Sumatra Selatan, dan Kalimantan adalah tumpukan sisa tumbuhan yang belum membusuk sempurna, kaya karbon, dan bisa setebal beberapa meter. Bila mengering lalu terbakar, apinya **membara di bawah permukaan** dengan oksigen terbatas. Pembakaran tak sempurna itu menghasilkan CO, jelaga $PM_{2,5}$, dan banyak senyawa organik, jauh lebih "kotor" daripada api di kayu kering. Pada kebakaran besar 2015, asapnya sampai ke negeri tetangga. Itulah sebabnya menjaga gambut tetap basah adalah kebijakan kimia sekaligus kebijakan kesehatan.

AWAS JEBAKAN

Udara yang tampak bersih belum tentu sehat, dan masker apa pun belum tentu melindungi. Masker kain tipis hanya menahan sebagian kecil $PM_{2,5}$; masker jenis N95/KN95 yang menempel rapat di wajah jauh lebih efektif. Saat ISPU tinggi, cara terbaik tetap mengurangi waktu di luar ruangan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGHITUNG ISPU DENGAN INTERPOLASI LINEAR

Setiap parameter punya tabel batas. Bila kadar terukur X_x berada di antara batas bawah X_b (indeks I_b) dan batas atas X_a (indeks I_a), maka

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b}\,(X_x - X_b) + I_b$$

Misalnya untuk $PM_{2,5}$ rata-rata 24 jam, batas ISPU 100 adalah 55,4 µg/m³ dan batas ISPU 200 adalah 150,4 µg/m³. Kadar 100 µg/m³ memberi $I = \frac{100}{95}(100 - 55{,}4) + 100 \approx 147$: kategori Tidak Sehat. Ini persis cara kerja interpolasi yang kamu pakai untuk membaca grafik.

38.2 Hujan asam: ketika langit menetes cuka

Tebak Dulu!

Air hujan di pegunungan yang sangat bersih, jauh dari pabrik dan kendaraan, memiliki pH sekitar …

- tepat 7, karena air hujan adalah air suling alami.
- ±5,6, sedikit asam.
- ±8, sedikit basa karena membawa debu kapur.
- ±2, sangat asam karena tersambar petir.

Jawabannya: ±5,6. Air hujan melarutkan CO_2 dari udara dan membentuk asam karbonat yang lemah: $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$. Jadi hujan *alami* pun sedikit asam. Hujan baru disebut hujan asam bila pH-nya di bawah 5,6.

DEFINISI · HUJAN ASAM

Hujan asam adalah hujan (juga salju, kabut, embun, dan endapan kering) yang pH-nya **lebih kecil dari 5,6** karena mengandung asam kuat, terutama asam sulfat dan asam nitrat dari oksida belerang dan oksida nitrogen.

ATURAN · DUA JALUR MENUJU HUJAN ASAM

Jalur belerang. Belerang dalam batu bara, minyak, atau bijih (misalnya pirit) terbakar menjadi SO_2:

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 \qquad 4\,FeS_2 + 11\,O_2 \longrightarrow 2\,Fe_2O_3 + 8\,SO_2$$

Di udara, SO_2 dioksidasi (dibantu debu, sinar matahari, dan radikal) lalu larut:

$$2\,SO_2 + O_2 \longrightarrow 2\,SO_3 \qquad SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$

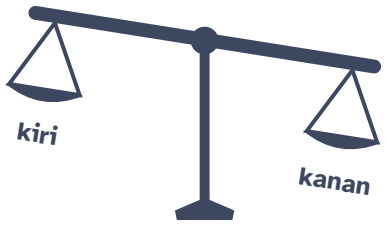
Jalur nitrogen. Di ruang bakar mesin yang sangat panas, nitrogen dan oksigen udara bereaksi. NO lalu teroksidasi menjadi NO_2 yang larut menjadi asam nitrat:

$$N_2 + O_2 \longrightarrow 2\,NO \qquad 2\,NO + O_2 \longrightarrow 2\,NO_2 \qquad 4\,NO_2 + O_2 + 2\,H_2O \longrightarrow 4\,HNO_3$$

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi-reaksi hujan asam**

− 1 + FeS_2 + − 1 + O_2 → − 1 + Fe_2O_3 + − 1 + SO_2

Unsur	Kiri	Kanan	
Fe	1	2	✕
S	2	1	✕
O	2	5	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 8 null

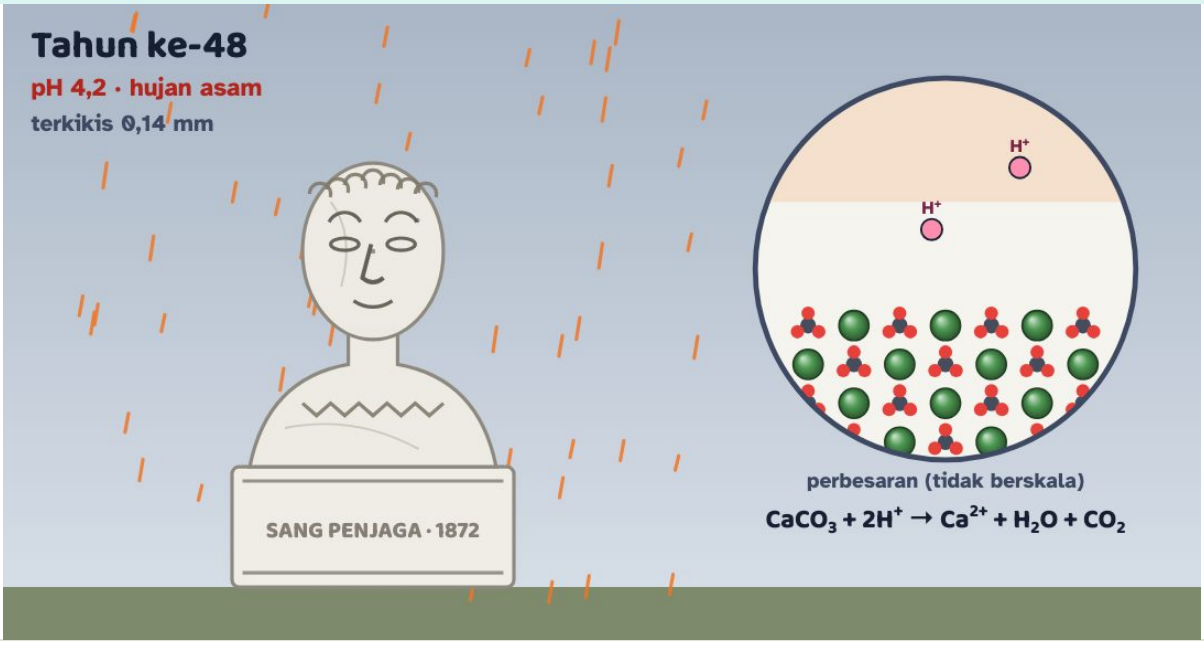
Mulailah dari pirit dalam batu bara, ikuti belerang dan nitrogen sampai menjadi asam, lalu lihat asam itu "memakan" marmer. Untuk $NO_2 + O_2 + H_2O$, setarakan atom N dulu, lalu H, terakhir O.

Apa akibatnya? Asam kuat melarutkan batu kapur dan marmer (keduanya $CaCO_3$): $CaCO_3 + 2\,H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + H_2O + CO_2$. Ukiran halus memudar dan permukaan patung menjadi kasar. Di danau, ikan dan telur katak sulit bertahan di bawah pH ±5. Di tanah hutan, asam mencuci ion hara Ca^{2+} dan Mg^{2+} serta melepaskan ion Al^{3+} yang meracuni akar. Atap seng dan jembatan besi juga lebih cepat berkarat.

LAB MINI

Patung Marmer di Bawah Hujan Asam

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-38



[H⁺] air hujan	$CaCO_3$ larut	Laju pengikisan
$6{,}31 \times 10^{-5}$ mol/L	7,89 g/m² per tahun	2,92 µm/tahun

Waktu	Total terkikis
48 tahun	0,14 mm

Atur pH hujan dan curah hujan, lalu tekan ▶ untuk memutar waktu sampai 300 tahun. Lingkaran perbesaran memperlihatkan ion H^+ yang melepas Ca^{2+} dan CO_2 dari kisi $CaCO_3$. Pada pH berapa ukiran halus di alas patung hilang dalam satu abad? Model ini menganggap semua H^+ bereaksi; endapan kering SO_2 di dunia nyata menambah kerusakan.

TAMU DARI MASA LALU

Istilah "hujan asam" pertama kali dipakai oleh kimiawan Skotlandia **Robert Angus Smith** dalam bukunya tahun 1872. Ia menganalisis hujan di Manchester, kota pabrik berasap batu bara di masa Revolusi Industri, dan menemukan asam sulfat di dalamnya. Seabad kemudian, danau-danau di Skandinavia dan Amerika Utara kehilangan ikannya karena asap dari negara lain. Hujan asam menjadi salah satu masalah lingkungan pertama yang memaksa negara-negara bekerja sama.

KIMIA NUSANTARA · IJEN DAN BOROBUDUR

Tidak semua SO_2 berasal dari pabrik. Gunung api seperti Ijen di Jawa Timur terus mengembuskan SO_2 dan H_2S, dan danau kawahnya termasuk danau paling asam di dunia, dengan pH mendekati 0. Batu Candi Borobudur adalah andesit, bukan marmer, tetapi tetap dirawat dengan cermat karena hujan asam, lumut, dan abu vulkanik (misalnya abu letusan Kelud 2014) mempercepat pelapukannya.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA TEPAT ±5,6? HUKUM HENRY BERTEMU KA

Kelarutan CO_2 sebanding dengan tekanan parsialnya (hukum Henry): $[CO_2\,(aq)] = K_H \cdot p_{CO_2} = 3{,}4 \times 10^{-2}\ \text{mol L}^{-1}\text{atm}^{-1} \times 4{,}2 \times 10^{-4}\ \text{atm} \approx 1{,}4 \times 10^{-5}$ M.

Dengan $K_{a1} \approx 4{,}5 \times 10^{-7}$ dan mengabaikan ionisasi kedua: $[H^+] = \sqrt{K_{a1}[CO_2]} = \sqrt{6{,}3 \times 10^{-12}} = 2{,}5 \times 10^{-6}$ M, sehingga pH ≈ **5,6**. Karena p_{CO_2} terus naik, pH hujan "alami" pun turun sangat sedikit dari tahun ke tahun.

Kabar baiknya, hujan asam bisa dikendalikan dengan kimia. Bahan bakar dikurangi belerangnya (bensin dan solar rendah sulfur). Pembangkit batu bara memasang **scrubber** yang menyemprotkan bubur kapur ke gas buang: $2\,CaCO_3 + 2\,SO_2 + O_2 \longrightarrow 2\,CaSO_4 + 2\,CO_2$. Hasilnya gipsum, yang bahkan bisa dijual untuk papan gipsum. Kendaraan memakai **konverter katalitik** yang mengubah NO dan CO menjadi N_2 dan CO_2.

COBA SENDIRI **Batu bara, belerang, dan kapur**

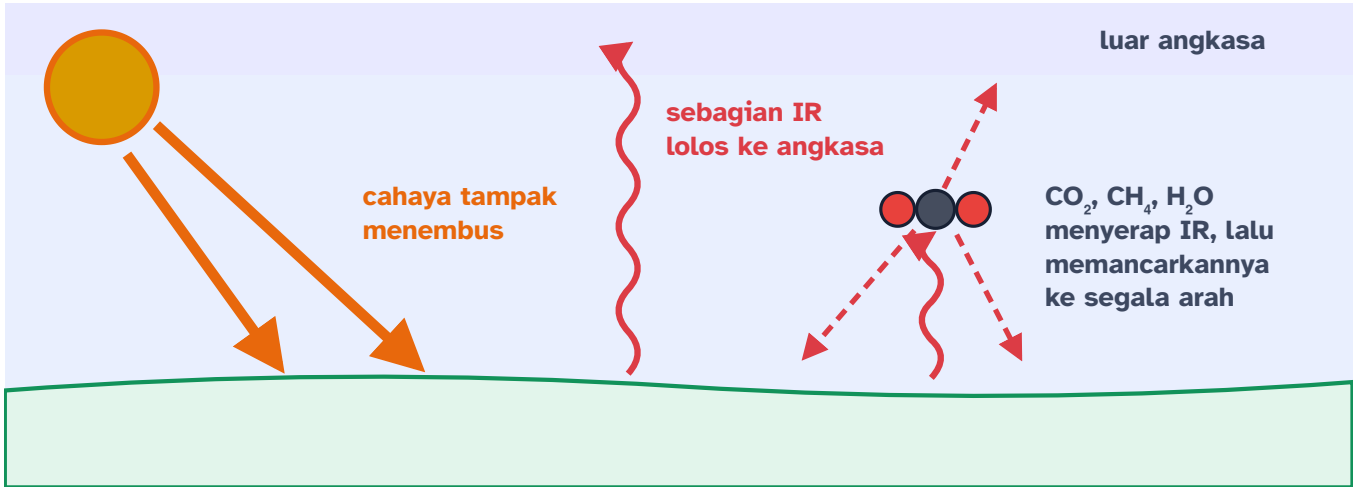
Sebuah pembangkit membakar 1 ton batu bara yang mengandung 1,2% belerang (massa). (a) Berapa kg SO_2 yang terbentuk? (b) Berapa kg $CaCO_3$ yang dibutuhkan scrubber untuk menyerap semuanya? (Ar S = 32, O = 16, Ca = 40, C = 12)

1. Massa S = 1,2% × 1.000 kg = 12 kg → mol S = 12.000 g / 32 = 375 mol.
2. $S + O_2 \longrightarrow SO_2$: 1 mol S → 1 mol SO_2. Massa SO_2 = 375 × 64 = 24.000 g = 24 kg.
3. Pada scrubber, perbandingan $CaCO_3 : SO_2$ = 2 : 2 = 1 : 1, jadi butuh 375 mol $CaCO_3$ = 375 × 100 g = 37,5 kg.

(a) 24 kg SO_2 per ton batu bara, (b) 37,5 kg kapur. Pembangkit besar membakar ribuan ton per hari, jadi scrubber menyelamatkan ratusan ton SO_2 setiap hari dari langit kita.

38.3 Efek rumah kaca & perubahan iklim

Sinar matahari sebagian besar berupa cahaya tampak yang menembus atmosfer dan menghangatkan daratan serta lautan. Bumi yang hangat lalu memancarkan energi kembali ke angkasa dalam bentuk **inframerah** (IR). Beberapa gas di udara menyerap IR itu dan memancarkannya lagi ke segala arah, termasuk kembali ke Bumi. Akibatnya, panas tertahan lebih lama, seperti di dalam mobil yang diparkir di bawah terik.



Tanpa efek rumah kaca alami, suhu rata-rata Bumi sekitar –18 °C, bukan +15 °C. Masalahnya bukan efeknya, tetapi **penambahannya**: makin banyak gas rumah kaca, makin banyak inframerah yang tertahan.

Bahasa sederhana · Gas rumah kaca bekerja seperti selimut. Selimut tipis membuatmu nyaman di malam yang dingin. Tetapi bila setiap malam selimutnya ditambah satu lapis, lama-lama kamu kepanasan. Manusia sedang "menambah selimut" Bumi dengan membakar bensin, solar, batu bara, dan hutan.

DEFINISI · GAS RUMAH KACA DAN GWP

Gas rumah kaca adalah gas yang menyerap dan memancarkan radiasi inframerah, misalnya H_2O, CO_2, CH_4, N_2O, dan CFC. **Potensi pemanasan global (GWP)** membandingkan kemampuan 1 kg gas menahan panas selama 100 tahun dengan 1 kg CO_2 (GWP CO_2 = 1). Emisi gas lain dinyatakan dalam **CO_2-ekuivalen** (CO_2e) = massa gas × GWP.

Gas	Kadar pra-industri	Kadar kini (±)	GWP 100 tahun	Sumber penting di Indonesia
CO_2	±280 ppm	±420 ppm	1	bahan bakar fosil, pembukaan hutan, kebakaran gambut, pabrik semen
CH_4 (metana)	±0,72 ppm	±1,9 ppm	±28–30	sawah tergenang, sampah di TPA, ternak, kebocoran gas
N_2O	±0,27 ppm	±0,34 ppm	±270	pupuk nitrogen berlebih di lahan pertanian
CFC-12, CCl_2F_2	0	±0,0005 ppm	lebih dari 10.000	kulkas dan AC lama (kini dilarang)

MOLEKUL 3D **Siapa yang menangkap inframerah?**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Karbon dioksida CO_2

Mr ≈ 44,01 | PubChem ↗

Linear (180°), nonpolar walau ikatannya polar. Keluar dari napas kita dan diserap tumbuhan.

Bandingkan CO_2, CH_4, N_2O, dan H_2O dengan N_2 dan O_2. Penyusun 99% udara itu hanya dua atom sejenis: saat bergetar, muatannya tetap seimbang sehingga tidak bisa menyerap inframerah. Gas rumah kaca punya tiga atom atau lebih dengan ikatan polar.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

GETARAN YANG "AKTIF IR"

Sebuah molekul menyerap foton IR bila getarannya **mengubah momen dipol**. CO_2 linear punya empat mode getaran: regangan simetris (dipol tetap nol, tidak aktif IR), regangan asimetris (±2.349 cm^{-1}, 4,3 µm), dan dua tekukan setara (±667 cm^{-1}, 15 µm). Bumi memancarkan IR paling kuat di sekitar 10 µm, dan pita tekukan 15 µm milik CO_2 jatuh tepat di tepi "jendela" pancaran itu. Pengetahuan yang sama dipakai di spektroskopi IR (Bab 39).

Bagaimana kita tahu CO_2 bertambah? Sejak 1958, udara di puncak Mauna Loa (Hawaii) diukur terus-menerus. Grafiknya dinamai **kurva Keeling**. Grafik Hidup di bawah ini adalah **model matematis sederhana** yang meniru bentuk kurva itu (bukan data mentah): tren yang makin curam ditambah gelombang musiman.

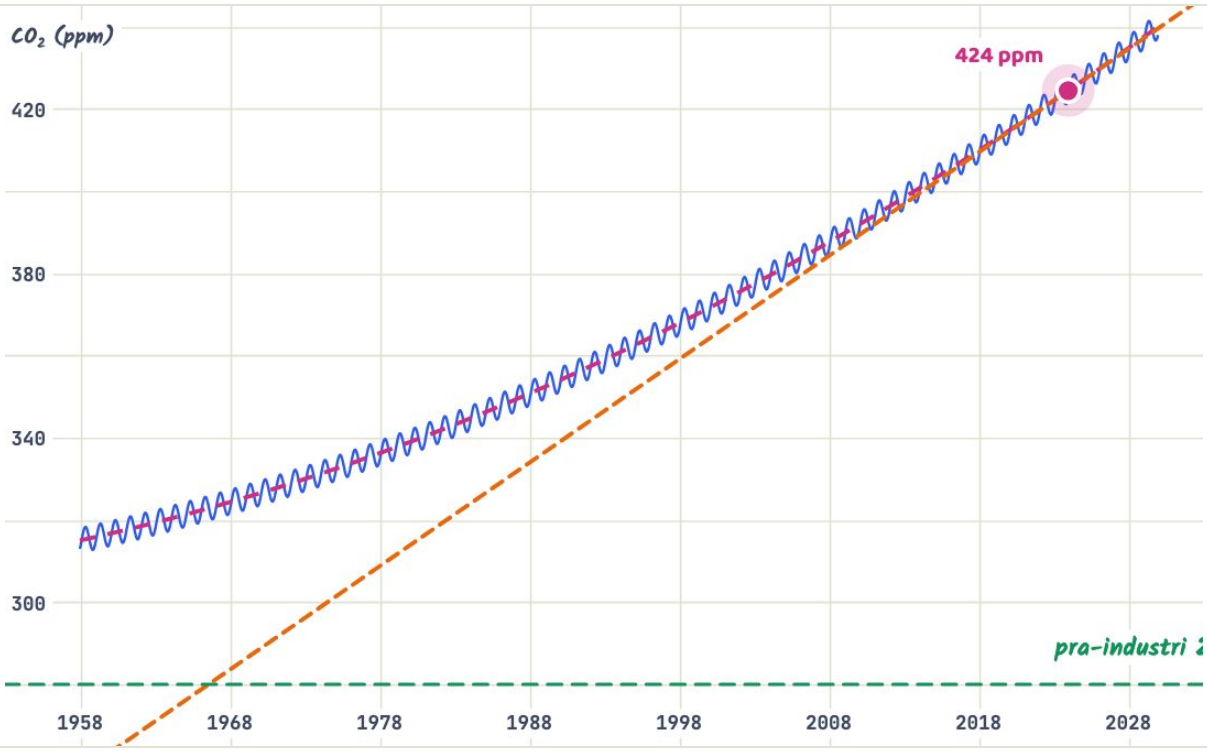
GRAFIK HIDUP

Kurva Keeling: CO_2 naik-turun setiap tahun, tetapi terus naik

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-38

$$C \approx 315 + 0{,}8\,t + 0{,}013\,t^2 + A \sin 2\pi(t - 0{,}12)$$

2024: $C \approx 424$ ppm, $+2{,}5$ ppm/tahun



di atas 400 ppm: lebih tinggi daripada kapan pun dalam 800.000 tahun terakhir (data inti es)

amplitudo ±3 ppm, mirip Mauna Loa di Hawaii

tahun	CO_2 rata-rata tahunan	laju kenaikan (garis singgung)	di atas pra-industri
2024	424 ppm	2,52 ppm/tahun	52 %

C = kadar CO_2 (ppm), t = tahun sejak 1958, A = amplitudo musiman. Seret titik magenta atau tekan ▶ untuk memutar waktu. Garis oranye adalah garis singgung: kemiringannya adalah laju kenaikan CO_2. Mengapa kurva biru turun setiap pertengahan tahun? (Petunjuk: musim tumbuh di belahan Bumi utara, tempat sebagian besar daratan dan hutan berada.)

KIMIA NUSANTARA · PENJAGA UDARA DI BUKIT KOTOTABANG

Di perbukitan Kabupaten Agam, Sumatra Barat, BMKG mengoperasikan **Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang**, bagian dari jaringan pemantau atmosfer Organisasi Meteorologi Dunia (WMO). Stasiun ini termasuk sedikit stasiun global yang berada tepat di dekat khatulistiwa. Di sana diukur CO_2, CH_4, ozon, aerosol, dan kimia air hujan. Datanya menunjukkan tren kenaikan CO_2 yang sama dengan Mauna Loa, dengan gelombang musiman yang jauh lebih kecil karena di khatulistiwa tidak ada musim dingin.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1856, ilmuwan Amerika **Eunice Foote** menjemur tabung-tabung kaca berisi gas dan menemukan bahwa tabung berisi CO_2 menjadi paling panas. Tiga tahun kemudian **John Tyndall** mengukur serapan "panas gelap" (inframerah) oleh uap air dan CO_2. Pada 1896 kimiawan Swedia **Svante Arrhenius** menghitung dengan tangan bahwa melipatduakan CO_2 akan menaikkan suhu Bumi beberapa derajat. Lalu sejak 1958, **Charles David Keeling** membuktikan dengan pengukuran teliti bahwa CO_2 memang terus bertambah.

Metana punya cerita Nusantara sendiri. Di sawah yang tergenang terus-menerus, tanah kekurangan oksigen sehingga mikroba *metanogen* mengubah sisa jerami dan bahan organik menjadi CH_4. Hal yang sama terjadi pada tumpukan sampah organik di TPA. Mengairi sawah secara berselang (basah–kering) dan mengompos sampah dapur dapat memangkas emisi metana secara berarti.

AWAS JEBAKAN

Satu hari yang dingin atau satu musim hujan yang basah tidak membantah pemanasan global. **Cuaca** adalah keadaan udara dari hari ke hari; **iklim** adalah rata-rata cuaca selama puluhan tahun. Saat ini suhu rata-rata Bumi sudah sekitar 1,1–1,3 °C lebih tinggi daripada masa pra-industri.

Jejak karbon: dari tangki bensin ke langit

Saat bensin terbakar, setiap atom karbon bergabung dengan dua atom oksigen dari udara. Karena 12 g C menjadi 44 g CO_2, gas yang keluar dari knalpot **lebih berat** daripada bensin yang terbakar! Satu liter bensin (±0,74 kg, ±85% karbon) menghasilkan ±2,3 kg CO_2; satu kilogram LPG (campuran propana dan butana) menghasilkan ±3,0 kg CO_2.

RUMUS HIDUP

Jejak karbon pembakaran

$$m_{CO_2} = m_{bb} \times w_C \times \frac{44}{12}$$

Setiap 12 gram karbon dalam bahan bakar berubah menjadi 44 gram karbon dioksida. CO_2 lebih berat daripada bahan bakarnya karena 'meminjam' oksigen dari udara.

- m_{bb} Massa bahan bakar kg
- w_C Fraksi massa karbon
- m_{CO_2} CO_2 yang dihasilkan kg

CO_2 YANG DIHASILKAN

2,29

kg

1 liter bensin ≈ 2,3 kg CO_2

CO_2 yang keluar lebih dari 3 kali massa bahan bakarnya!

0,74 kg bahan bakar berkadar karbon **84,5** % → **2,29** kg CO_2, kira-kira **1,25** m^3 gas pada suhu kamar.

Cek satuan: kg × (tanpa satuan) × (g CO_2 / g C) = kg CO_2 ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-JEJAK-KARBON-BB

CONTOH

Knalpot motor Bima

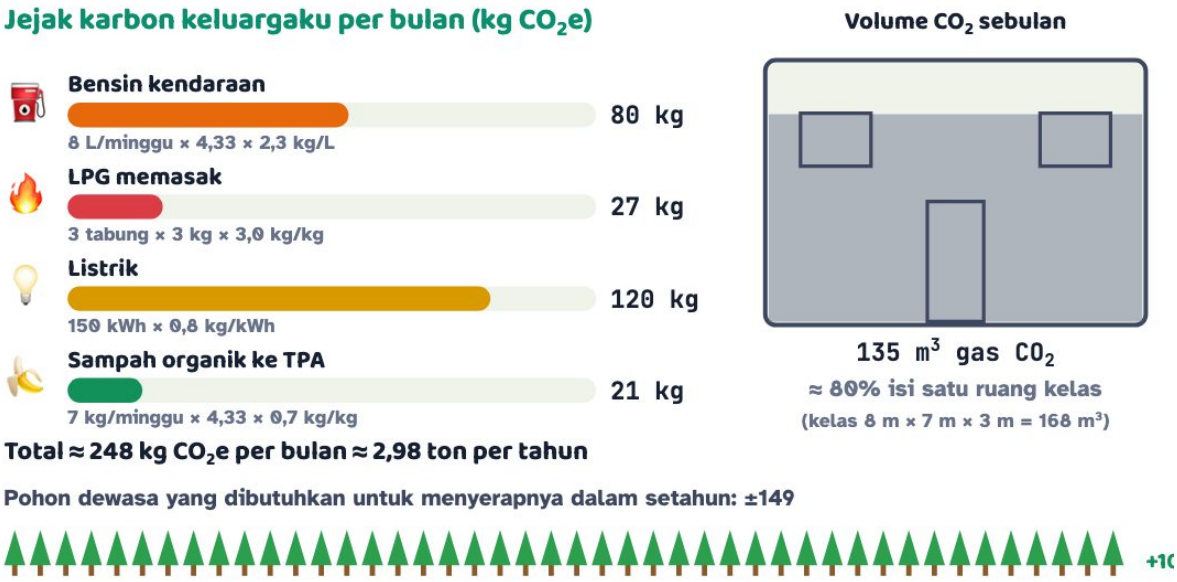
Motor keluarga Bima menghabiskan 6 L bensin setiap minggu. Berapa kg CO_2 yang dilepaskan dalam seminggu dan dalam setahun (52 minggu)? Pakai 2,3 kg CO_2 per liter.

1. Seminggu: 6 L × 2,3 kg/L = 13,8 kg CO_2.
2. Setahun: 13,8 kg × 52 = 717,6 kg CO_2.
3. Pada suhu kamar, 1 kg CO_2 bervolume ±0,55 m^3, jadi 717,6 kg ≈ 390 m^3 gas.

±13,8 kg per minggu, ±0,72 ton per tahun: gas sebanyak itu cukup untuk memenuhi lebih dari dua ruang kelas!

LAB MINI **Kalkulator Jejak Karbon Keluargaku**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-38



Total per bulan	Total per tahun	Per orang per tahun	Pohon penyerap (±20 kg/tahun)
248 kg CO_2e	2,98 ton CO_2e	0,74 ton	149 pohon

Masukkan perkiraan pemakaian di rumahmu. Sumber mana yang paling besar? Coba nyalakan "kompos/bank sampah" dan kurangi bensin 2 L per minggu: berapa pohon yang "terselamatkan"? Faktor emisi: bensin 2,3 kg/L; LPG 3,0 kg/kg; listrik ±0,8 kg/kWh (rata-rata jaringan listrik Indonesia, berbeda per daerah); sampah organik di TPA ±0,7 kg CO_2e/kg (perkiraan kasar).

ADU CEPAT **Bensin → CO_2**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-38

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Kalikan volume dengan 2,3. Contoh: 10 L → 23 kg.

38.4 Lapisan ozon & CFC

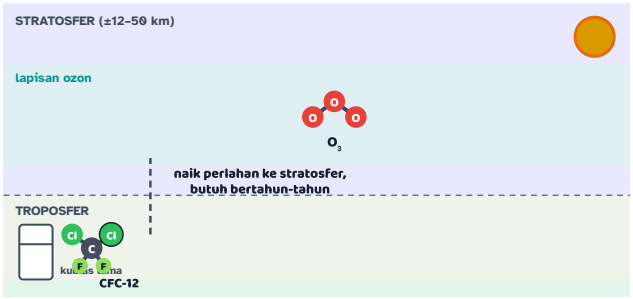
Ozon, O_3, punya dua wajah. Di dekat hidung kita ia polutan yang memedihkan mata. Tetapi 15–35 km di atas kepala, ozon membentuk perisai yang menyerap sebagian besar sinar **UV-B** dan hampir semua **UV-C** dari matahari. Tanpa perisai itu, kanker kulit, katarak, dan kerusakan tanaman akan jauh lebih banyak.

Lapisan ozon terus dibuat dan diurai oleh sinar UV dalam **siklus Chapman**:

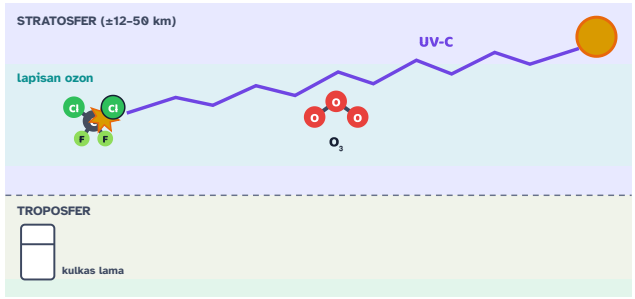
$$O_2 \xrightarrow{\text{UV}} 2\,O \qquad O + O_2 \longrightarrow O_3 \qquad O_3 \xrightarrow{\text{UV}} O_2 + O$$

Ozonnya sebenarnya sangat sedikit. Bila semua ozon di atas kepalamu dikumpulkan pada 0 °C dan 1 atm, tebalnya hanya ±3 mm, setebal dua keping koin. Ketebalan ini diukur dalam **Dobson Unit** (DU): 100 DU = 1 mm, jadi 300 DU = 3 mm. Wilayah dengan ozon di bawah 220 DU disebut **lubang ozon**.

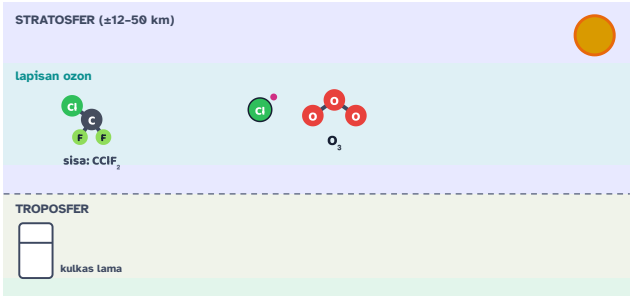
Lalu datanglah **CFC** (klorofluorokarbon), misalnya freon-12, CCl_2F_2. Ia tidak beracun, tidak mudah terbakar, dan sangat stabil, sehingga dulu menjadi bahan pendingin kulkas dan AC serta pendorong semprotan. Justru karena stabil, CFC tidak terurai di troposfer dan perlahan naik sampai ke stratosfer, tempat sinar UV-C akhirnya memecahnya.



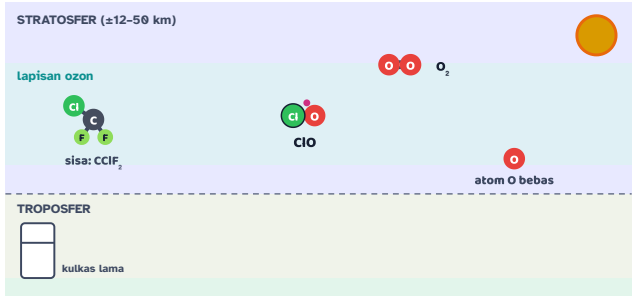
Langkah 1. CFC seperti CCl_2F_2 (freon-12) bocor dari kulkas, AC, dan semprotan lama. Di troposfer ia sangat stabil: tidak larut dalam hujan dan tidak bereaksi, sehingga perlahan naik ke stratosfer.



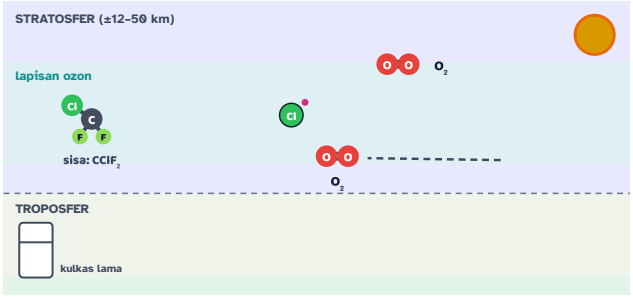
Langkah 2. Di stratosfer, sinar UV-C berenergi tinggi memutus ikatan C–Cl: $CCl_2F_2 \xrightarrow{UV} CClF_2 + Cl$. Lahirlah **radikal klorin** (Cl•) yang punya satu elektron tak berpasangan (titik magenta).



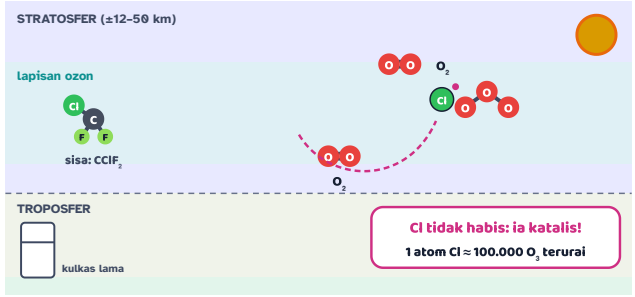
Langkah 3. Radikal Cl sangat reaktif dan langsung mencari pasangan. Di dekatnya ada sebuah molekul ozon, O_3.



Langkah 4. $Cl + O_3 \longrightarrow ClO + O_2$. Satu ozon hancur menjadi oksigen biasa dan klorin monoksida (ClO).



Langkah 5. ClO bertemu atom O bebas (hasil penguraian O_3 dan O_2 oleh UV): $ClO + O \longrightarrow Cl + O_2$. Atom Cl lepas lagi, utuh!



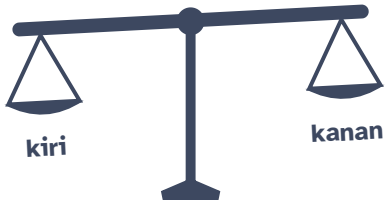
Langkah 6. Cl kembali menyerang ozon berikutnya. Reaksi bersihnya $O_3 + O \longrightarrow 2\,O_2$, dan Cl adalah **katalis**. Satu atom Cl dapat menguraikan sekitar 100.000 molekul ozon sebelum terkunci dalam senyawa "gudang" seperti HCl.

PENYETARA REAKSI **Setarakan reaksi ozon, CFC, dan "gudang" klorin**



O_2 → O

Unsur	Kiri	Kanan	
O	2 ●●	1 ●	✕



Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

Petunjuk | Ulang | Persamaan berikutnya ▶ Persamaan 1 dari 8 null

Dua persamaan pertama adalah pembentukan atom O dan penguraian ozon secara keseluruhan. Lalu CFC melepas Cl, Cl "disimpan" dalam HCl dan $ClONO_2$, dan di awan stratosfer kutub keduanya dilepas lagi sebagai Cl_2. Mengapa $Cl + O_3 \longrightarrow ClO + O_2$ tidak ada di sini? Karena atom O muncul di tiga zat, persamaan itu bisa "setara" dengan banyak cara (misalnya Cl + $3O_3$ → ClO + $4O_2$). Koefisien yang benar ditentukan oleh mekanismenya: satu tumbukan antara satu Cl dan satu O_3.

TRIK KAK TIRTA

"Ozon: **baik di atas, buruk di bawah**." Di stratosfer ia payung UV; di jalan raya ia polutan. Dan ingat, klorin dari CFC itu seperti pemain **Pac-Man**: memakan ozon satu per satu tanpa pernah kenyang, karena ia selalu keluar utuh di akhir setiap putaran.

AWAS JEBAKAN

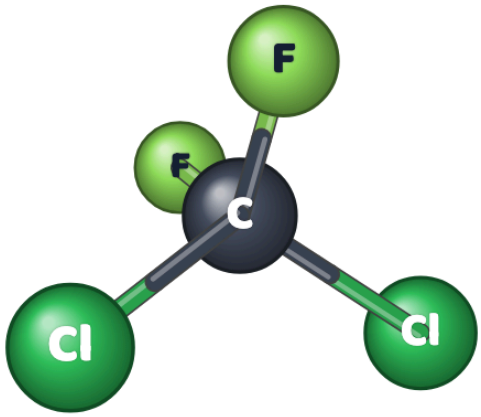
Lubang ozon bukan penyebab utama pemanasan global. Lubang ozon membiarkan lebih banyak **UV** masuk (bahaya bagi kulit dan mata), sedangkan pemanasan global terjadi karena gas rumah kaca menahan **inframerah**. Kaitan keduanya ada pada CFC: selain merusak ozon, CFC juga gas rumah kaca yang sangat kuat.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1974, **Mario Molina** dan **F. Sherwood Rowland** memperingatkan bahwa klorin dari CFC dapat merusak ozon. Banyak yang tidak percaya, sampai 1985 tim British Antarctic Survey (**Joseph Farman** dan rekan-rekan) melaporkan "lubang" ozon di atas Antartika setiap musim semi. Dunia bergerak cepat: **Protokol Montreal** ditandatangani pada 16 September 1987 (kini diperingati sebagai Hari Ozon Internasional) dan menjadi perjanjian lingkungan pertama yang diratifikasi semua negara anggota PBB. Molina, Rowland, dan Paul Crutzen menerima Nobel Kimia 1995. Ozon kini pulih perlahan dan diperkirakan kembali ke tingkat 1980 di atas Antartika sekitar tahun 2066.

MOLEKUL 3D

CFC dan penggantinya di kulkas



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Freon-12 (CCl_2F_2) CCl_2F_2

Mr ≈ 120,91 · PubChem ↗

CFC pendingin kulkas lama yang merusak ozon; dilarang oleh Protokol Montreal.

Ketuk C dan Cl pada freon-12 lalu ukur panjang ikatannya, bandingkan dengan C–F. Ikatan C–Cl lebih panjang dan lebih lemah, jadi itulah yang putus oleh UV. Isobutana (R-600a) dan propana (R-290) kini dipakai di banyak kulkas dan AC baru: tanpa klorin, ramah ozon, dan GWP-nya rendah, tetapi mudah terbakar sehingga harus ditangani teknisi terlatih.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA LUBANGNYA DI ANTARTIKA?

Sebagian besar klorin di stratosfer "tidur" dalam senyawa gudang yang tidak merusak, yaitu HCl dan $ClONO_2$. Di musim dingin kutub selatan (di bawah ±−78 °C), terbentuk **awan stratosfer kutub**. Pada permukaan kristal es awan itu terjadi reaksi heterogen $HCl + ClONO_2 \longrightarrow Cl_2 + HNO_3$. Gas Cl_2 menumpuk dalam gelap. Begitu matahari muncul di musim semi (September–Oktober), $Cl_2 \xrightarrow{\text{cahaya}} 2\,Cl$ melepaskan banyak radikal sekaligus, dan ozon runtuh dalam beberapa minggu. Inilah contoh katalisis heterogen yang paling berdampak di planet kita.

Indonesia meratifikasi Protokol Montreal pada 1992 dan telah menghentikan impor dan pemakaian CFC. Pengganti awalnya, HCFC, masih mengandung sedikit klorin dan sedang dikurangi bertahap. Pengganti berikutnya, HFC, aman bagi ozon tetapi merupakan gas rumah kaca kuat, sehingga kini juga dibatasi. Pelajaran pentingnya: setiap zat pengganti harus dinilai dari **semua** dampaknya.

38.5 Air: kesadahan, BOD/COD, logam berat & PDAM

Tebak Dulu!

Segelas air sumur tampak sangat jernih, sejuk, dan tidak berbau. Apakah air itu pasti aman diminum langsung?

- Ya, air yang jernih berarti bersih.
- Ya, asalkan rasanya tawar.
- Belum tentu: bakteri, nitrat, dan logam berat tidak terlihat dan tidak berbau.
- Ya, asalkan diambil pagi hari.

Jawabannya: belum tentu. Bakteri E. coli dari septic tank yang terlalu dekat, nitrat dari pupuk, serta ion merkuri, timbal, atau arsen dapat larut sempurna tanpa mengubah warna, bau, atau rasa. Kejernihan hanya menunjukkan sedikitnya partikel tersuspensi. Keamanan air harus dibuktikan dengan uji laboratorium.

Air adalah pelarut yang sangat hebat. Itu kabar baik bagi kehidupan, tetapi juga berarti air hampir tidak pernah murni. Kimiawan lingkungan memeriksa air dari beberapa sisi: ion yang terlarut (kesadahan, logam berat), zat organik yang menghabiskan oksigen (BOD/COD), dan kuman.

Bahasa sederhana · Pernahkah kamu melihat kerak putih di dasar panci atau ketel? Itu "batu" kecil yang tadinya larut dalam air, lalu mengendap saat airnya dididihkan. Air yang banyak mengandung zat kapur seperti itu disebut air sadah. Di air sadah, sabun sulit berbusa.

Kesadahan

DEFINISI · KESADAHAN AIR

Kesadahan disebabkan oleh ion $\mathrm{Ca^{2+}}$ dan $\mathrm{Mg^{2+}}$ terlarut. **Kesadahan sementara** berasal dari garam hidrogen karbonat dan hilang bila air dididihkan. **Kesadahan tetap** berasal dari garam sulfat dan klorida, dan tidak hilang dengan pendidihan. Kesadahan biasanya dinyatakan dalam mg/L $\mathrm{CaCO_3}$.

Air hujan yang sedikit asam melarutkan batu kapur di daerah karst seperti Gunung Sewu: $\mathrm{CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca(HCO_3)_2}$. Saat air itu dididihkan, reaksinya berbalik dan meninggalkan kerak: $\mathrm{Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2}$. Di dalam air sadah, sabun (garam natrium asam lemak) bereaksi dengan ion kalsium membentuk endapan lengket, sehingga busanya sedikit:

$$2\,C_{17}H_{35}COO^- + Ca^{2+} \longrightarrow (C_{17}H_{35}COO)_2Ca\downarrow$$

Kesadahan (mg/L $CaCO_3$)	Golongan	Tanda di rumah
0–60	lunak	sabun mudah berbusa (air hujan, sebagian air sungai)
61–120	sedang	kerak tipis setelah lama
121–180	sadah	kerak putih di ketel, busa sabun berkurang
> 180	sangat sadah	kerak tebal, kain terasa kaku, pipa tersumbat (sering di daerah kapur)

Air sadah bisa dilunakkan dengan pendidihan (hanya kesadahan sementara), penambahan soda abu Na_2CO_3 yang mengendapkan $CaCO_3$, atau **resin penukar ion** yang menukar Ca^{2+} dengan Na^+. Konsentrasi ion di air sering berpindah antara tiga satuan: ppm, mg/L, dan mol/L.

RUMUS HIDUP

ppm, mg/L, dan mol/L di air

$$c = \frac{\text{ppm}}{1000 \times M_r}$$

Di air yang encer, 1 ppm sama dengan 1 mg per liter. Bagi miligram dengan 1000 untuk mendapat gram, lalu bagi dengan massa molar untuk mendapat mol per liter.

ppm Kadar (≈ mg/L) ppm

M_r Massa molar zat g/mol

c Konsentrasi mol/L

KONSENTRASI

0,001

mol/L

100 ppm ≈ **100** mg/L = **1** mmol/L = **0,001** mol/L.

Cek satuan: (mg/L) ÷ (1000 mg/g) ÷ (g/mol) = mol/L ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-AIR-PPM-MOLAR

BOD dan COD: seberapa "lapar oksigen" air itu?

Ikan bernapas dengan oksigen terlarut (**DO**, *dissolved oxygen*). Air jenuh pada 25 °C hanya melarutkan ±8 mg/L oksigen, jauh lebih sedikit daripada udara. Bila limbah organik (sisa makanan, tinja, limbah pabrik tahu dan tapioka) masuk ke sungai, bakteri menguraikannya sambil menghabiskan oksigen itu. Sungai menjadi hitam, berbau, dan ikan mati.

DEFINISI · BOD DAN COD

BOD (*biochemical oxygen demand*) adalah massa oksigen (mg/L) yang dihabiskan mikroba untuk menguraikan zat organik dalam sampel selama 5 hari pada 20 °C. **COD** (*chemical oxygen demand*) adalah oksigen yang setara dengan oksidator kuat (kalium dikromat dalam asam) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi hampir semua zat organik. COD selalu ≥ BOD. Makin besar keduanya, makin tercemar airnya.

KERJAKAN BERSAMA

Mengukur BOD limbah pabrik tahu

Sebanyak 10 mL limbah cair pabrik tahu diencerkan menjadi 300 mL dengan air jenuh oksigen. DO awal 8,4 mg/L. Setelah 5 hari dalam gelap pada 20 °C, DO tinggal 3,6 mg/L. Hitung BOD_5 limbah itu.

1. Oksigen yang terpakai dalam botol: 8,4 – 3,6 = 4,8 mg/L.
2. Sampel hanya 10/300 bagian isi botol, jadi faktor pengenceran = 300/10 = 30.
3. BOD_5 = 4,8 × 30 = 144 mg/L.

BOD_5 = 144 mg/L, hampir 50 kali batas sungai kelas I (BOD ≤ 2 mg/L). Limbah tahu harus diolah dulu, misalnya di kolam anaerob yang sekaligus menghasilkan biogas.

Logam berat: merkuri di tambang emas rakyat

Di banyak tambang emas skala kecil, bijih yang digiling dicampur **merkuri**. Merkuri cair melarutkan butiran **Au** membentuk **amalgam**. Amalgam itu lalu dipanaskan: merkuri menguap dan emas tertinggal. Uap merkuri terhirup oleh penambang dan keluarganya, sedangkan sisanya jatuh ke sungai. Di dasar sungai, bakteri mengubahnya menjadi **metilmerkuri** yang terakumulasi di ikan, makin pekat di setiap tingkat rantai makanan (**biomagnifikasi**), lalu sampai ke piring kita.

⚠ **KESELAMATAN · MERKURI**

Merkuri (raksa) beracun bagi saraf, ginjal, dan janin, serta berbahaya bagi lingkungan perairan. Jangan pernah memegang, memanaskan, atau menyimpan merkuri di rumah. Bila termometer raksa pecah, jauhkan anak-anak, buka jendela, jangan menyapu dengan sapu atau menyedot dengan penyedot debu, dan minta orang dewasa menghubungi petugas kesehatan atau lingkungan setempat.



Toksik akut



Bahaya kesehatan



Bahaya lingkungan

KIMIA NUSANTARA · DARI MINAMATA KE CITARUM

Pada 1950-an, warga Teluk Minamata (Jepang) lumpuh dan banyak bayi lahir cacat karena makan ikan yang tercemar metilmerkuri dari limbah pabrik. Namanya kini diabadikan dalam **Konvensi Minamata tentang Merkuri** (2013), yang diratifikasi Indonesia melalui **UU No. 11 Tahun 2017** untuk menghapus merkuri, termasuk di tambang emas rakyat. Di Jawa Barat, Sungai Citarum pernah dijuluki salah satu sungai paling tercemar di dunia karena limbah industri, limbah rumah tangga, dan sampah. Sejak 2018 program pemulihan besar-besaran berjalan, dan BOD, COD, serta logam beratnya dipantau secara rutin.

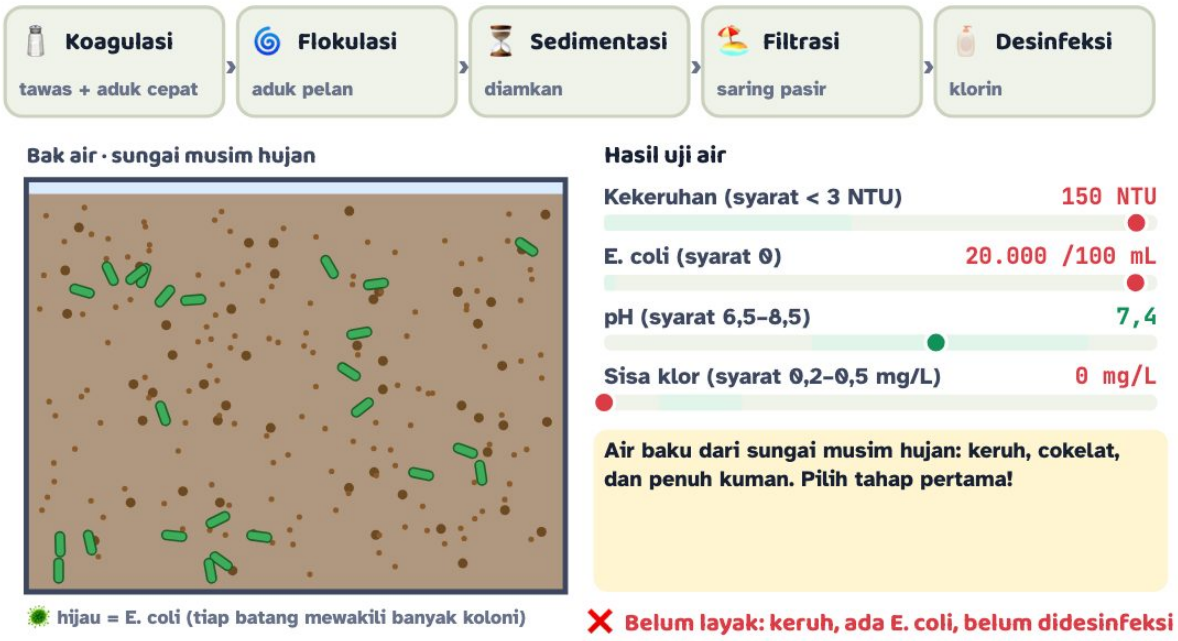
Dari sungai ke keran: pengolahan air PDAM

Air sungai yang keruh berisi butir lumpur kasar dan partikel **koloid** lempung yang sangat halus. Partikel koloid bermuatan negatif sehingga saling tolak dan tidak mau mengendap (Bab 25). PDAM mengolahnya melalui lima tahap utama:

Tahap	Apa yang terjadi	Kimia di baliknya
1. Koagulasi	tawas ditambahkan sambil diaduk cepat	$\mathrm{Al_2(SO_4)_3 + 3\,Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2\,Al(OH)_3 + 3\,CaSO_4 + 6\,CO_2}$; ion $\mathrm{Al^{3+}}$ menetralkan muatan koloid
2. Flokulasi	diaduk pelan beberapa menit	partikel netral dan $\mathrm{Al(OH)_3}$ bergabung menjadi gumpalan besar (flok)
3. Sedimentasi	air didiamkan di bak pengendap	flok yang berat mengendap; lumpurnya dibuang
4. Filtrasi	air dialirkan melalui lapisan pasir dan kerikil	sisa flok halus dan sebagian kuman tertahan
5. Desinfeksi	klorin atau kaporit ditambahkan	$\mathrm{Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HOCl + HCl}$; asam hipoklorit membunuh kuman; sisa klor melindungi air di pipa

LAB MINI **Instalasi Pengolahan Air PDAM**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-38



Kekeruhan	E. coli	pH	Sisa klor	Urutanmu
150 NTU	20.000 koloni/100 mL	7,4	0 mg/L	(belum ada)

Status
✗ Belum layak: keruh, ada E. coli, belum didesinfeksi

Kamu operator PDAM! Pilih sumber air, atur dosis tawas dan klorin, lalu jalankan tahap demi tahap dengan tombol di bawah. Urutan bebas, jadi coba juga urutan yang "salah": apa yang terjadi bila klorin diberikan pertama, atau air disaring tanpa tawas? Targetnya memenuhi syarat air minum: kekeruhan < 3 NTU, tanpa E. coli, pH 6,5–8,5, dan sisa klor 0,2–0,5 mg/L.

Mengapa klorin diberikan paling akhir? Bila diberikan pada air yang masih kaya zat organik, klorin habis bereaksi dan membentuk produk samping seperti kloroform (golongan *trihalometana*), sementara kuman yang bersembunyi di balik partikel lumpur tetap selamat. Itulah sebabnya kekeruhan diturunkan dulu, baru air didesinfeksi.

38.6 Kimia hijau: merancang tanpa limbah

Selama puluhan tahun, cara menangani pencemaran adalah "buang dulu, bersihkan kemudian". Hasilnya mahal dan sering terlambat. Kimia hijau membalik cara berpikir itu: **rancang reaksinya supaya limbah tidak pernah terbentuk**.

DEFINISI · KIMIA HIJAU

Kimia hijau adalah perancangan produk dan proses kimia yang mengurangi atau menghilangkan pemakaian dan pembentukan zat berbahaya, sejak tahap rancangan sampai produk dibuang. Gagasan ini dirumuskan oleh **Paul Anastas** dan **John Warner** dalam 12 prinsip (1998).

PRINSIP · 12 PRINSIP KIMIA HIJAU

No.	Prinsip	Contoh
1	**Pencegahan**: mencegah limbah lebih baik daripada mengolahnya	memilah sampah sejak di rumah; proses pabrik tanpa produk samping
2	**Ekonomi atom**: sebanyak mungkin atom pereaksi masuk ke produk	adisi etena + air → etanol (100%)
3	**Sintesis yang kurang berbahaya**	H_2O_2 sebagai oksidator pengganti senyawa krom(VI)
4	**Produk yang lebih aman**: tetap berfungsi, kurang beracun	insektisida yang lebih selektif dan cepat terurai
5	**Pelarut dan bahan bantu yang lebih aman**	air atau CO_2 superkritis untuk melepas kafein dari kopi
6	**Hemat energi**: reaksi pada suhu dan tekanan kamar	enzim dan fermentasi tempe yang bekerja pada suhu kamar
7	**Bahan baku terbarukan**	bioetanol dari tetes tebu; plastik dari pati singkong
8	**Kurangi turunan** (gugus pelindung dan langkah tambahan)	enzim yang selektif sehingga tak perlu melindungi gugus lain
9	**Katalis** lebih baik daripada pereaksi stoikiometris	konverter katalitik, zeolit di kilang minyak, enzim dalam deterjen
10	**Dirancang untuk terurai** setelah dipakai	deterjen rantai lurus (LAS) yang mudah diurai bakteri
11	**Analisis waktu nyata** untuk mencegah pencemaran	sensor yang memantau reaksi pabrik setiap detik
12	**Kimia yang aman dari kecelakaan**	tidak menyimpan gas beracun dalam jumlah besar (pelajaran tragedi Bhopal 1984)

Ekonomi atom

Rendemen (Bab 18) bertanya "berapa banyak produk yang benar-benar kudapat?". **Ekonomi atom** bertanya hal yang lebih mendasar: "kalau reaksinya sempurna sekalipun, berapa persen atom pereaksi yang berakhir di produk

yang kuinginkan?" Karena massa kekal, massa semua pereaksi sama dengan massa produk utama ditambah produk samping.

RUMUS HIDUP **Ekonomi atom: berapa atom yang 'pulang' ke produk?**

$$\%\,\mathrm{EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{produk}} + M_{\text{samping}}} \times 100\%$$

Massa semua pereaksi sama dengan massa produk utama ditambah produk samping. Makin kecil produk sampingnya, makin hijau reaksinya.

M_{produk} Massa molar produk yang diinginkan (× koefisien) g/mol

M_{samping} Massa molar semua produk samping (× koefisien) g/mol

$\%\,\mathrm{EA}$ Ekonomi atom %

EKONOMI ATOM

51,1

%

fermentasi tapai: glukosa → 2 etanol + 2 CO_2

Dari setiap 100 kg pereaksi, **51,1** kg menjadi produk dan **48,889** kg menjadi produk samping.

Cek satuan: (g/mol) ÷ (g/mol) × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-HIJAU-EKONOMI-ATOM

KERJAKAN BERSAMA

Etanol: fermentasi atau adisi?

Etanol dapat dibuat dengan dua cara. (1) Fermentasi glukosa (seperti tapai): $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\,C_2H_5OH + 2\,CO_2$**. (2) Adisi air pada etena:** $C_2H_4 + H_2O \longrightarrow C_2H_5OH$**. Bandingkan ekonomi atom keduanya. (Ar C = 12, H = 1, O = 16)**

1. Mr glukosa = 180; Mr etanol = 46; produk yang diinginkan pada cara (1) = 2 × 46 = 92.
2. Cara (1): % EA = 92/180 × 100% = 51,1%. Hampir separuh massa lepas sebagai CO_2.
3. Cara (2): Mr pereaksi = 28 + 18 = 46 = Mr produk, jadi % EA = 100%.

Adisi etena: 100%; fermentasi: 51,1%. Tetapi ekonomi atom bukan satu-satunya ukuran: etena berasal dari minyak bumi (tak terbarukan), sedangkan glukosa dari tebu atau singkong (terbarukan, prinsip 7). Kimiawan hijau menimbang semua prinsip sekaligus.

Contoh terkenal datang dari pabrik obat. Ibuprofen dulu dibuat dalam enam tahap dengan ekonomi atom ±40%: lebih dari separuh massa bahan berakhir sebagai limbah. Proses BHC (1990-an) memakai katalis sehingga cukup tiga tahap, dengan ekonomi atom ±77%. Produk sampingnya, asam asetat, bahkan bisa dimanfaatkan kembali sehingga hampir tidak ada atom yang terbuang.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

FAKTOR E: MENIMBANG LIMBAH YANG SEBENARNYA

Ekonomi atom dihitung dari persamaan di atas kertas. Roger Sheldon mengusulkan ukuran yang lebih jujur, **faktor E** = massa total limbah ÷ massa produk, termasuk pelarut, pereaksi berlebih, dan rendemen yang tidak sempurna. Industri minyak bumi memiliki faktor E < 0,1, bahan kimia curah ±1–5, bahan kimia halus ±5–50, dan farmasi ±25–100 atau lebih. Pelarut biasanya penyumbang limbah terbesar, itulah sebabnya prinsip 5 sangat penting.

Pelarut dan katalis hijau. Air adalah pelarut paling aman. CO_2 **superkritis** (di atas 31 °C dan 73 atm) melarutkan kafein dari biji kopi tanpa meninggalkan sisa pelarut beracun. Katalis seperti enzim bekerja pada suhu tubuh dan sangat selektif, sehingga menghemat energi sekaligus mencegah produk samping.

Ekonomi sirkular dan bank sampah. Dalam ekonomi linear, barang dibuat, dipakai, lalu dibuang. Dalam **ekonomi sirkular**, bahan dijaga tetap beredar: botol PET dicacah menjadi serat kain, kertas didaur ulang, sisa dapur menjadi kompos. Di banyak kampung, **bank sampah** mengajak warga menabung sampah yang sudah dipilah dan mendapat uang. Pemilahan sejak di rumah adalah prinsip pertama kimia hijau yang bisa kamu lakukan hari ini.

MITOS

"Lubang ozon adalah penyebab utama pemanasan global."

FAKTA

Keduanya masalah berbeda. Lubang ozon meloloskan lebih banyak **UV**; pemanasan global berasal dari gas rumah kaca yang menahan **inframerah**. CFC hanya kebetulan terlibat di keduanya.

MITOS

"Air yang jernih pasti aman diminum."

FAKTA

Kuman, nitrat, dan logam berat larut tanpa warna dan bau. Merebus membunuh kuman, tetapi **tidak** menghilangkan merkuri atau timbal. Hanya uji laboratorium yang bisa memastikan.

MITOS

"Hujan asam bisa melepuhkan kulit."

FAKTA

Hujan asam umumnya ber-pH 4–5, sekitar keasaman jus tomat. Bahayanya bekerja perlahan: mengasamkan danau, mencuci hara tanah hutan, dan mengikis bangunan selama bertahun-tahun.

MITOS

"Efek rumah kaca itu jahat dan harus dihilangkan."

FAKTA

Tanpa efek rumah kaca alami, Bumi rata-rata –18 °C dan lautan membeku. Yang berbahaya adalah **penambahan** gas rumah kaca oleh manusia yang terjadi sangat cepat.

Kimia di sekitarmu

ISPU di ponsel

Saat musim kemarau dan kebakaran lahan, cek ISPU sebelum berolahraga di luar. Angka di atas 100 adalah sinyal bagi anak dan penderita asma untuk berlindung.

Konverter katalitik

Di dalam knalpot mobil, logam platina, paladium, dan rodium mengubah gas beracun: $2\,CO + 2\,NO \longrightarrow 2\,CO_2 + N_2$.

Sawah hemat metana

Mengairi sawah secara berselang memberi oksigen ke tanah sehingga mikroba metanogen bekerja lebih sedikit, sementara panen tetap terjaga.

Bank sampah

Botol PET, kardus, dan kaleng yang dipilah bisa ditabung dan didaur ulang. Sampah organik yang dikompos tidak membusuk menjadi metana di TPA.

Kulkas tanpa CFC

Label R-600a pada kulkas berarti pendinginnya isobutana: ramah ozon dan rendah GWP. Perbaikan kulkas tetap harus oleh teknisi karena gasnya mudah terbakar.

Bau kaporit PDAM

Bau samar dari air keran berasal dari sisa klor yang menjaga air tetap bebas kuman selama mengalir di pipa sampai ke rumahmu.

Cek Cepat

Gas manakah yang terutama menyebabkan hujan asam?

- CO_2
- CH_4
- SO_2
- N_2

Apa fungsi tawas dalam pengolahan air PDAM?

- Menggumpalkan partikel koloid agar mudah mengendap
- Membunuh bakteri
- Menaikkan pH air
- Menghilangkan kesadahan

Berapa ekonomi atom reaksi $C_2H_4 + H_2O \longrightarrow C_2H_5OH$?

- 25%
- 50%
- 72%
- 100%

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: seberapa asam hujan di kampungku?

Bahan: seperempat kubis ungu, air panas, saringan teh, 4 gelas bening, wadah bersih untuk menampung hujan (mangkuk kaca atau plastik), cuka dapur, soda kue, air minum kemasan, sendok, kertas putih.

1. Bersama orang dewasa, iris kubis ungu, rendam dalam air panas ±10 menit, lalu saring. Cairan ungu itu indikator pH alami.
2. Saat hujan, letakkan wadah bersih di tempat terbuka, jauh dari atap dan pohon. Buang 5 menit pertama hujan, lalu tampung ±50 mL.
3. Siapkan gelas pembanding: air minum kemasan (±netral), air + sedikit cuka (asam), air + sejumput soda kue (basa). Tambahkan 1 sendok indikator ke setiap gelas.
4. Tambahkan 1 sendok indikator ke air hujan. Bandingkan warnanya di atas kertas putih: merah muda berarti asam, ungu mendekati netral, biru-hijau berarti basa.
5. Ulangi pada beberapa hari hujan dan catat warnanya. Bonus: catat semua sampah plastik keluargamu selama seminggu dan pilah untuk bank sampah.

Keselamatan: air panas dan pisau hanya ditangani orang dewasa. Jangan meminum air hujan atau mencicipi larutan apa pun. Jangan menampung hujan saat ada petir; tunggu sampai aman. Cuci tangan dan semua gelas setelah selesai, lalu buang larutan ke saluran pembuangan.

Pertanyaan: Apakah air hujanmu lebih asam daripada air minum kemasan? Mengapa hujan pertama setelah kemarau panjang sering lebih asam daripada hujan berikutnya?

RINGKASAN KILAT **Bab 38 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan sumber dan dampak **polutan udara** (CO, NO_x, SO_2, $PM_{2,5}$, ozon permukaan) dan membaca **ISPU**

- menuliskan reaksi pembentukan **hujan asam** dan **perusakan ozon** oleh CFC, lalu membedakan keduanya dari **efek rumah kaca**
- menghitung **jejak karbon** pembakaran serta mengonversi ppm, mg/L, mol/L, dan µg/m³
- menjelaskan **kesadahan**, **BOD/COD**, bahaya **merkuri**, dan tahap pengolahan air di **PDAM**
- menerapkan **12 prinsip kimia hijau** dan menghitung **ekonomi atom** suatu reaksi

🔑 Istilah kunci

troposfer · stratosfer · Polutan udara · Polutan primer · Polutan sekunder · Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) · Hujan asam · scrubber · konverter katalitik · Gas rumah kaca · Potensi pemanasan global (GWP) · CO2-ekuivalen · kurva Keeling · siklus Chapman · Dobson Unit · lubang ozon

🧮 Rumus penting

$$c = \frac{\text{ppm} \times M_r \times 1000}{24{,}45}$$

Dari ppm ke µg/m³ (gas di udara). Satu ppm berarti satu mililiter gas di setiap meter kubik udara. Ubah mililiter itu menjadi mol, lalu menjadi mikrogram.

$$m_{CO_2} = m_{\text{bb}} \times w_{\text{C}} \times \frac{44}{12}$$

Jejak karbon pembakaran. Setiap 12 gram karbon dalam bahan bakar berubah menjadi 44 gram karbon dioksida. CO_2 lebih berat daripada bahan bakarnya karena 'meminjam' oksigen dari udara.

$$c = \frac{\text{ppm}}{1000 \times M_r}$$

ppm, mg/L, dan mol/L di air. Di air yang encer, 1 ppm sama dengan 1 mg per liter. Bagi miligram dengan 1000 untuk mendapat gram, lalu bagi dengan massa molar untuk mendapat mol per liter.

$$\%\,\text{EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{produk}} + M_{\text{samping}}} \times 100\%$$

Ekonomi atom: berapa atom yang 'pulang' ke produk?. Massa semua pereaksi sama dengan massa produk utama ditambah produk samping. Makin kecil produk sampingnya, makin hijau reaksinya.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Udara yang tampak bersih belum tentu sehat, dan masker apa pun belum tentu melindungi.
- Satu hari yang dingin atau satu musim hujan yang basah tidak membantah pemanasan global.
- Lubang ozon bukan penyebab utama pemanasan global.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=38

Teka-teki untuk Bab 39

Detektif forensik menemukan serbuk putih misterius di sebuah meja. Bisa gula, bisa garam, bisa pula sesuatu yang berbahaya. Tanpa mencicipinya sedikit pun, bagaimana kimiawan bisa tahu zat apa itu, bahkan menentukan susunan atom-atomnya?

▼ **Intip petunjuk**

Setiap zat punya "sidik jari": warna nyala, reaksi dengan pereaksi tertentu, dan cara ia menyerap cahaya. Ingat getaran CO_2 yang menyerap inframerah di bab ini? Kimiawan memakai serapan seperti itu untuk mengenali gugus atom. Di Bab 39 kamu menjadi detektif molekul dengan uji kualitatif, spektrofotometri, IR, spektrometri massa, dan NMR.

39 Detektif Molekul: Analisis & Spektroskopi

Setiap zat meninggalkan sidik jari: warna nyala, endapan, gas, dan cara ia menyerap cahaya. Di bab terakhir ini kamu menjadi detektif yang mengungkap identitas zat, bahkan susunan atomnya, tanpa pernah mencicipinya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- mengidentifikasi **kation, anion, dan gas** dengan uji nyala, NaOH, amonia, perak nitrat, barium klorida, dan uji gas;
- menghitung kadar zat dengan **gravimetri** (menimbang endapan) dan **volumetri** (titrasi);
- memakai **hukum Beer–Lambert** dan kurva kalibrasi untuk menentukan konsentrasi larutan berwarna;
- membaca **spektrum IR**, **spektrum massa** (ion molekul, fragmen, pola isotop Cl dan Br), dan **^{1}H NMR** (pergeseran kimia, integrasi, aturan n+1);
- menggabungkan **IHD** dan semua bukti spektrum untuk **menentukan struktur** molekul.

TIGA BOTOL TANPA LABEL

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Serbuk A membuat nyala api berwarna kuning terang. Apakah sudah pasti serbuk itu garam dapur, NaCl?

- Ya, nyala kuning adalah tanda pasti natrium klorida.
- Belum. Nyala kuning hanya membuktikan ada ion natrium; anionnya harus diuji terpisah.
- Ya, karena hanya garam dapur yang berupa serbuk putih.
- Tidak, nyala kuning berarti ion kalium.

Jawabannya: belum pasti. Soda kue ($\mathrm{NaHCO_3}$), soda abu ($\mathrm{Na_2CO_3}$), natrium sulfat, bahkan pengawet natrium benzoat juga menyala kuning. Uji nyala hanya "menginterogasi" kationnya. Detektif yang baik selalu mencari saksi kedua: di sini, uji anion dengan perak nitrat yang memberi endapan putih untuk ion klorida.

39.1 Analisis kualitatif: nyala, endapan, dan gas

Kimiawan analitik bekerja seperti detektif. Mereka tidak menebak dari penampilan, tetapi mengumpulkan bukti dari reaksi yang **khas**: warna nyala yang unik, endapan berwarna, atau gas yang bisa dibuktikan. Satu bukti jarang cukup. Gabungan beberapa bukti barulah menjadi kesimpulan.

Bahasa sederhana · Bayangkan kamu mencari teman di lapangan yang ramai. Kaus merah saja belum cukup, karena banyak anak berkaus merah. Tetapi kaus merah, tas biru, *dan* topi kuning? Nah, itu pasti dia! Zat kimia dikenali dengan cara yang sama: beberapa ciri sekaligus.

DEFINISI · DUA PERTANYAAN DETEKTIF

Analisis kualitatif menjawab "zat **apa** ini?" dengan mengenali ion, gugus, atau senyawa dari reaksi dan sifat khasnya. **Analisis kuantitatif** menjawab "**berapa banyak**?" dengan mengukur massa, volume, atau intensitas cahaya untuk menghitung kadar atau konsentrasi.

Uji nyala: kation yang bercahaya

Kawat nikrom dibersihkan dengan asam klorida encer, dicelupkan ke serbuk garam, lalu dimasukkan ke nyala biru pembakar. Panas melempar elektron ion logam ke tingkat energi lebih tinggi. Saat elektron turun kembali, ia memancarkan cahaya dengan warna khas (ingat spektrum garis di Bab 5).

Ion logam	Warna nyala	Contoh di sekitarmu
Li Li^+	merah tua (krimson)	suar darurat, kembang api merah
Na Na^+	kuning-jingga terang	garam yang tumpah di kompor, lampu jalan natrium
K K^+	ungu muda (lila)	pupuk KCl; mudah tertutup kuning natrium
Ca Ca^{2+}	merah bata (jingga-merah)	kapur, cangkang telur
Cu Cu^{2+}	hijau kebiruan	kabel tembaga yang terbakar
Ba Ba^{2+}	hijau pucat (hijau apel)	kembang api hijau

Uji kation dengan NaOH dan amonia

Ion logam transisi dan beberapa ion lain membentuk **endapan hidroksida** berwarna ketika larutannya ditetesi natrium hidroksida atau amonia encer. Kuncinya: tambahkan **sedikit dulu**, amati, lalu tambahkan **berlebih** dan amati lagi. Perilaku "berlebih" sering menjadi pembeda paling tajam.

Kation	NaOH(aq) sedikit	NaOH(aq) berlebih	NH_3(aq) sedikit	NH_3(aq) berlebih
Al Al^{3+}	endapan putih	larut → larutan tak berwarna	endapan putih	tidak larut
Ca^{2+}	endapan putih	tidak larut	tidak ada endapan (atau sangat sedikit)	tidak ada endapan

Cr Cr^{3+}	endapan hijau	larut → larutan hijau	endapan hijau keabuan	tidak larut
Cu^{2+}	endapan biru muda	tidak larut	endapan biru muda	larut → larutan biru tua
Fe Fe^{2+}	endapan hijau	tidak larut	endapan hijau	tidak larut
Fe^{3+}	endapan cokelat kemerahan	tidak larut	endapan cokelat kemerahan	tidak larut
Zn Zn^{2+}	endapan putih	larut → larutan tak berwarna	endapan putih	larut → larutan tak berwarna
NH_4^+	tidak ada endapan; bila dihangatkan dengan NaOH keluar gas NH_3 berbau pesing yang membirukan lakmus merah basah			

Di tingkat partikel, ion OH^- "menangkap" ion logam menjadi padatan yang tak larut:

$$Cu^{2+}(aq) + 2\,OH^-(aq) \longrightarrow Cu(OH)_2(s) \qquad Fe^{3+}(ac$$

Amonium tidak mengendap. Ia "menyerahkan" protonnya kepada OH^- dan lepas sebagai gas: $NH_4^+(aq) + OH^-(aq) \longrightarrow NH_3(g) + H_2O(l)$.

TRIK KAK TIRTA · WARNA DULU, LALU "BERLEBIH"

Endapan berwarna langsung menunjuk tersangka: **biru muda** = Cu^{2+}, **hijau** = Fe^{2+}, **cokelat kemerahan** = Fe^{3+} (ingat: karat besi memang senyawa besi(III) yang cokelat kemerahan, dan besi(II) "masih hijau", belum berkarat). Kalau endapannya putih, uji berlebih: larut di NaOH dan di amonia = Zn ("Seng suka dua-duanya"); larut di NaOH saja = Al; tidak larut di NaOH dan hampir tak mengendap dengan amonia = Ca.

Uji anion

Anion	Cara uji	Hasil positif	Persamaan ion
CO_3^{2-}	tambah asam encer; gas dialirkan ke air kapur	berbuih; air kapur keruh	$CO_3^{2-} + 2\,H^+ \longrightarrow CO_2 + H_2O$
Cl Cl^-	asamkan dengan HNO_3 encer, lalu tetesi $AgNO_3$(aq)	endapan putih	$Ag^+ + Cl^- \longrightarrow AgCl\downarrow$

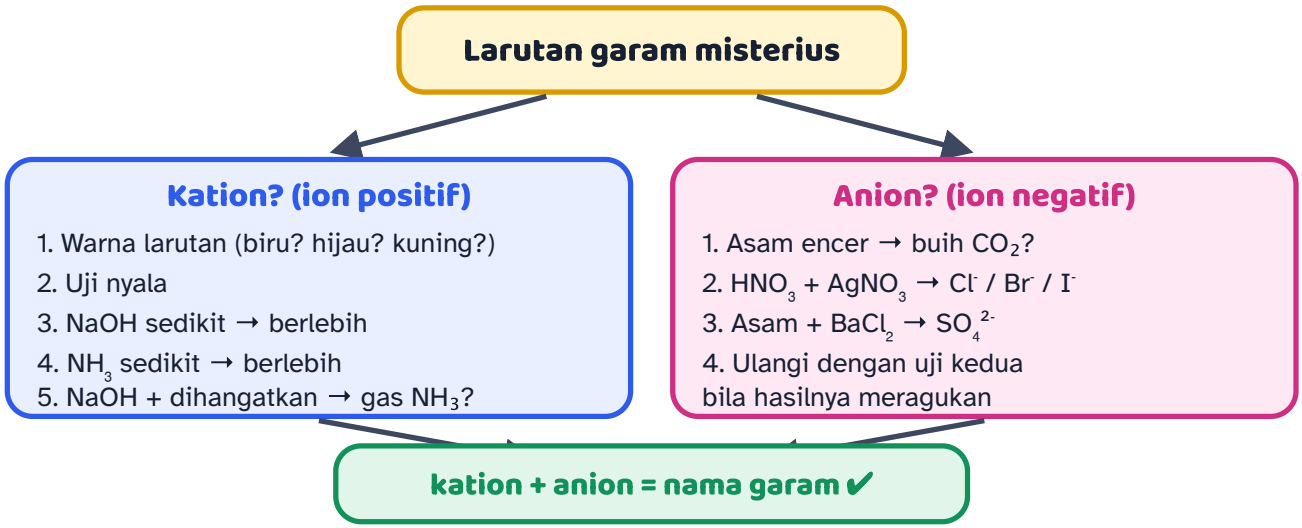
Br Br^-	sama seperti di atas	endapan krem	$Ag^+ + Br^- \longrightarrow AgBr\downarrow$
I I^-	sama seperti di atas	endapan kuning	$Ag^+ + I^- \longrightarrow AgI\downarrow$
SO_4^{2-}	asamkan, lalu tetesi $BaCl_2$ atau $Ba(NO_3)_2$(aq)	endapan putih	$Ba^{2+} + SO_4^{2-} \longrightarrow BaSO_4\downarrow$
SO_3^{2-}	tetesi $KMnO_4$ yang diasamkan	ungu → tak berwarna	(reaksi redoks, Bab 29)
NO_3^-	tambah NaOH dan serbuk aluminium, hangatkan	gas NH_3: lakmus merah basah → biru	(nitrat direduksi menjadi amonia)

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Pilih asam yang tidak "menyelundupkan" ion yang sedang diuji. Sebelum perak nitrat, pakai **asam nitrat**, bukan asam klorida (yang membawa Cl^- dan pasti memberi endapan putih). Sebelum barium klorida, jangan pakai asam sulfat (membawa SO_4^{2-}). Pengasaman sendiri berguna untuk menghancurkan karbonat, yang juga membentuk endapan putih Ag_2CO_3 atau $BaCO_3$ dan bisa menipu.

Uji gas

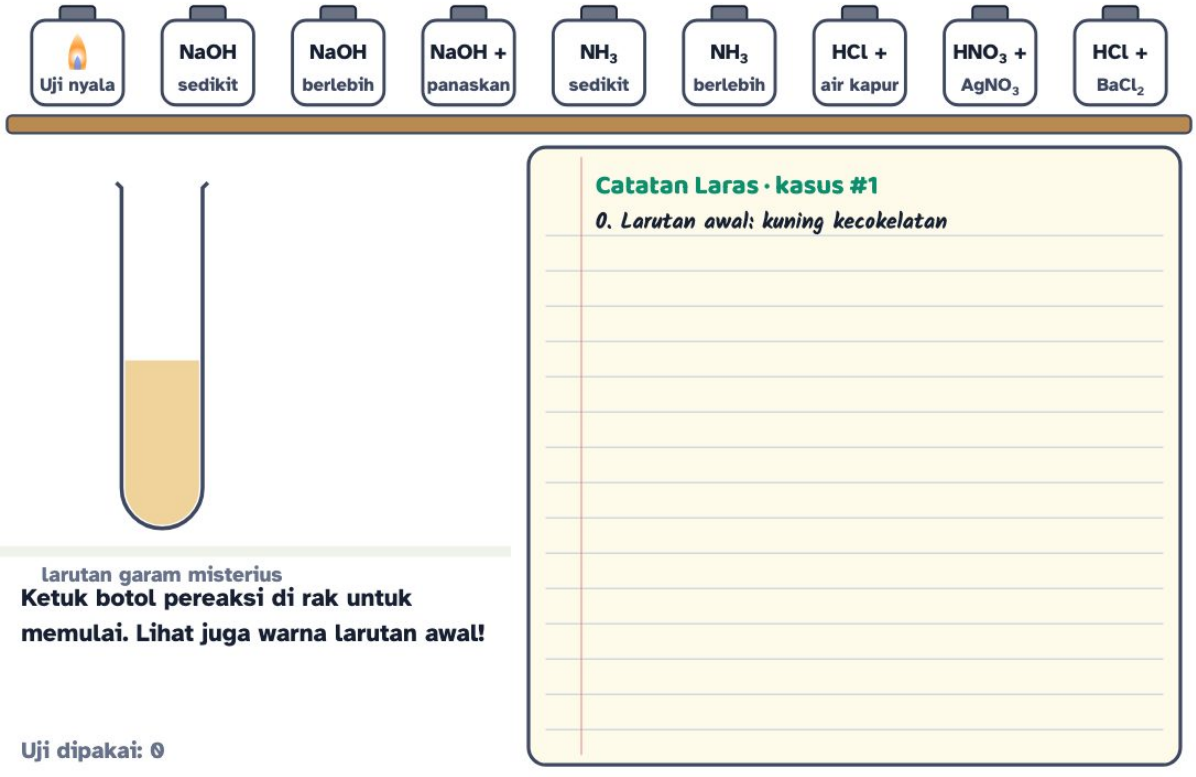
Gas	Uji	Hasil positif
H_2	dekatkan lidi menyala ke mulut tabung	letupan kecil "pop"
O_2	masukkan lidi berbara	bara menyala kembali
CO_2	alirkan ke air kapur, $Ca(OH)_2$(aq)	air kapur keruh: $Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O$
NH_3	kertas lakmus merah basah	menjadi biru
Cl_2	kertas lakmus basah	dipucatkan (diputihkan)
SO_2	kertas berisi $KMnO_4$ yang diasamkan	ungu → tak berwarna
uap H_2O	serbuk $CuSO_4$ anhidrat (putih)	menjadi biru



Peta kerja detektif: selidiki kation dan anion secara terpisah, lalu gabungkan.

LAB MINI **Detektif Tabung: ungkap garam misterius**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-39



Uji dipakai	Warna larutan awal	Status kasus
0	kuning kecokelatan	kasus terbuka

Ketuk botol pereaksi di rak (atau pilih uji lalu tekan 🧪 **Lakukan uji**). Setiap hasil masuk ke buku catatan Laras. Saat yakin, pilih tebakan kation dan anion lalu tekan 🔎 **Periksa tebakan**. Tantangan: pecahkan kasus dengan uji sesedikit mungkin! Perhatikan juga warna larutan awalnya.

CONTOH **Garam dari gudang dapur sekolah**

Serbuk putih X larut dalam air menjadi larutan tak berwarna. Uji nyala memberi warna ungu muda. Larutannya diasamkan dengan asam nitrat encer lalu ditetesi perak nitrat: terbentuk endapan kuning. Apa X?

1. Nyala ungu muda (lila) menunjuk ion kalium, $\mathrm{K^+}$.
2. Endapan kuning dengan perak nitrat menunjuk ion iodida: $\mathrm{Ag^+(aq) + I^-(aq) \longrightarrow AgI(s)}$.
3. Gabungkan kation dan anion.

X adalah kalium iodida, KI, zat yang ditambahkan ke garam beriodium untuk mencegah gondok.



TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1860, **Robert Bunsen** dan **Gustav Kirchhoff** di Heidelberg, Jerman, melewatkan cahaya nyala garam melalui prisma. Setiap unsur ternyata punya garis spektrum sendiri, seperti kode batang. Dari air mineral, mereka melihat dua garis biru yang belum dikenal dan menemukan unsur baru: **sesium** (Latin *caesius*, biru keabuan). Setahun kemudian garis merah tua mengungkap **rubidium** (*rubidus*, merah tua). Itulah kelahiran spektroskopi.



KIMIA NUSANTARA · DETEKTIF DI PASAR

Petugas balai POM sering datang ke pasar dengan mobil laboratorium keliling dan kit uji cepat. Formalin dideteksi dengan pereaksi yang berubah ungu, sedangkan boraks dengan **kertas kunyit**: kurkumin bereaksi dengan asam borat membentuk senyawa merah kecokelatan. Pewarna tekstil Rhodamin B pada kerupuk atau saus diperiksa dengan kromatografi dan spektrofotometri (subbab 39.3). Hasil uji cepat yang positif lalu dikonfirmasi di laboratorium, persis seperti detektif mencari saksi kedua.

⚠ **KESELAMATAN**

Pereaksi uji ion bukan bahan dapur. Natrium hidroksida dan amonia pekat bersifat korosif, garam barium beracun, dan perak nitrat menghitamkan kulit serta mencemari air. Kerjakan hanya di laboratorium sekolah dengan kacamata pelindung, sarung tangan, dan pengawasan guru. Uji bau dilakukan dengan mengibaskan uap ke arah hidung, tidak menghirup langsung. Buang sisa larutan ke wadah limbah, bukan ke wastafel.



NaOH, amonia pekat



garam barium



perak nitrat

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA ENDAPAN BISA LARUT LAGI?

Aluminium dan seng hidroksida bersifat **amfoter**: bereaksi dengan basa kuat berlebih membentuk ion kompleks yang larut. Tembaga dan seng membentuk kompleks dengan ligan amonia (Bab 9):

$$\mathrm{Al(OH)_3\,(s) + OH^-\,(aq) \longrightarrow [Al(OH)_4]^-\,(aq)}$$

$$\mathrm{Cu(OH)_2\,(s) + 4\,NH_3\,(aq) \longrightarrow [Cu(NH_3)_4]^{2+}\,(a}$$

Ion kompleks tetraaminatembaga(II) berwarna biru tua pekat. Pada analisis kation klasik (skema $\mathrm{H_2S}$), puluhan ion dipisahkan berurutan dengan prinsip yang sama: perbedaan kelarutan, K_{sp} (Bab 28), dan kemampuan membentuk kompleks.

39.2 Analisis kuantitatif: menimbang endapan, meneteskan buret

Setelah tahu *apa* zatnya, pertanyaan berikutnya: *berapa banyak*? Apakah garam ini benar 97% NaCl? Apakah cuka itu benar 5% asam asetat? Dua cara klasik menjawabnya dengan alat sederhana: neraca dan buret.

Gravimetri: biarkan neraca yang bicara

Dalam **gravimetri**, zat yang dicari diubah menjadi endapan yang rumusnya pasti, lalu endapan itu ditimbang.

1. Larutkan sampel yang massanya diketahui.
2. Tambahkan pereaksi pengendap **berlebih** agar semua ion terendapkan (misalnya $\mathrm{AgNO_3}$ untuk klorida, $\mathrm{BaCl_2}$ untuk sulfat).

3. Saring, cuci, lalu keringkan endapan sampai massanya tetap.
4. Timbang, lalu hitung dengan perbandingan mol.

Bagian massa endapan yang berasal dari zat yang dicari disebut **faktor gravimetri**. Untuk klorida dalam AgCl, faktornya $35{,}5/143{,}5 = 0{,}247$: setiap gram AgCl berisi 0,247 g klorin.

RUMUS HIDUP

Kadar klorida dari endapan AgCl

$$\%\,\mathrm{Cl} = \frac{m_{\mathrm{AgCl}} \times \dfrac{35{,}5}{143{,}5}}{m_{\mathrm{sampel}}} \times 100\%$$

Timbang endapan perak klorida, ambil bagian massa klorinnya, lalu bandingkan dengan massa sampel.

- m_{AgCl} Massa endapan AgCl kering g
- m_{sampel} Massa sampel g
- $\%\,\mathrm{Cl}$ Kadar klorida %

KADAR KLORIDA

58,6

%

garam hampir murni (NaCl ≥ 95%)

Endapan **2,37** g mengandung **0,586** g klorin. Bila semua klorida berasal dari NaCl, kadar NaCl ≈ **96,617** %.

Cek satuan: g × (g Cl / g AgCl) ÷ g sampel × 100% = % ✔

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-GRAVIMETRI-KLORIDA

KERJAKAN BERSAMA **Seberapa murni garam rakyat?**

Sebanyak 2,00 g garam dari petambak dilarutkan dalam air, lalu ditambah larutan $AgNO_3$ berlebih. Endapan AgCl kering bermassa 4,75 g. Hitung kadar NaCl dalam garam itu. (Ar Na 23, Cl 35,5, Ag 108)

1. Mr AgCl $= 108 + 35{,}5 = 143{,}5$; mol AgCl $= 4{,}75/143{,}5 = 0{,}0331$ mol.
2. Reaksi $Ag^+ + Cl^- \longrightarrow AgCl$ berbanding 1 : 1, jadi mol Cl^- = mol NaCl = 0,0331 mol.
3. Massa NaCl $= 0{,}0331 \times 58{,}5 = 1{,}94$ g.
4. Kadar $= 1{,}94/2{,}00 \times 100\% = 96{,}8\%$.

Kadar NaCl ±96,8%. Sisanya air, pasir halus, serta garam magnesium dan kalsium yang membuat garam rakyat terasa sedikit pahit. (Asumsinya: semua klorida berasal dari NaCl.)

Volumetri: menghitung dengan tetesan

Dalam **volumetri** atau titrasi (Bab 27), larutan standar yang konsentrasinya diketahui diteteskan dari buret sampai reaksi tepat habis, ditandai perubahan warna indikator. Dari volume yang terpakai, mol zat yang dicari dapat dihitung.

KERJAKAN BERSAMA **Benarkah cuka ini 5%?**

Sebanyak 10,0 mL cuka dapur diencerkan menjadi 100,0 mL. Lalu 25,0 mL larutan encer itu dititrasi dengan NaOH 0,100 M dan membutuhkan 20,8 mL sampai indikator fenolftalein berwarna merah muda. Hitung kadar asam asetat dalam cuka asli (g per 100 mL).

1. Mol NaOH $= 0{,}100 \times 0{,}0208 = 2{,}08 \times 10^{-3}$ mol. Reaksi $CH_3COOH + NaOH \longrightarrow CH_3COONa + H_2O$ berbanding 1 : 1.
2. Dalam 100,0 mL larutan encer ada $4 \times 2{,}08 \times 10^{-3} = 8{,}32 \times 10^{-3}$ mol, yang semuanya berasal dari 10,0 mL cuka.
3. Massa asam asetat $= 8{,}32 \times 10^{-3} \times 60 = 0{,}499$ g dalam 10,0 mL cuka, berarti 4,99 g per 100 mL.

Kadarnya ±5,0 g per 100 mL. Label cuka itu jujur!

Metode	Yang diukur	Contoh pemakaian

Gravimetri	massa endapan atau sisa pemanasan	kadar sulfat pupuk ZA, kadar air beras dan kopi
Volumetri (titrasi)	volume larutan standar	kadar asam cuka, vitamin C (dengan iodin), kesadahan air
Spektrofotometri UV-Vis	banyaknya cahaya yang diserap	pewarna pada saus, besi dan mangan dalam air sumur
Spektroskopi IR & NMR, spektrometri massa	serapan inframerah, sinyal inti, massa ion	struktur obat baru, minyak atsiri, narkotika, doping

39.3 Spektrofotometri UV-Vis: warna yang bisa dihitung

Tebak Dulu!

Larutan pewarna Rhodamin B tampak merah muda keunguan. Cahaya warna apa yang paling banyak *diserapnya*?

- Merah, karena larutannya berwarna merah.
- Hijau kekuningan (±550 nm).
- Ungu, karena warnanya keunguan.
- Tidak ada; benda berwarna tidak menyerap cahaya.

Jawabannya: hijau kekuningan. Warna yang kita lihat adalah cahaya yang *lolos*. Rhodamin B menelan cahaya hijau kekuningan di sekitar 554 nm. Cahaya merah dan biru yang tersisa bercampur di mata kita menjadi merah muda keunguan, warna komplementer dari hijau.

Cahaya putih adalah campuran semua warna. Larutan berwarna menyerap sebagian warna dan meneruskan sisanya. Warna yang tampak adalah **warna komplementer** dari warna yang diserap.

Panjang gelombang diserap	Warna yang diserap	Warna yang tampak	Contoh
400–435 nm	ungu	kuning kehijauan	—
435–480 nm	biru	kuning	kurkumin, tartrazin (±425 nm)

480–500 nm	biru kehijauan	jingga	—
500–560 nm	hijau	merah muda, ungu	$KMnO_4$ (525 nm), Rhodamin B (554 nm)
580–620 nm	kuning, jingga	biru	$[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ (±600 nm)
620–750 nm	merah	biru kehijauan	pewarna biru berlian (±630 nm)

Sebuah **spektrofotometer** memilih satu panjang gelombang dengan monokromator, menyinarkannya melewati kuvet berisi larutan, lalu detektor mengukur berapa banyak cahaya yang lolos.

DEFINISI · TRANSMITANS DAN ABSORBANS

Bila I_0 adalah intensitas cahaya yang masuk dan I yang keluar, **transmitans** $T = I/I_0$ (sering ditulis %T) dan **absorbans**

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T$$

Larutan yang meneruskan 10% cahaya punya $A = 1$; yang meneruskan 1% punya $A = 2$.

HUKUM BEER–LAMBERT

Untuk larutan encer pada panjang gelombang tertentu,

$$A = \varepsilon\, b\, c$$

dengan ε **absorptivitas molar** (L mol^{-1} cm^{-1}, khas untuk zat dan panjang gelombang), b tebal kuvet (cm), dan c konsentrasi (mol/L). Absorbans **sebanding lurus** dengan konsentrasi.

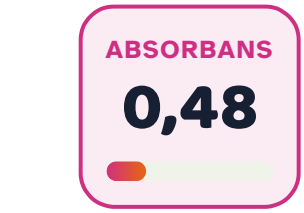
RUMUS HIDUP

Hukum Beer–Lambert

$$A = \varepsilon b c$$

Makin kuat daya serap zat, makin tebal kuvet, dan makin pekat larutannya, makin banyak cahaya yang ditelan.

- ε Absorptivitas molar $L\ mol^{-1}\ cm^{-1}$
- b Tebal kuvet cm
- c Konsentrasi mol/L
- A Absorbans



✔ daerah ideal (A 0,1–1)

Cahaya yang lolos: %T = **33,113** %. Dari setiap 1.000 foton, hanya **331,131** yang sampai ke detektor.

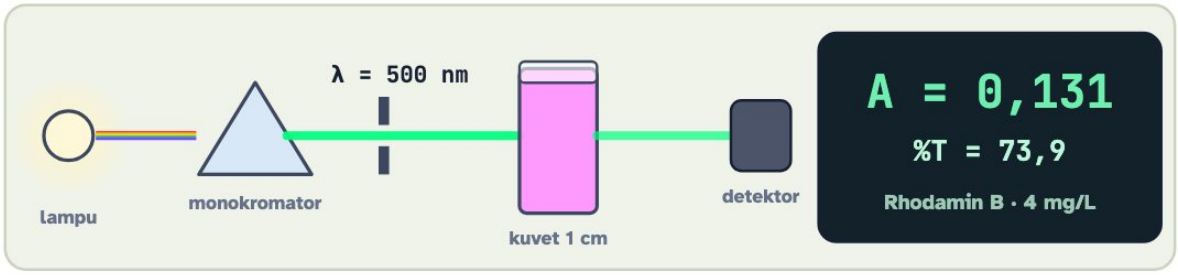
Cek satuan: (L mol^{-1} cm^{-1}) × cm × (mol/L) = tanpa satuan ✔

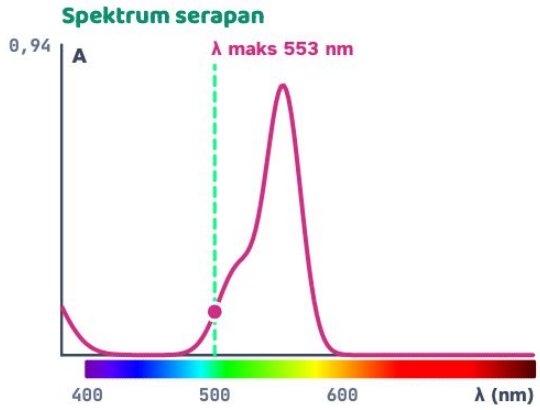
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-BEER-LAMBERT

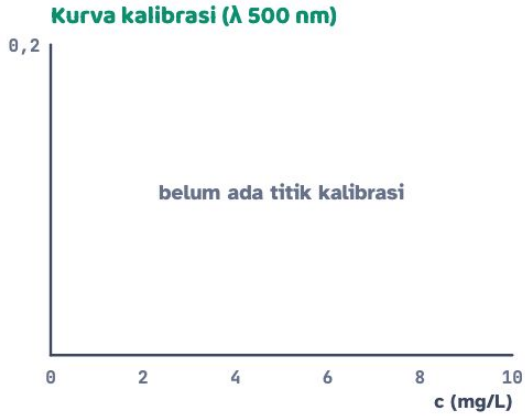
Dalam praktik, kimiawan jarang memakai ε dari buku. Mereka membuat **kurva kalibrasi**: beberapa larutan standar yang konsentrasinya diketahui diukur absorbansnya, hasilnya digambar sebagai garis lurus, lalu konsentrasi sampel dibaca dari garis itu. Coba sendiri di spektrofotometer virtual ini.

LAB MINI Spektrofotometer virtual: berapa pewarna dalam jajanan?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-39







Cari dulu λ maks: geser λ sampai absorbans paling besar.

Absorbans A	Transmitans	λ maks pewarna	Konsentrasi sampel
0,131	73,9 %	553 nm	ukur sampel dulu

1) Pilih pewarna, geser λ untuk mencari puncak serapan (λ maks). 2) Atur konsentrasi standar, tekan 📌 **Simpan titik kalibrasi**; ulangi untuk 3–5 konsentrasi pada λ yang *sama*. 3) Tekan 💉 **Ukur sampel** dan baca konsentrasinya dari kurva. Apa yang terjadi bila kamu mengganti λ setelah membuat kurva? Mengapa pengukuran di λ maks paling peka? (Di sini konsentrasi memakai mg/L, satuan yang biasa dipakai laboratorium pangan, sehingga $A = a\,b\,c$ dengan $a = \varepsilon / M$.)

KERJAKAN BERSAMA **Rhodamin B dalam saus merah**

Larutan standar Rhodamin B 2, 4, 6, dan 8 mg/L memberi absorbans 0,38; 0,77; 1,15; dan 1,53 pada 554 nm. Ekstrak saus diencerkan 5 kali lalu absorbansnya 0,95. Berapa kadar Rhodamin B dalam ekstrak?

1. Data membentuk garis lurus melewati titik nol dengan kemiringan $\approx 0{,}19$ L/mg (misalnya $1{,}53/8 = 0{,}191$).
2. Konsentrasi larutan yang diukur: $c = A/\text{kemiringan} = 0{,}95/0{,}191 \approx 4{,}97$ mg/L. Nilai ini berada di dalam rentang standar, jadi pembacaannya sah.
3. Kalikan faktor pengenceran: $4{,}97 \times 5 \approx 25$ mg/L.

Ekstrak saus berisi ±25 mg/L Rhodamin B. Karena pewarna ini dilarang untuk pangan, berapa pun kadarnya, saus itu tidak layak edar.

✏️ **TRIK KAK TIRTA · UKUR DI PUNCAK**

Selalu ukur di **λ maks**. Di puncak serapan, perubahan kecil konsentrasi memberi perubahan absorbans paling besar (paling peka), dan geseran kecil panjang gelombang hampir tidak mengubah hasil. Ibaratnya memotret di tengah panggung, bukan di tepi yang remang.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA LOGARITMA, DAN KAPAN HUKUMNYA GAGAL?

Bayangkan kuvet dipotong menjadi lapisan tipis. Setiap lapisan menyerap *fraksi* yang sama dari cahaya yang sampai kepadanya, sehingga intensitas turun secara eksponensial: $I = I_0 \cdot 10^{-\varepsilon b c}$. Ambil logaritmanya, dan muncullah $A = \varepsilon b c$ yang lurus.

Kelurusan itu pudar pada konsentrasi tinggi (molekul saling berdesakan dan berinteraksi), bila cahaya tidak cukup monokromatis, bila ada hamburan (larutan keruh), atau bila zat ikut bereaksi (misalnya kesetimbangan asam–basa indikator). Kabar baiknya, absorbans bersifat **aditif**: campuran dua zat memberi $A = \varepsilon_1 b c_1 + \varepsilon_2 b c_2$, sehingga dua pengukuran pada dua panjang gelombang cukup untuk menghitung dua konsentrasi sekaligus.

39.4 Spektroskopi inframerah: ikatan yang bergetar

Ikatan kovalen bukan tongkat kaku, melainkan seperti **pegas** yang menghubungkan dua bola. Ikatan itu selalu bergetar: meregang, memendek, dan menekuk. Setiap jenis ikatan punya frekuensi getar sendiri, dan frekuensi itu jatuh di daerah **inframerah** (IR).

Bahasa sederhana · Pernah memetik karet gelang yang tegang dan yang kendur? Bunyinya berbeda. Ikatan antar-atom juga "berbunyi" dengan nada berbeda. Sinar inframerah yang nadanya cocok akan ditelan oleh ikatan itu, dan alat IR mencatat nada mana saja yang hilang.

Bila sinar IR yang frekuensinya cocok mengenai molekul, energinya diserap dan getaran ikatan menjadi lebih kuat. Spektrum IR menggambarkan %T (cahaya yang lolos) terhadap **bilangan gelombang** $\tilde{\nu}$ (cm^{-1}, banyaknya gelombang per sentimeter). Pita serapan tampak sebagai "lembah" yang menukik ke bawah. Ingat dua aturan pegas: **ikatan lebih kuat** (C=O lebih kuat dari C–O) dan **atom lebih ringan** (H) bergetar lebih cepat sehingga muncul di bilangan gelombang lebih tinggi.

Ikatan	Bilangan gelombang (cm^{-1})	Ciri pita
O–H alkohol, fenol	3200–3600	lebar, membulat (akibat ikatan hidrogen)
N–H amina	3300–3500	sedang, lebih ramping
C–H	2850–3090	tajam, hampir selalu ada pada senyawa organik
O–H asam karboksilat	2500–3000	sangat lebar, sering menelan pita C–H
C≡C, C≡N	2100–2260	sedang, di daerah yang biasanya sepi
C=O (aldehida, keton, asam, ester)	1700–1750	sangat kuat dan tajam
C=C	1620–1680	lemah sampai sedang
C–O (alkohol, eter, ester)	1050–1410	kuat, di daerah sidik jari

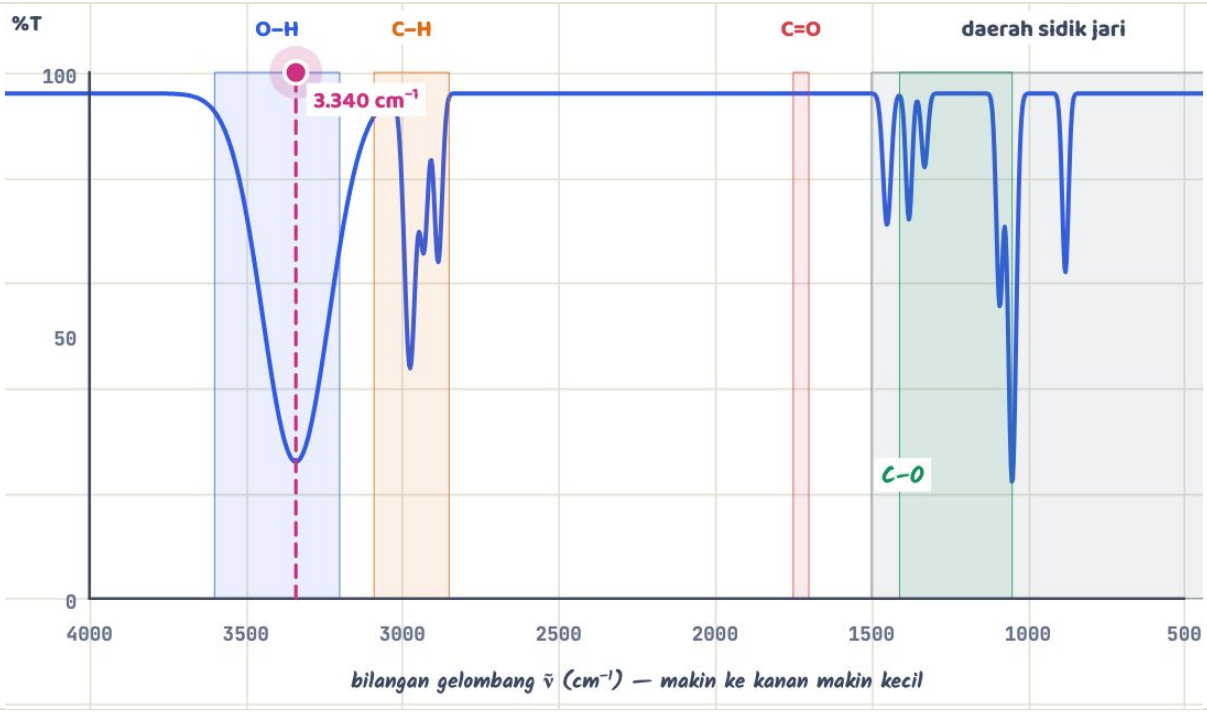
GRAFIK HIDUP

Spektrum IR: cari jejak gugus fungsi

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-39

$$\%T = f(\tilde{\nu})$$

$$\text{etanol}: \quad \tilde{\nu}_{\text{kursor}} = 3.340\ \text{cm}^{-1}$$



etanol: O–H lebar ±3340 + C–O ±1050, tanpa C=O → alkohol

🎯 kursor di jendela O–H alkohol

senyawa
etanol, CH_3CH_2OH

$\tilde{\nu}$ kursor
3.340 cm^{-1}

jendela pita
O–H alkohol (3200–3600, lebar) atau N–H

Ganti senyawa dengan penggeser pertama, lalu seret titik magenta di atas (atau penggeser kedua) ke setiap lembah besar. Bandingkan etanol dan asam etanoat: keduanya punya O–H, tetapi bentuk pitanya berbeda jauh. Senyawa mana yang punya C=O? Mana yang tidak punya gugus fungsi sama sekali?

TRIK KAK TIRTA · LIHAT DUA JENDELA DULU

Jangan tenggelam di daerah sidik jari. Lihat dulu **jendela 3300**: ada lembah lebar? Itu O–H. Lalu **jendela 1700**: ada lembah tajam yang dalam? Itu C=O. Kombinasinya langsung mempersempit tersangka: O–H saja → alkohol; C=O saja → keton, aldehida, atau ester; O–H sangat lebar + C=O → asam karboksilat.

Daerah di bawah 1500 cm^{-1} disebut **daerah sidik jari**. Polanya rumit dan unik untuk setiap molekul, sehingga cocok untuk mencocokkan sampel dengan spektrum pembanding di pustaka data, misalnya untuk menguji keaslian minyak atsiri atau obat.

JEMBATAN KE BAB 38

Sebuah getaran hanya menyerap IR bila **momen dipol** molekul berubah saat bergetar. Karena itu N_2 dan O_2 tidak menyerap IR, sedangkan CO_2, H_2O, dan CH_4 menyerapnya. Prinsip yang sama yang membuat gas-gas itu menjadi gas rumah kaca dipakai kimiawan untuk mengenali gugus fungsi.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM HOOKE UNTUK IKATAN

Ikatan diperlakukan sebagai pegas dengan tetapan gaya k yang menghubungkan dua massa. Bilangan gelombangnya

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{2\pi c}\sqrt{\frac{k}{\mu}}, \qquad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

dengan μ massa tereduksi dan c kecepatan cahaya. Contoh: mengganti H dengan deuterium (D) hampir menggandakan massa tereduksi C–H (dari ±0,92 menjadi ±1,71 u) tanpa mengubah k. Pita C–H di ±3000 cm^{-1} bergeser ke $3000/\sqrt{1{,}71/0{,}92} \approx 2200$ cm^{-1}. Pergeseran isotop ini dipakai untuk memastikan pita mana milik ikatan mana. Ikatan rangkap tiga C≡C (k besar) juga menjelaskan mengapa ia muncul jauh di atas C=C dan C–C.

39.5 Spektrometri massa: menimbang molekul dan pecahannya

Tebak Dulu!

Mr etanol adalah 46. Pada spektrum massanya, di m/z berapa muncul puncak yang *paling tinggi*?

- 46, karena puncak tertinggi selalu ion molekul.
- 31, sebuah pecahan molekul.
- 92, karena dua molekul bergabung.
- 18, karena etanol melepas air.

Jawabannya: m/z 31. Ion molekul etanol (m/z 46) mudah patah. Ikatan C–C di samping atom O putus dan meninggalkan ion $\mathrm{CH_2OH^+}$ (12 + 2 + 16 + 1 = 31) yang cukup stabil, sehingga paling banyak terbentuk. Puncak m/z 46 tetap ada, tetapi lebih pendek.

Spektrometer massa bekerja dalam empat tahap. Sampel diuapkan, lalu ditembak elektron berenergi tinggi sehingga setiap molekul kehilangan satu elektron: $\mathrm{M + e^- \longrightarrow M^+ + 2\,e^-}$. Ion ini dipercepat, dipisahkan menurut **perbandingan massa terhadap muatan** (m/z), lalu dihitung oleh detektor. Karena hampir semua ion bermuatan 1+, nilai m/z sama dengan massanya.

Tumbukan itu sangat keras. Sebagian ion molekul patah menjadi **fragmen**. Hanya potongan yang bermuatan yang terdeteksi; potongan netral menghilang tanpa jejak:

$$[\mathrm{CH_3{-}CH_2OH}]^{\bullet+} \longrightarrow \mathrm{CH_2OH^+}\ (m/z\ 31) + {}^{\bullet}\mathrm{CH_3}\ (\dots$$

DEFINISI · MEMBACA SPEKTRUM MASSA

Ion molekul (M^+) adalah molekul utuh yang kehilangan satu elektron; m/z-nya sama dengan Mr dan biasanya menjadi puncak berarti paling kanan (selain puncak isotop M+1 dan M+2). **Puncak dasar** adalah puncak tertinggi, diberi kelimpahan 100%. **Fragmen** adalah pecahan bermuatan; selisih m/z dari M^+ menunjukkan potongan yang lepas.

m/z atau selisih	Ion atau potongan	Petunjuk

15 · M – 15	$\mathrm{CH_3^+}$ · lepas $\mathrm{CH_3}$	ada gugus metil
29 · M – 29	$\mathrm{C_2H_5^+}$ atau $\mathrm{CHO^+}$	gugus etil atau aldehida
31	$\mathrm{CH_2OH^+}$	alkohol primer
43	$\mathrm{CH_3CO^+}$ atau $\mathrm{C_3H_7^+}$	metil keton, ester asetat, atau gugus propil
45 · M – 45	$\mathrm{COOH^+}$ · lepas COOH	asam karboksilat
M – 17 · M – 18	lepas OH · lepas $\mathrm{H_2O}$	alkohol atau asam
77 · 91	$\mathrm{C_6H_5^+}$ · $\mathrm{C_7H_7^+}$	ada cincin benzena

Sidik jari isotop: klorin dan brom

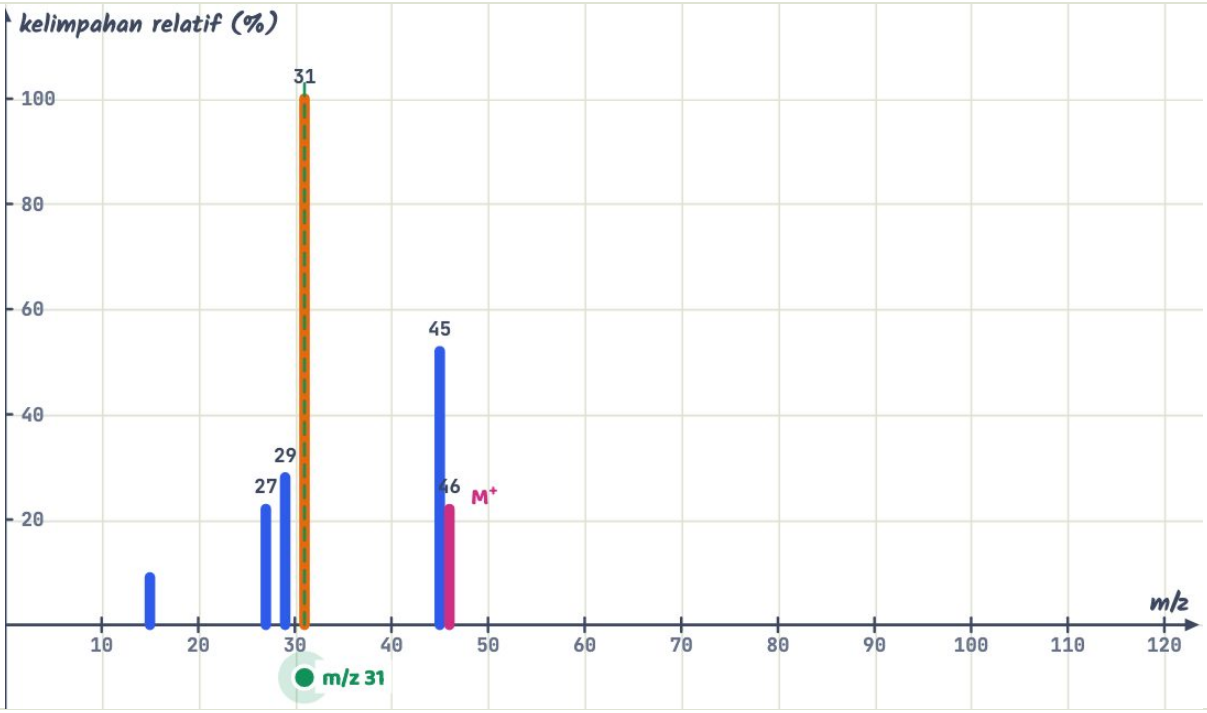
Klorin di alam terdiri atas ^{35}Cl (±75,8%) dan ^{37}Cl (±24,2%), kira-kira **3 : 1** (ingat Bab 6). Molekul dengan satu atom Cl memberi dua puncak ion molekul, M dan M+2, setinggi 3 : 1. Brom terdiri atas ^{79}Br dan ^{81}Br yang hampir sama banyak, sehingga puncak M dan M+2 setinggi **1 : 1**. Dua atom Cl memberi tiga puncak M : M+2 : M+4 ≈ **9 : 6 : 1**, hasil penjabaran $(3+1)^2$.

GRAFIK HIDUP **Spektrum massa: timbang molekul dan pecahannya**

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-39

$$\text{kelimpahan relatif} = f(m/z)$$

$$\text{etanol}: \quad m/z_{\text{kursor}} = 31$$



etanol: puncak tertinggi m/z 31 (CH_2OH^+), BUKAN ion molekul m/z 46!

senyawa
etanol, C_2H_5OH (Mr 46)

ion di kursor
CH_2OH^+ (M - CH_3) · 100%

puncak dasar (tertinggi)
m/z 31

Ganti senyawa, lalu seret titik hijau di bawah sumbu ke setiap batang. Batang magenta = ion molekul dan isotopnya; jingga = puncak dasar; biru = fragmen. Pada senyawa mana ion molekul sekaligus puncak tertinggi? Bandingkan "sepasang kembar" kloroetana (3 : 1) dan bromoetana (1 : 1).

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Puncak tertinggi spektrum massa **tidak selalu** ion molekul! Puncak tertinggi adalah puncak dasar, yaitu ion yang paling banyak terbentuk. Cari ion molekul di ujung kanan spektrum, dan ingat bahwa M+1 (dari ^{13}C) atau M+2 (dari Cl dan Br) bisa muncul di sebelahnya.

CONTOH **Membaca dua puncak kembar**

Spektrum massa senyawa halogen Y memberi dua puncak di m/z 78 dan 80 dengan tinggi 3 : 1, dan puncak dasar di m/z 43. Apa Y?

1. Puncak kembar 3 : 1 berselisih 2 → ada satu atom Cl. Jadi Mr dengan ^{35}Cl adalah 78.
2. Sisa molekul: $78 - 35 = 43$, sama dengan puncak dasar $C_3H_7^+$. Ikatan C–Cl putus dan meninggalkan ion propil.

Y adalah kloropropana, C_3H_7Cl. Untuk membedakan 1-kloropropana dan 2-kloropropana, kita butuh NMR (subbab 39.6).

KIMIA NUSANTARA · MADU DAN MINYAK NILAM

Lebah mengumpulkan nektar dari bunga yang kebanyakan memakai jalur fotosintesis C3, sedangkan gula tebu dan sirup jagung berasal dari tumbuhan C4 yang "lebih suka" isotop ^{13}C. Spektrometer massa isotop dapat mengukur perbandingan ^{13}C/^{12}C dengan sangat teliti, sehingga madu yang dicampur sirup gula ketahuan. Indonesia juga termasuk pemasok utama dunia **minyak nilam**, terutama dari Aceh. Mutunya ditentukan oleh kadar *patchouli alkohol* yang diukur dengan kromatografi gas–spektrometri massa (GC-MS).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MASSA EKSAK DAN PUNCAK M+1

Spektrometer resolusi tinggi mengukur m/z sampai empat desimal. Karena massa isotop bukan bilangan bulat (^{1}H 1,0078; ^{16}O 15,9949; ^{14}N 14,0031), molekul dengan "Mr 28" bisa dibedakan: CO = 27,9949, N_2 = 28,0061, C_2H_4 = 28,0313. Satu angka massa cukup untuk menentukan rumus molekul.

Puncak **M+1** berasal terutama dari ^{13}C (±1,1% dari setiap atom C). Perkiraan jumlah atom C: $n_C \approx \dfrac{\text{tinggi } (M+1)}{\text{tinggi } M} \times \dfrac{100}{1{,}1}$. Bila M+1 tingginya 4,4% dari M, molekul itu punya sekitar 4 atom karbon.

MITOS

"Satu uji sudah cukup untuk memastikan identitas zat."

FAKTA

Nyala kuning hanya membuktikan Na^+; endapan putih dengan $AgNO_3$ bisa AgCl atau Ag_2CO_3 bila tidak diasamkan. Detektif sejati menggabungkan beberapa bukti yang saling menguatkan.

MITOS

"Puncak tertinggi spektrum massa selalu ion molekul."

FAKTA

Puncak tertinggi adalah puncak dasar, ion yang paling stabil atau paling banyak terbentuk. Pada etanol puncak dasarnya m/z 31, sedangkan ion molekulnya m/z 46.

MITOS

"NMR berbahaya karena ada kata 'nuklir'."

FAKTA

"Nuklir" di sini hanya berarti **inti atom** yang berperilaku seperti magnet kecil. NMR memakai medan magnet dan gelombang radio, tanpa radiasi pengion. MRI di rumah sakit adalah NMR proton air dalam tubuh.

MITOS

"Larutan biru tampak biru karena menyerap cahaya biru."

FAKTA

Kebalikannya: larutan biru **meneruskan** biru dan menyerap warna komplementernya, jingga sampai merah.

39.6 ^{1}H NMR, IHD, dan menyusun bukti

IHD: berapa ikatan rangkap atau cincin?

Sebelum membuka spektrum, detektif menghitung satu angka dari rumus molekul. Alkana rantai terbuka C_nH_{2n+2} adalah "jenuh". Setiap ikatan π (C=C, C=O) atau setiap cincin membuat molekul kehilangan dua atom H.

DEFINISI · INDEKS KEKURANGAN HIDROGEN

IHD (indeks kekurangan hidrogen, disebut juga derajat ketidakjenuhan) adalah jumlah ikatan π ditambah jumlah cincin dalam molekul:

$$\text{IHD} = \frac{2C + 2 + N - H - X}{2}$$

C, H, N, X = jumlah atom karbon, hidrogen, nitrogen, dan halogen. Oksigen dan belerang **tidak** dihitung.

RUMUS HIDUP

Indeks kekurangan hidrogen (IHD)

$$\text{IHD} = \frac{2C + 2 + N - H - X}{2}$$

Bandingkan jumlah H molekulmu dengan senyawa jenuh rantai terbuka: setiap pasang H yang hilang berarti satu ikatan π atau satu cincin.

- C Jumlah atom C
- H Jumlah atom H
- N Jumlah atom N
- X Jumlah halogen (F, Cl, Br, I)
- IHD IHD

IHD
4

IHD ≥ 4: curigai cincin benzena!

C_6H_6 benzena: 3 C=C + 1 cincin

Molekul ini kekurangan **8** atom H dibanding senyawa jenuh rantai terbuka.

Cek satuan: tanpa satuan (jumlah ikatan π + jumlah cincin)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-IHD

Rumus	IHD	Artinya
C_2H_6O (etanol, dimetil eter)	0	jenuh
C_3H_6O (propanon, propanal)	1	satu C=O (atau C=C, atau cincin)
C_2H_2 (etuna)	2	C≡C berisi dua ikatan π
C_6H_6 (benzena)	4	tiga C=C + satu cincin
$C_8H_{10}N_4O_2$ (kafein)	6	dua cincin + empat ikatan rangkap

ADU CEPAT **Kilat IHD**

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-39

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

IHD = (2C + 2 − H)/2, oksigen diabaikan. Contoh $C_4H_8O_2$: (10 − 8)/2 = 1.

^{1}H NMR: mendengarkan setiap atom hidrogen

Inti atom hidrogen berputar dan berperilaku seperti magnet jarum yang sangat kecil. Di dalam medan magnet kuat, inti itu dapat menyerap gelombang radio dengan frekuensi tertentu. Frekuensi tepatnya bergantung pada "selimut" elektron di sekitarnya. H yang dekat atom elektronegatif (O, Cl) atau gugus C=O kehilangan sebagian selimutnya, sehingga sinyalnya bergeser ke kiri.

Bahasa sederhana · Bayangkan setiap atom H adalah anak yang memakai jaket. Atom oksigen di dekatnya suka "menarik jaket" itu (menarik elektron). H yang jaketnya tipis lebih mudah "kedinginan" dan menjawab panggilan gelombang radio pada nada yang berbeda. Dari nadanya, kita tahu di lingkungan mana setiap H tinggal.

Posisi sinyal disebut **pergeseran kimia**, δ, dalam ppm, diukur relatif terhadap zat pembanding TMS (tetrametilsilana) yang diberi $\delta = 0$. Satu spektrum ^{1}H NMR memberi tiga petunjuk:

1. **Jumlah sinyal** = jumlah lingkungan H yang berbeda. H yang setara karena simetri memberi satu sinyal.
2. **Luas sinyal (integrasi)** sebanding dengan jumlah H di lingkungan itu.
3. **Pemecahan sinyal** menunjukkan berapa H yang menjadi tetangga di atom C sebelahnya.

Jenis H	δ (ppm)
$\mathrm{R{-}CH_3}$ (alkil)	0,9–1,0
$\mathrm{R{-}CH_2{-}R}$	1,3–1,4
$\mathrm{CH_3{-}C(=O)^{-}}$, $\mathrm{{-}CH_2{-}C(=O)^{-}}$ (di sebelah C=O)	2,0–2,7
$\mathrm{R{-}O{-}CH_3}$, $\mathrm{R{-}O{-}CH_2^{-}}$ (eter, alkohol)	3,3–3,7
$\mathrm{{-}CH_2{-}Cl}$, $\mathrm{{-}CH_2{-}Br}$	3,4–4,2
$\mathrm{R{-}COO{-}CH_2^{-}}$, $\mathrm{R{-}COO{-}CH_3}$ (sisi O pada ester)	3,7–4,8
$\mathrm{R{-}OH}$	1–6 (berubah-ubah, sering singlet lebar)
H pada cincin benzena	6,5–8,0
$\mathrm{R{-}CHO}$ (aldehida)	9,4–10
$\mathrm{R{-}COOH}$ (asam karboksilat)	9–13

ATURAN N + 1

Sinyal sekelompok H yang bertetangga dengan **n** atom H setara pada atom C di sebelahnya dipecah menjadi **n + 1** puncak, dengan perbandingan tinggi mengikuti segitiga Pascal: singlet (1), dublet (1 : 1), triplet (1 : 2 : 1), kuartet (1 : 3 : 3 : 1), kuintet, sekstet, septet. H yang setara satu sama lain tidak saling memecah, dan H pada O–H biasanya tidak memecah maupun dipecah.

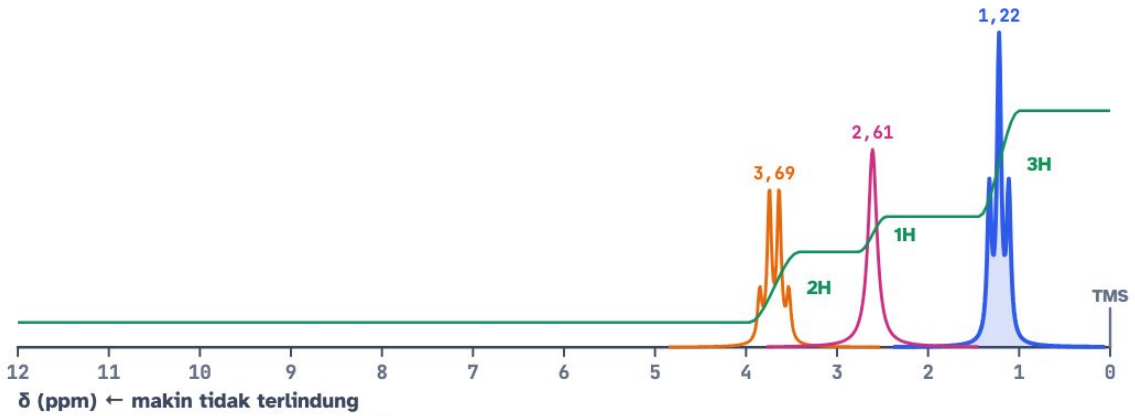
LAB MINI **Simulator ^{1}H NMR: dengarkan para hidrogen**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-39

Etanol

C_2H_6O





perbesaran: triplet



CH_3 · δ 1,22 ppm · 3 H
tetangga 2 H → 2 + 1 = 3 puncak: triplet.
CH_3 jauh dari O, masih "berselimut" elektron → δ kecil.

Jumlah sinyal	δ sinyal terpilih	Integrasi	Pola
3	1,22 ppm	3 H (dari 6)	triplet

Pilih molekul, lalu ketuk sebuah sinyal (atau pakai tombol ◄ ►). Warna sinyal cocok dengan warna gugus pada rumus. Kotak bawah memperbesar sinyal terpilih dan menjelaskan pemecahannya. Matikan **resolusi tinggi** untuk melihat spektrum "kabur" tanpa pemecahan. Bandingkan etil etanoat dan metil propanoat: rumusnya sama, sidik jarinya berbeda!

AWAS JEBAKAN

Jumlah sinyal **bukan** jumlah atom H, dan jumlah puncak dalam satu sinyal menghitung **tetangga**, bukan H-nya sendiri. Kuartet berarti "aku bertetangga dengan 3 H", misalnya CH_2 di samping CH_3. Propanon punya 6 atom H, tetapi hanya satu sinyal singlet karena kedua CH_3 setara dan tidak punya tetangga H.

TAMU DARI MASA LALU

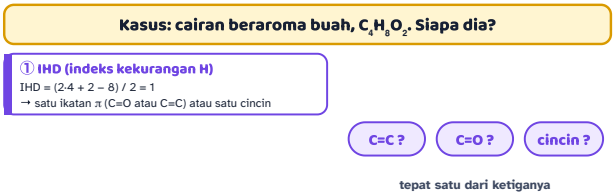
Pada 1946, dua tim fisikawan di Amerika Serikat, dipimpin **Felix Bloch** dan **Edward Purcell**, secara terpisah berhasil "mendengar" inti atom dalam zat padat dan cair dengan gelombang radio. Mereka berbagi Nobel Fisika 1952. Kimiawan segera sadar bahwa sinyal itu bergeser menurut lingkungan kimianya, dan NMR menjadi alat penentu struktur yang paling penting. Teknik yang sama, diberi pemetaan ruang, lahir kembali sebagai MRI.

Menyusun bukti: dari rumus ke struktur

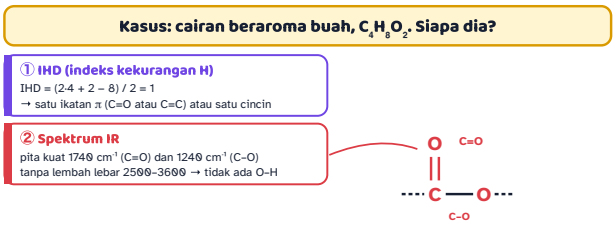
Setiap alat menjawab pertanyaan yang berbeda. IHD memberi jumlah ikatan rangkap dan cincin, IR memberi gugus fungsi, MS memberi massa dan potongan, dan ^{1}H NMR memberi peta tetangga atom H. Lihat bagaimana keempatnya bekerja sama dalam satu kasus.



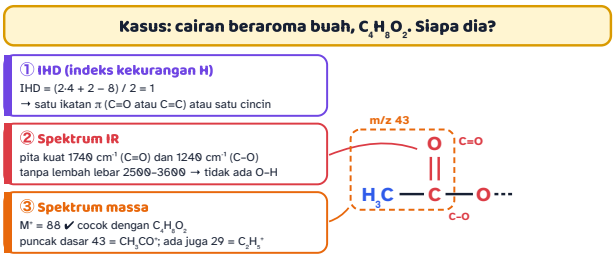
Langkah 1. Bukti awal: analisis unsur dan ion molekul memberi rumus $C_4H_8O_2$. Banyak isomer punya rumus ini. Siapa pelakunya?



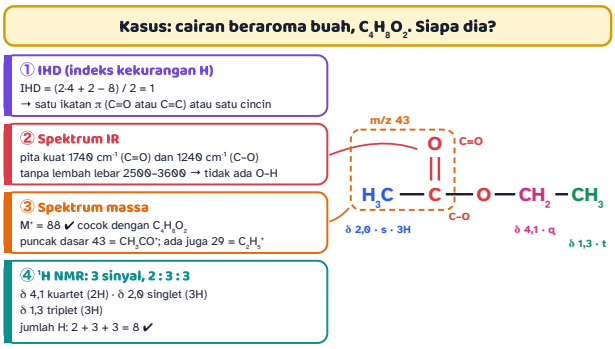
Langkah 2. Hitung IHD: $(2 \cdot 4 + 2 - 8)/2 = 1$. Molekul ini punya tepat satu ikatan π atau satu cincin.



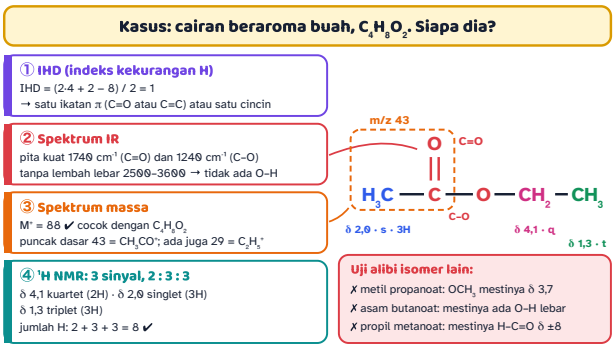
Langkah 3. IR: pita tajam 1740 cm^{-1} menunjukkan C=O dan pita kuat 1240 cm^{-1} menunjukkan C–O. Tidak ada pita O–H lebar, jadi bukan asam atau alkohol. C=O ditambah C–O mengarah ke **ester**, –COO–.



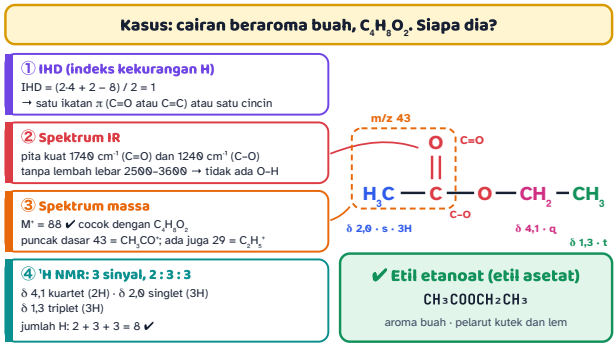
Langkah 4. MS: M^+ = 88 cocok dengan $C_4H_8O_2$. Puncak dasar m/z 43 adalah CH_3CO^+: ada CH_3 yang menempel langsung pada C=O.



Langkah 5. ^{1}H NMR: singlet 3H di δ 2,0 adalah CH_3 di sebelah C=O yang tak punya tetangga H. Kuartet 2H di δ 4,1 adalah CH_2 yang menempel pada O ester dan bertetangga dengan CH_3. Triplet 3H di δ 1,3 adalah CH_3 yang bertetangga dengan CH_2.



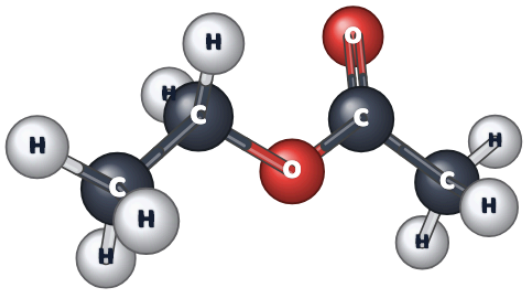
Langkah 6. Uji alibi isomer lain: metil propanoat seharusnya memberi singlet OCH_3 di δ ±3,7; asam butanoat punya O–H sangat lebar; propil metanoat punya H–C=O di δ ±8. Semuanya gugur.



Langkah 7. Kesimpulan: **etil etanoat**, $\mathrm{CH_3COOCH_2CH_3}$. Semua bukti saling menguatkan, bukan hanya satu.

MOLEKUL 3D

Barisan tersangka: cocokkan struktur dengan bukti



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etil asetat $\mathrm{C_4H_8O_2}$

Mr ≈ 88,11 · PubChem ↗

Ester beraroma buah; pelarut penghapus kutek dan lem.

Bandingkan etil asetat dengan metil propanoat (keduanya $C_4H_8O_2$). Putar molekulnya dan hitung lingkungan H yang berbeda pada setiap tersangka. Mana yang akan memberi satu sinyal NMR saja? Mana yang punya O–H dan akan memberi pita IR lebar?

COBA SENDIRI **Kasus alkohol pembersih**

Cairan pembersih bening Z memiliki rumus C_3H_8O. IR: pita lebar ±3350 cm⁻¹, tidak ada pita 1700–1750 cm⁻¹. MS: M^+ = 60, puncak dasar m/z 45. ¹H NMR: δ 4,0 (septet, 1H), 2,2 (singlet lebar, 1H), 1,2 (dublet, 6H). Tentukan struktur Z.

1. IHD $= (2 \cdot 3 + 2 - 8)/2 = 0$: jenuh, tanpa C=O dan tanpa cincin.
2. IR: O–H lebar dan tanpa C=O → alkohol (bukan eter).
3. MS: $60 - 45 = 15$: ion kehilangan CH_3. m/z 45 adalah CH_3CHOH^+, jadi ada CH_3 pada C yang membawa O–H.
4. NMR: dublet 6H = dua CH_3 setara yang bertetangga dengan 1 H. Septet 1H = satu CH yang bertetangga dengan 6 H, dan δ 4,0 menunjukkan ia menempel pada O. Singlet 1H = O–H.

Z adalah propan-2-ol (isopropil alkohol), $(CH_3)_2CHOH$, bahan alkohol 70% pembersih luka. Propan-1-ol akan memberi empat sinyal dan puncak dasar m/z 31.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MELAMPAUI ¹H: KARBON-13 DAN SIMETRI

Inti ^{13}C juga "bernyanyi" di NMR. Spektrum ^{13}C biasanya berisi satu garis tajam untuk setiap lingkungan karbon (rentang 0–220 ppm), sehingga jumlah garis langsung mengungkap simetri: 1,4-dimetilbenzena hanya memberi 3 garis, sedangkan 1,2-dimetilbenzena memberi 4. Karbon C=O muncul jauh di kiri (±170–210 ppm).

Pemecahan ^1H juga punya ukuran: jarak antarpuncak dalam satu multiplet disebut tetapan kopling J (Hz). Dua gugus yang saling memecah selalu memiliki J yang sama, sehingga kuartet CH_2 dan triplet CH_3 pada gugus etil dapat dipasangkan seperti dua kepingan teka-teki. Bila tetangganya tidak setara (misalnya CH_2 di antara CH_3 dan CHO), aturan n + 1 diterapkan bertahap dan muncul "multiplet".

Kimia di sekitarmu

BPOM di pasar

Kit uji cepat dan laboratorium keliling memeriksa formalin, boraks, dan Rhodamin B pada tahu, mi basah, kerupuk, dan saus. Hasil positif dikonfirmasi dengan spektrofotometri dan kromatografi.

Laboratorium forensik

Serbuk, cairan, dan residu dari tempat kejadian diperiksa dengan IR dan GC-MS. Hasilnya menjadi barang bukti ilmiah di pengadilan.

Bea Cukai

Spektrometer genggam dapat memindai serbuk mencurigakan di pelabuhan dan bandara, sering tanpa membuka kemasan bening, lalu mencocokkannya dengan pustaka spektrum.

Madu asli atau oplosan?

Rasio isotop $^{13}C/^{12}C$ dari spektrometer massa membongkar madu yang dicampur sirup gula tebu atau jagung.

Minyak atsiri

Minyak nilam, cengkeh, dan sereh wangi dinilai dari kadar senyawa khasnya, misalnya patchouli alkohol dan eugenol, yang diukur dengan GC-MS.

MRI di rumah sakit

Pemindai MRI adalah "NMR raksasa" yang mendengarkan proton dalam air dan lemak tubuh, lalu menyusunnya menjadi gambar organ tanpa sinar-X.

Cek Cepat

Larutan X ditetesi NaOH: endapan putih yang larut dalam NaOH berlebih. Ditetesi amonia: endapan putih yang juga larut dalam amonia berlebih. X mengandung ion ...

- Al^{3+}
- Ca^{2+}
- Zn^{2+}
- Fe^{2+}

Spektrum IR suatu senyawa menunjukkan pita lebar 3200–3600 cm^{-1} dan tidak ada pita 1700–1750 cm^{-1}. Senyawa itu kemungkinan besar ...

- alkohol
- keton
- ester
- alkana

Pada spektrum ^1H NMR kloroetana, CH_3CH_2Cl, sinyal CH_2 dipecah menjadi ...

- singlet
- dublet
- triplet
- kuartet

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: detektif serbuk dapur

Bahan: sedikit gula pasir, garam dapur, tepung tapioka, dan soda kue dalam 4 gelas kecil berlabel A–D (minta orang dewasa menyiapkannya diam-diam), air matang, cuka dapur, obat luka povidon iodin yang diencerkan 10 kali, air rebusan kubis ungu, sendok plastik, dan pipet atau sedotan.

1. Amati dulu: warna, bentuk butiran (pakai kaca pembesar HP), dan apakah terasa kasar saat disentuh dengan sendok.
2. Larutkan ¼ sendok teh setiap serbuk dalam 3 sendok makan air. Mana yang larut jernih, mana yang keruh?
3. Teteskan 2 tetes larutan iodin. Warna biru kehitaman menandakan pati (tepung).
4. Di gelas baru, siram serbuk dengan 1 sendok makan cuka. Buih gas CO_2 menandakan karbonat atau bikarbonat.
5. Teteskan air kubis ungu ke larutan jernih: hijau kebiruan berarti basa (soda kue); tetap ungu berarti netral.
6. Gula dan garam masih sama-sama netral dan larut? Minta orang dewasa memanaskan sedikit masing-masing di sendok logam: gula meleleh dan menjadi karamel cokelat, garam tidak berubah.

Keselamatan: jangan mencicipi atau menghirup serbuk apa pun, meskipun kamu "yakin" itu gula. Pemanasan hanya dilakukan orang dewasa dengan penjepit, jauh dari benda mudah terbakar. Iodin menodai kain, jadi pakai alas koran. Cuci tangan dan semua alat, lalu buang larutan ke wastafel dengan air mengalir.

Pertanyaan: Uji mana yang paling menentukan untuk setiap serbuk? Mengapa uji air saja tidak cukup untuk membedakan gula dan garam?

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 39 dalam 3 menit

☑ Kamu sekarang bisa...

- mengidentifikasi **kation, anion, dan gas** dengan uji nyala, NaOH, amonia, perak nitrat, barium klorida, dan uji gas
- menghitung kadar zat dengan **gravimetri** (menimbang endapan) dan **volumetri** (titrasi)
- memakai **hukum Beer–Lambert** dan kurva kalibrasi untuk menentukan konsentrasi larutan berwarna
- membaca **spektrum IR**, **spektrum massa** (ion molekul, fragmen, pola isotop Cl dan Br), dan **^{1}H NMR** (pergeseran kimia, integrasi, aturan n+1)
- menggabungkan **IHD** dan semua bukti spektrum untuk **menentukan struktur** molekul

🔑 Istilah kunci

Analisis kualitatif · Analisis kuantitatif · endapan hidroksida · gravimetri · faktor gravimetri · volumetri · warna komplementer · spektrofotometer · transmitans · absorbans · absorptivitas molar · kurva kalibrasi · inframerah · bilangan gelombang · daerah sidik jari

Ion molekul

Rumus penting

$$\%\,\mathrm{Cl} = \frac{m_{\mathrm{AgCl}} \times \dfrac{35{,}5}{143{,}5}}{m_{\mathrm{sampel}}} \times 100\%$$

Kadar klorida dari endapan AgCl. Timbang endapan perak klorida, ambil bagian massa klorinnya, lalu bandingkan dengan massa sampel.

$$A = \varepsilon\, b\, c$$

Hukum Beer–Lambert. Makin kuat daya serap zat, makin tebal kuvet, dan makin pekat larutannya, makin banyak cahaya yang ditelan.

$$\mathrm{IHD} = \frac{2C + 2 + N - H - X}{2}$$

Indeks kekurangan hidrogen (IHD). Bandingkan jumlah H molekulmu dengan senyawa jenuh rantai terbuka: setiap pasang H yang hilang berarti satu ikatan π atau satu cincin.

Jangan sampai terjebak

- Pilih asam yang tidak "menyelundupkan" ion yang sedang diuji.
- Pereaksi uji ion bukan bahan dapur.
- Puncak tertinggi spektrum massa tidak selalu ion molekul!

Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=39

Teka-teki penutup: kembali ke Bab 1

Sekarang kamu bisa membaca "bahasa" materi: warna nyala, endapan, cahaya yang ditelan, pecahan molekul, dan bisikan inti hidrogen. Kembali ke dapur di Bab 1. Berapa banyak reaksi yang bisa kamu sebutkan sekarang, lengkap dengan persamaan setaranya, dan bagaimana kamu akan membuktikan setiap hasil reaksinya?

▼ Intip petunjuk

Mulailah dari kompor: pembakaran LPG ($\mathrm{C_3H_8 + 5\,O_2 \longrightarrow 3\,CO_2 + 4\,H_2O}$), lalu soda kue di adonan martabak, gula yang menjadi karamel, cuka yang melarutkan kerak kapur, kunyit yang berubah merah di air sabun, tempe yang difermentasi, dan besi wajan yang berkarat. Untuk setiap reaksi, tantang dirimu: gas apa yang keluar dan bagaimana mengujinya? Lalu buka **Bank Soal** di daftar isi dan uji dirimu dari Lv 1 sampai Lv 6. Selamat, Detektif Molekul. Petualanganmu baru dimulai!

ALAT BELAJAR

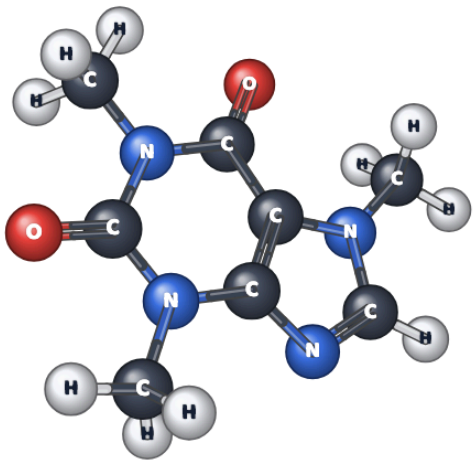
Galeri Molekul 3D

Lebih dari 130 molekul dan kristal yang bisa kamu putar: dari air dan amonia, bentuk-bentuk VSEPR, kisi garam dapur dan intan, sampai molekul rempah Nusantara seperti kafein kopi Gayo, kurkumin kunyit, dan eugenol cengkeh.

CARA MEMAKAI

Seret untuk memutar, **ketuk dua atom** untuk mengukur panjang ikatan, lalu **atom ketiga** untuk mengukur sudut. Nyalakan **pasangan elektron bebas** dan **panah dipol** untuk melihat mengapa molekul bengkok atau polar. Ganti model menjadi **isi ruang** untuk melihat "ukuran sebenarnya" atom-atomnya.

MOLEKUL 3D **Galeri Molekul**



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Kafein $C_8H_{10}N_4O_2$ Mr ≈ 194,19 PubChem ↗

Stimulan pada kopi Gayo, Toraja, dan Kintamani, juga pada teh. Membuat mata melek dengan menghalangi adenosin.

Cari molekul... (mis. kafein, cuka, gula)

139 model molekul & kristal · koordinat 3D dari PubChem (NIH)

Molekul dasar & anorganik

Hidrogen · Air · Amonia · Metana · Karbon dioksida · Oksigen · Nitrogen · Ozon · Karbon monoksida · Hidrogen klorida · Hidrogen fluorida · Klorin · Hidrogen peroksida · Hidrogen sulfida · Belerang dioksida · Belerang trioksida · Dinitrogen oksida · Hidrogen sianida · Asam sulfat · Asam nitrat · Asam fosfat · Urea

Bentuk VSEPR (dengan pasangan elektron bebas)

Berilium klorida (gas) · Boron trifluorida · Metana (VSEPR) · Amonia (VSEPR) · Air (VSEPR) · Belerang dioksida (VSEPR) · Fosforus triklorida · Fosforus pentaklorida · Belerang tetrafluorida · Klorin trifluorida · Xenon difluorida · Ion triiodida · Belerang heksafluorida · Bromin pentafluorida · Xenon tetrafluorida

Kisi & struktur raksasa

Kisi natrium klorida (NaCl) · Intan (kisi kovalen raksasa) · Grafit (lapisan heksagonal) · Grafena (satu lapisan) · Fulerena C_{60} (bola sepak molekuler)

Hidrokarbon

Etana · Etena (etilena) · Etuna (asetilena) · Propana · Butana (n-butana) · Isobutana (2-metilpropana) · Propena · cis-2-Butena · trans-2-Butena · n-Oktana · Isooktana (2,2,4-trimetilpentana) · Heksana · Sikloheksana · Benzena · Toluena · Naftalena

Gugus fungsi & sehari-hari

Metanol · Etanol · Dimetil eter · 1-Propanol · 2-Propanol (isopropil alkohol) · Gliserol (gliserin) · Fenol · Formaldehida · Asetaldehida (etanal) · Aseton (propanon) · Asam formiat · Asam asetat · Etil asetat · Isoamil asetat · Etil butirat · Metilamina · Kloroetana · Diklorometana · Kloroform · Karbon tetraklorida · Bromometana · 2-Bromobutana · t-Butil bromida · Asam laktat · Asam sitrat · Asam oksalat · Asam benzoat · Asam askorbat (vitamin C) · Asam glutamat · Dimetil sulfoksida (DMSO)

Rempah & aroma Nusantara

Kafein · Teobromin · Kapsaisin · Kurkumin · Gingerol · Eugenol · Vanilin · Sinamaldehida · Piperin · Miristisin · Sitral · Geraniol · Patchoulol · Mentol · Alisin

Limonena | 2-Asetil-1-pirolina | Beta-karoten

Molekul kehidupan

Glukosa (β-D-glukosa) | Fruktosa | Sukrosa | Glisin | L-Alanin | L-Sistein | L-Triptofan

Adenin (A) | Timin (T) | Guanin (G) | Sitosin (C) | Urasil (U) | Asam palmitat | Asam oleat

Kolesterol | ATP (adenosin trifosfat)

Obat, polimer & lingkungan

Aspirin (asam asetilsalisilat) | Asam salisilat | Metil salisilat | Parasetamol | Ibuprofen

Vinil klorida | Stirena | Isoprena | Tetrafluoroetena | Kaprolaktam | Asam tereftalat

Etilen glikol | Freon-12 (CCl_2F_2) | MTBE | TNT (trinitrotoluena) | Nitrogliserin

Koordinat 3D molekul organik berasal dari konformer PubChem (NIH) yang dihitung dengan model gaya medan MMFF94, sehingga panjang ikatan dan sudut yang kamu ukur bisa berbeda beberapa pikometer atau derajat dari data eksperimen. Bentuk VSEPR, kisi NaCl, intan, grafit, grafena, dan C_{60} dibangkitkan dari geometri ideal. Panah dipol adalah perkiraan dari selisih keelektronegatifan.

ALAT BELAJAR

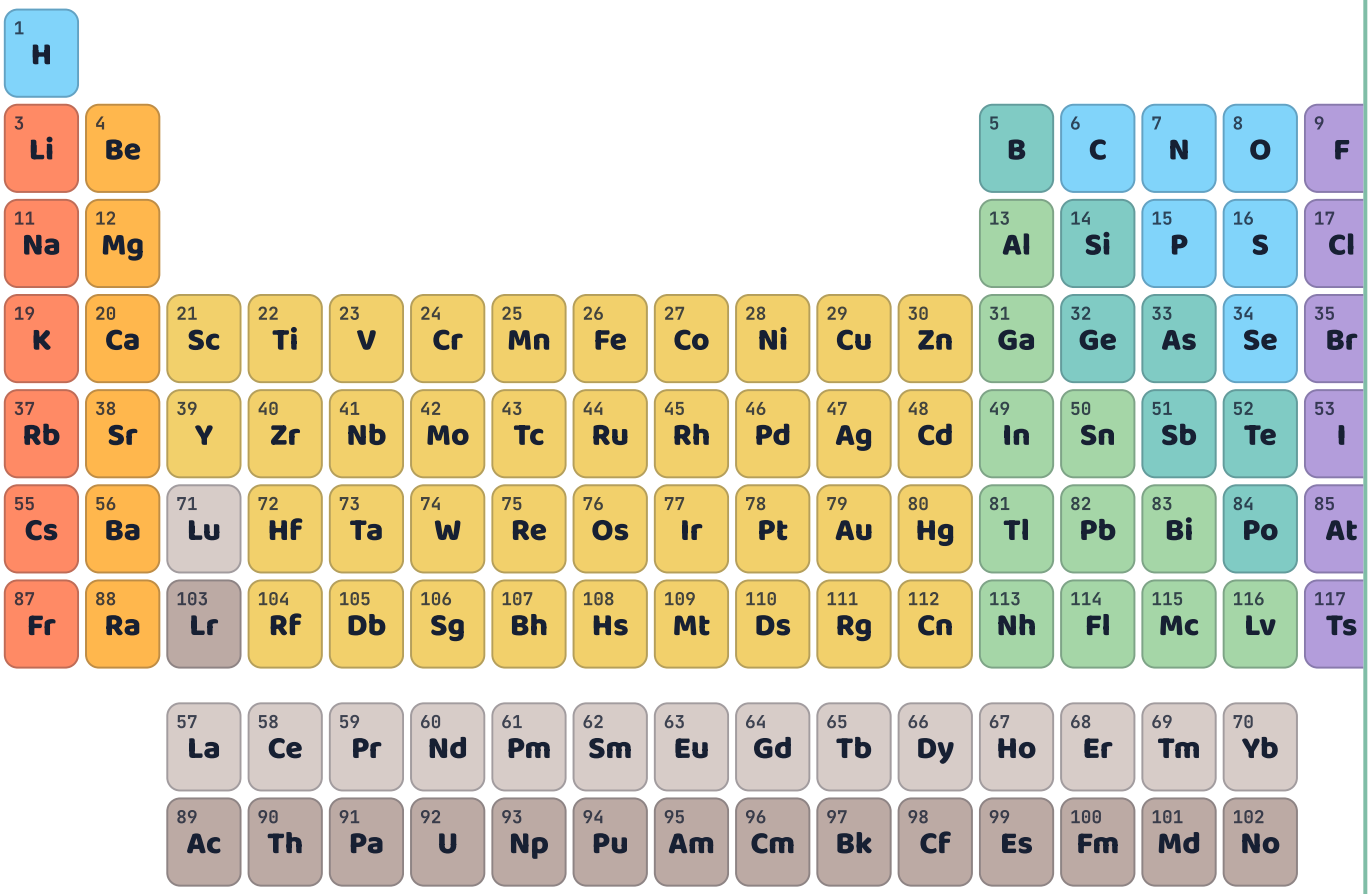
Tabel Periodik Hidup

118 unsur dengan kartu lengkap: model atom Bohr yang berputar, diagram orbital, sifat periodik, dan fakta Nusantara. Warnai tabel menurut sifatnya untuk menemukan pola sendiri.

TABEL PERIODIK HIDUP **Ketuk unsur untuk melihat kartunya**

Warnai menurut Kategori

Cari unsur (nama/lambang/nomor)...



Logam alkali · Logam alkali tanah · Logam transisi · Logam pascatransisi · Metaloid · Nonlogam · Halogen · Gas mulia · Lantanida · Aktinida

Coba pilih **Wujud pada suhu tertentu**, lalu geser suhunya dari 0 K sampai 6000 K. Unsur mana yang pertama mencair? Mana yang paling lama tetap padat? Lalu pilih **Keelektronegatifan**: ke arah mana warnanya makin merah?

MEMBACA WARNA

Mode angka (keelektronegatifan, jari-jari, energi ionisasi, titik leleh, massa jenis) memakai skala biru → hijau → kuning → merah dari nilai terkecil ke terbesar. Kotak abu-abu berarti datanya belum tersedia (biasanya unsur buatan yang sangat tidak stabil).

TABEL PERIODIK NUSANTARA

Pilih **Tambang Nusantara** untuk menyorot unsur yang ditambang atau diolah di Indonesia: nikel Sulawesi, timah Bangka, emas dan tembaga Papua, bauksit Kalimantan, belerang Ijen, dan lainnya.

Sumber data: PubChem (NIH). Massa atom relatif memakai nilai standar IUPAC yang diringkas; kartu juga menampilkan nilai bulat yang lazim di buku sekolah. Jari-jari yang ditampilkan adalah jari-jari van der Waals. Lu dan Lr ditempatkan di golongan 3 sesuai rekomendasi IUPAC; La–Yb dan Ac–No berada di baris blok f.

ALAT BELAJAR

Peta Rumus & Koleksi Kartu

Semua Rumus Hidup di buku ini, dikelompokkan per bagian. Rumus yang sudah kamu taklukkan berubah menjadi kartu koleksi berwarna.

TRIK KAK TIRTA

Rumus kimia bukan mantra untuk dihafal. Setiap rumus adalah **kalimat** tentang partikel. Coba baca kalimat di bawah setiap kartu dengan suara keras. Kalau kamu bisa menceritakan rumusnya dengan bahasamu sendiri, kamu sudah paham.

Koleksimu: **0/144** kartu rumus. Buka bab, mainkan Rumus Hidup, lalu jawab "🎯 Tantang aku" untuk mendapatkan kartunya.

Bagian A · Dunia Kimia

Bab 1 · #1

Massa jenis: tenggelam atau mengapung?

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Massa jenis adalah seberapa banyak massa yang dijejalkan ke dalam setiap sentimeter kubik.

Bab 1 · #2

Persentase massa: seberapa manis es tehmu?

$$\%\,\text{gula} = \frac{m_{\text{gula}}}{m_{\text{gula}} + m_{\text{air}}} \times 100\%$$

Bagian massa gula dari seluruh massa minuman, dinyatakan per seratus.

Bab 2 · #3

Kalor untuk menaikkan suhu

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Kalor = massa × kalor jenis × kenaikan suhu. Zat dengan kalor jenis besar, seperti air, 'malas' menjadi panas.

Bab 2 · #4

Kalor untuk berubah wujud

$$Q = m \times L$$

Saat berubah wujud suhunya tetap. Kalor yang dibutuhkan = massa × kalor laten.

Bab 2 · #5

Kelajuan rata-rata partikel gas

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3\,R\,T}{M}}$$

Makin panas, makin cepat; makin berat partikelnya, makin lambat.

Bab 3 · #6

Persen perolehan (rendemen)

$$\%\,\text{perolehan} = \frac{m_{\text{diperoleh}}}{m_{\text{awal}}} \times 100\%$$

Berapa bagian zat yang berhasil kita selamatkan dari campuran, dinyatakan dalam persen.

Bab 3 · #7

Garam dari air laut

$$m_{\mathrm{NaCl}} = V \times \rho \times \frac{w}{100}$$

Massa garam = volume air laut × massa jenisnya × kadar NaCl-nya.

Bab 3 · #8

Nilai Rf

$$R_f = \frac{d_{\mathrm{noda}}}{d_{\mathrm{pelarut}}}$$

Seberapa jauh noda ikut berlari, dibandingkan dengan jarak yang ditempuh pelarut.

Bab 3 · #9

Sisa zat setelah ekstraksi bertahap

$$\%\,\mathrm{sisa} = \left(\frac{V_a}{V_a + K\,V_o/n}\right)^{n} \times 100\%$$

Pelarut yang sama, dibagi menjadi beberapa kali ekstraksi kecil, menarik lebih banyak zat daripada sekali ekstraksi besar.

Bab 4 · #10

Celsius ke kelvin

$$T = t + 273{,}15$$

Suhu kelvin sama dengan suhu Celsius ditambah 273,15. Skala kelvin dimulai dari nol mutlak, sehingga tidak pernah negatif.

Bab 4 · #11

Kadar dalam ppm (bagian per sejuta)

$$\mathrm{ppm} = \frac{m_{\mathrm{zat}}\ (\mathrm{mg})}{m_{\mathrm{campuran}}\ (\mathrm{kg})}$$

Berapa miligram zat terdapat di setiap kilogram campuran. Untuk air encer, 1 kg ≈ 1 L, jadi 1 ppm ≈ 1 mg/L.

Bab 4 · #12

Persentase ketidakpastian

$$\%\,\mathrm{ketidakpastian} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

Ketidakpastian alat tetap, tetapi persentasenya mengecil bila yang diukur makin besar. Karena itu titrasi dirancang agar volume titran sekitar 20–25 mL.

Bab 4 · #13

Galat relatif (%)

$$\mathrm{galat} = \frac{|x_{\mathrm{ukur}} - x_{\mathrm{benar}}|}{x_{\mathrm{benar}}} \times 100\%$$

Seberapa jauh hasilmu meleset dari nilai sebenarnya, dalam persen. Makin kecil galatnya, makin tepat (akurat) pengukuranmu.

Bab 4 · #14

Massa jenis

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Massa jenis adalah massa setiap satu satuan volume: berapa gram 'dijejalkan' ke dalam setiap sentimeter kubik.

Bagian B · Atom & Tabel Periodik

Bab 5 · #1

Energi elektron pada tingkat Bohr

$$E_n = -\frac{13{,}6\ Z^2}{n^2}\ \text{eV}$$

Makin jauh tingkatnya dari inti (n makin besar), energinya makin mendekati nol: elektron makin longgar terikat.

Bab 5 · #2

Panjang gelombang foton dari selisih energi

$$\lambda = \frac{h\,c}{\Delta E}$$

Makin besar lompatan energi elektron, makin pendek gelombang cahaya yang dilepaskan: dari merah ke ungu, lalu ultraviolet.

Bab 5 · #3

Kalau inti atom diperbesar...

$$D_{\text{atom}} = d_{\text{inti}} \times k$$

Diameter atom kira-kira puluhan ribu kali diameter intinya. Perbesar intinya, lalu lihat seberapa luas 'rumah' elektronnya.

Bab 6 · #4

Proton, neutron, elektron dari notasi

$$n = A - Z \qquad e = Z - q$$

Nomor atom memberi jumlah proton. Nomor massa dikurangi nomor atom memberi jumlah neutron. Elektron sama dengan proton dikurangi muatan ion.

Bab 6 · #5

Ar dari massa satu atom

$$A_r = \frac{m_{\text{atom}}}{1{,}6605 \times 10^{-24}\ \text{g}}$$

Ar menjawab pertanyaan: satu atom unsur ini berapa kali lebih berat daripada seperdua belas atom karbon-12?

Bab 6 · #6

Ar rata-rata dua isotop

$$A_r = \frac{m_1\,p_1 + m_2\,(100 - p_1)}{100}$$

Massa atom relatif adalah rata-rata berbobot: setiap massa isotop dikali persen kelimpahannya, dijumlahkan, lalu dibagi 100.

Bab 6 · #7

Energi ikat per nukleon dari defek massa

$$\frac{E_{\text{ikat}}}{A} = \frac{\Delta m \times 931{,}5\ \text{MeV}}{A}$$

Setiap 1 u massa yang 'hilang' saat inti terbentuk berubah menjadi 931,5 MeV energi pengikat. Bagi dengan jumlah nukleon untuk melihat seberapa kokoh inti itu.

Bab 7 · #8

Kapasitas kulit elektron

$$N_{\text{maks}} = 2\,n^2$$

Kulit ke-n menampung paling banyak dua kali kuadrat nomor kulitnya.

Bab 7 · #9

Orbital dan elektron dalam satu subkulit

$$e_{\text{maks}} = 2\,(2l + 1)$$

Subkulit dengan bilangan kuantum azimut l punya 2l + 1 orbital; setiap orbital memuat dua elektron.

Bab 7 · #10

Momen magnet spin-saja

$$\mu = \sqrt{n\,(n+2)}\;\mu_B$$

Makin banyak elektron tak berpasangan, makin kuat atom atau ion itu tertarik magnet.

Bab 8 · #11

Hukum Moseley: sidik jari sinar-X

$$f = 2{,}47 \times 10^{15}\ \text{Hz} \times (Z - 1)^2$$

Frekuensi sinar-X garis Kα setiap unsur naik teratur sebanding dengan kuadrat (Z – 1), sehingga nomor atom bisa dibaca dari 'cahaya' unsur itu.

Bab 8 · #12

Muatan inti efektif (aturan sederhana)

$$Z_{ef} = Z - S$$

Tarikan bersih yang dirasakan elektron terluar sama dengan jumlah proton dikurangi perisai dari elektron di sebelah dalamnya.

Bab 8 · #13

Perkiraan jari-jari atom (model ala Bohr)

$$r \approx 52{,}9\ \text{pm} \times \frac{n^2}{Z_{ef}}$$

Kulit yang lebih tinggi membuat atom membengkak, sedangkan muatan inti efektif yang besar menciutkannya.

Bab 9 · #14

Kadar logam dalam mineral bijih

$$\%\,\text{logam} = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Dari rumus mineralnya, kita tahu berapa bagian massanya yang benar-benar logam.

Bab 9 · #15

Massa logam dari bijih (dengan rendemen)

$$m_{\text{logam}} = m_{\text{bijih}} \times \frac{w}{100} \times \frac{\eta}{100}$$

Logam yang didapat sama dengan massa bijih dikali kadar logamnya, lalu dikali rendemen (persen keberhasilan) prosesnya.

Bab 9 · #16

Aluminium dari satu sel elektrolisis

$$m_{\text{Al}} = \frac{I \times t \times 27}{3 \times 96\,485} \times \frac{\eta}{100}$$

Makin besar arus dan makin lama waktunya, makin banyak elektron yang mengubah ion aluminium menjadi logam; tiga elektron untuk setiap atom Al.

Bab 9 · #17

Pembelahan medan kristal dari warna yang diserap

$$\Delta_o = \frac{N_A\,h\,c}{\lambda}$$

Makin pendek panjang gelombang cahaya yang diserap, makin besar celah energi antara orbital d bawah dan atas.

Bagian C · Ikatan & Wujud Zat

Bab 10 · #1

Silang muatan: berapa kation dan anion?

$$x : y = \frac{b}{\text{FPB}} : \frac{a}{\text{FPB}}$$

x kation dan y anion: x sama dengan besar muatan anion, y sama dengan besar muatan kation, lalu keduanya dibagi FPB (faktor persekutuan terbesar) dari a dan b.

Bab 10 · #2

Gaya tarik antarion (hukum Coulomb)

$$\frac{F}{F_{\text{NaCl}}} = \frac{q_+\, q_-}{1 \times 1} \left(\frac{282\ \text{pm}}{r} \right)^2$$

Muatan dua kali lebih besar, tarikan dua kali lebih kuat. Jarak dua kali lebih jauh, tarikan tinggal seperempat.

Bab 10 · #3

Energi kisi dari siklus Born–Haber

$$U = \Delta H_f^\circ - \left(\Delta H_{at}^M + E_i + \Delta H_{at}^X + E_{ae} \right)$$

Energi kisi sama dengan entalpi pembentukan dikurangi jumlah semua langkah memutar dari unsur menjadi ion-ion gas.

Bab 10 · #4

Perkiraan energi kisi (Kapustinskii)

$$|U| \approx 1{,}2025 \times 10^5 \, \frac{\nu \, z_+ \, z_-}{r} \left(1 - \frac{34{,}5}{r} \right)$$

Makin banyak ion, makin besar muatannya, dan makin pendek jaraknya, makin besar energi kisinya.

Bab 11 · #5

Jumlah ikatan dari kebutuhan dan ketersediaan elektron

$$\text{ikatan} = \frac{N - A}{2}, \qquad N = 8\, n_X + 2\, n_H$$

Elektron yang dibutuhkan semua atom dikurangi elektron yang tersedia adalah elektron yang harus dipakai berdua; setiap ikatan memakai dua.

Bab 11 · #6

Selisih keelektronegatifan → jenis ikatan

$$\%\,\text{ion} \approx \left(1 - e^{-(\chi_B - \chi_A)^2/4} \right) \times 100\%$$

Makin jauh beda kekuatan tarik kedua atom, makin berat sebelah pasangan elektronnya, sampai elektron praktis berpindah dan ikatannya menjadi ion.

Bab 11 · #7

Muatan formal

$$MF = V - N - \frac{B}{2}$$

Muatan formal = elektron valensi atom bebas dikurangi elektron yang menjadi miliknya di dalam molekul: semua elektron bebasnya ditambah separuh elektron ikatannya.

Bab 12 · #8

Jumlah domain elektron atom pusat

$$D = \tfrac{1}{2} \left(V + L - q \right)$$

Elektron valensi atom pusat ditambah sumbangan atom tetangga, dikurangi muatan ion, lalu dibagi dua: itulah banyaknya 'balon' di sekitar atom pusat. Kurangi dengan jumlah atom terikat untuk mendapatkan pasangan bebas.

Bab 12 · #9

Dipol bersih molekul tiga atom

$$\mu_{\text{bersih}} = 2\,\mu_{\text{ikatan}}\,\cos\frac{\theta}{2}$$

Dua panah dipol ikatan yang sama besar dijumlahkan. Makin lebar sudut di antara keduanya, makin banyak yang saling meniadakan. Pada 180°, hasilnya nol.

Bab 12 · #10

Sudut antara dua orbital hibrida sp^n

$$\cos\theta = -\frac{1}{n}$$

Makin banyak 'rasa p' dalam orbital hibrida (n makin besar), makin sempit sudut di antara orbital-orbitalnya. sp memberi 180°, sp^2 memberi 120°, sp^3 memberi 109,5°.

Bab 12 · #11

Orde ikatan dari teori orbital molekul

$$\text{orde} = \tfrac{1}{2}\left(n_{\text{ikatan}} - n_{\text{antiikatan}}\right)$$

Setiap pasangan elektron di orbital ikatan menambah 'separuh lem dua kali', setiap pasangan di orbital antiikatan mengurangi. Orde ikatan 0 berarti molekul tidak terbentuk.

Bab 13 · #12

Titik didih alkana rantai lurus (perkiraan)

$$T_b \approx 745{,}42\,\log(n + 4{,}4) - 689{,}46$$

Setiap tambahan satu atom C memperpanjang 'sosis' molekul sehingga gaya London bertambah; tambahannya makin lama makin kecil.

Bab 13 · #13

Bagian es yang menyembul

$$f = \left(1 - \frac{\rho_{\text{es}}}{\rho_{\text{cair}}}\right) \times 100\%$$

Benda yang mengapung tercelup sebanyak perbandingan massa jenisnya dengan cairan; sisanya menyembul di atas permukaan.

Bab 13 · #14

Energi untuk menguapkan zat

$$Q = n\,\Delta H_{\text{vap}} = \frac{m}{M_r} \times \Delta H_{\text{vap}}$$

Energi penguapan = banyaknya mol molekul yang harus dilepas dari gandengannya dikali energi pelepasan per mol.

Bab 14 · #15

Hukum gas gabungan: kemasan keripik naik gunung

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Untuk sejumlah gas yang sama, P kali V dibagi T selalu bernilai sama, ke mana pun gas itu dibawa.

Bab 14 · #16

Gas ideal: berapa tekanannya?

$$P = \frac{n\,R\,T}{V}$$

Tekanan gas sebanding dengan banyaknya partikel dan suhunya, tetapi berbanding terbalik dengan volume wadahnya.

Bab 14 · #17

Tekanan parsial oksigen penyelam

$$p_{O_2} = \frac{\%O_2}{100} \times \left(1 + \frac{h}{10}\right)$$

Setiap turun 10 m di laut, tekanan bertambah ±1 atm, dan bagian oksigen dari tekanan itu ikut naik.

Bab 14 · #18

Hukum Graham: siapa yang kabur lebih cepat?

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

Gas yang molekulnya lebih ringan berefusi lebih cepat; lajunya berbanding terbalik dengan akar massa molarnya.

Bab 14 · #19

Kecepatan rms molekul gas

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Molekul makin cepat bila suhunya tinggi dan makin lambat bila molekulnya berat. Ingat: M dalam kg/mol!

Bagian D · Stoikiometri

Bab 15 · #1

Jumlah atom dalam rumus

$$N = k \times p \times q$$

Jumlah atom suatu unsur sama dengan koefisien dikali indeks di luar kurung dikali indeks di dalam kurung.

Bab 15 · #2

Bilangan oksidasi dari jumlah nol

$$x = \frac{q - a\,(+1) - b\,(-2)}{n}$$

Biloks unsur yang dicari sama dengan muatan total dikurangi sumbangan H dan sumbangan O, lalu dibagi jumlah atom unsur itu.

Bab 15 · #3

Silang muatan: berapa ion yang dibutuhkan?

$$x = \frac{b}{\text{FPB}(a,\,b)}, \qquad y = \frac{a}{\text{FPB}(a,\,b)}$$

Jumlah kation (x) adalah besar muatan anion, dan jumlah anion (y) adalah besar muatan kation, setelah keduanya dibagi faktor persekutuan terbesarnya.

Bab 16 · #4

Ke mana perginya massa kayu?

$$m_{\text{gas}} = m_{\text{kayu}} + m_{O_2} - m_{\text{abu}}$$

Massa sebelum sama dengan massa sesudah. Gas tak terlihat yang terbang ke udara membawa hampir seluruh massa kayu, ditambah oksigen yang diambil dari udara.

Bab 16 · #5

Membuat air: hidrogen dan oksigen selalu 1 : 8

$$m_{\mathrm{H_2O}} = 9 \times \min\left(m_{\mathrm{H}},\ \frac{m_{\mathrm{O}}}{8}\right)$$

Setiap 1 gram hidrogen bergabung dengan tepat 8 gram oksigen menjadi 9 gram air. Pereaksi yang kelebihan tidak ikut bereaksi; ia tersisa.

Bab 16 · #6

Volume gas dari koefisien (Gay-Lussac)

$$V_{\text{dicari}} = \frac{k_{\text{dicari}}}{k_{\text{diketahui}}} \times V_{\text{diketahui}}$$

Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas berbanding lurus dengan koefisiennya dalam persamaan setara.

Bab 17 · #7

Jumlah partikel dari mol

$$N = n \times N_A$$

Jumlah partikel sama dengan banyaknya 'kotak mol' dikali isi setiap kotak.

Bab 17 · #8

Mol dari massa

$$n = \frac{m}{M_r}$$

Jumlah mol = massa yang ditimbang dibagi massa satu mol.

Bab 17 · #9

Volume gas pada STP

$$V = n \times 22{,}4$$

Setiap mol gas pada 0 °C dan 1 atm memakan tempat 22,4 liter, kira-kira sebanyak isi galon air isi ulang.

Bab 17 · #10

Kadar unsur dalam senyawa

$$\%X = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Bagian massa yang 'disumbangkan' unsur X dari seluruh massa molar.

Bab 18 · #11

Massa produk dari massa pereaksi

$$m_B = \frac{m_A}{M_A} \times \frac{b}{a} \times M_B$$

Ubah massa A ke mol, kalikan dengan perbandingan koefisien (resepnya), lalu ubah mol B kembali ke massa.

Bab 18 · #12

Pereaksi pembatas: bagi dengan koefisien

$$n_{\text{produk}} = c \times \min\left(\frac{n_A}{a},\ \frac{n_B}{b}\right)$$

Hitung berapa kali 'resep' bisa dijalankan oleh setiap pereaksi. Yang paling sedikit menentukan jumlah produk.

Bab 18 · #13

Rendemen (persen hasil)

$$\%\ \text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{m_{\text{teoretis}}} \times 100\%$$

Dari setiap 100 bagian produk yang seharusnya terbentuk, berapa bagian yang benar-benar kamu dapatkan?

Bab 18 · #14

Ekonomi atom

$$\%\ \text{EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{pereaksi}}} \times 100\%$$

Dari semua atom yang kita masukkan, berapa persen yang benar-benar menjadi produk yang kita inginkan?

Bagian E · Energi, Laju & Kesetimbangan

Bab 19 · #1

Kalor yang diserap atau dilepas zat

$$q = m \times c \times \Delta T$$

Kalor sama dengan massa dikali kalor jenis dikali perubahan suhu. Zat yang banyak dan 'sulit panas' membutuhkan kalor besar.

Bab 19 · #2

ΔH reaksi dari data kalorimeter

$$\Delta H = -\frac{m \times 4{,}18 \times \Delta T}{n}$$

Kalor yang diterima larutan berasal dari reaksi, jadi tandanya dibalik, lalu dibagi jumlah mol zat yang bereaksi.

Bab 19 · #3

ΔH pembakaran metana dari energi ikatan

$$\Delta H = \underbrace{4E_{\mathrm{C-H}} + 2E_{\mathrm{O=O}}}_{\text{diputus}} - \underbrace{\left(2E_{\mathrm{C=O}} + 4E_{\mathrm{O-H}}\right)}_{\text{dibentuk}}$$

Energi untuk memutus semua ikatan pereaksi dikurangi energi yang dilepas saat ikatan produk terbentuk.

Bab 19 · #4

Nilai kalor bahan bakar

$$\text{nilai kalor} = \frac{|\Delta H_c|}{M_r}$$

Berapa kilojoule yang didapat dari setiap gram bahan bakar yang terbakar sempurna.

Bab 20 · #5

Entropi gas yang memuai

$$\Delta S = n\,R\,\ln\frac{V_2}{V_1}$$

Saat volume gas membesar, setiap partikel punya lebih banyak tempat, sehingga banyaknya cara W melonjak dan entropi naik.

Bab 20 · #6

Energi bebas Gibbs

$$\Delta G = \Delta H - T\,\Delta S$$

Perubahan energi bebas sama dengan perubahan entalpi dikurangi suhu mutlak kali perubahan entropi. Hasil negatif berarti proses spontan.

Bab 20 · #7

Suhu peralihan

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

Suhu ketika ΔG tepat nol: di sini hakim entalpi dan hakim entropi seimbang.

Bab 20 · #8

Tetapan kesetimbangan dari ΔG°

$$K = e^{-\Delta G^\circ/(RT)}$$

Makin negatif ΔG°, makin besar K: produk makin disukai ketika kesetimbangan tercapai.

Bab 21 · #9

Aturan kenaikan suhu (perkiraan cepat)

$$t_2 = \frac{t_1}{n^{(T_2 - T_1)/10}}$$

Setiap suhu naik 10 °C, laju menjadi n kali, sehingga waktu reaksinya menjadi 1/n kali.

Bab 21 · #10

Persamaan laju

$$v = k\,[\mathrm{A}]^m\,[\mathrm{B}]^n$$

Laju sama dengan tetapan laju dikali konsentrasi setiap pereaksi yang dipangkatkan ordenya.

Bab 21 · #11

Peluruhan orde satu

$$[\mathrm{A}]_t = [\mathrm{A}]_0\, e^{-k\,t}$$

Pada reaksi orde satu, dalam selang waktu yang sama selalu hilang persentase yang sama, bukan jumlah yang sama.

Bab 21 · #12

Sisa obat dalam darah

$$C = C_0\,\left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Setiap lewat satu waktu paruh, kadar obat tinggal separuhnya.

Bab 21 · #13

Persamaan Arrhenius (dua suhu)

$$\frac{k_2}{k_1} = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right]$$

Makin besar energi aktivasi, makin peka laju terhadap perubahan suhu.

Bab 22 · #14

Hukum aksi massa: Kc (atau Q) pabrik amonia

$$K_c = \frac{[\mathrm{NH_3}]^2}{[\mathrm{N_2}]\,[\mathrm{H_2}]^3}$$

Konsentrasi produk dipangkatkan koefisiennya di atas, konsentrasi pereaksi dipangkatkan koefisiennya di bawah. Dengan konsentrasi setimbang hasilnya Kc; dengan konsentrasi sembarang hasilnya Q.

Bab 22 · #15

Kp dari Kc

$$K_p = K_c\,(RT)^{\Delta n}$$

Ubah 'bahasa konsentrasi' menjadi 'bahasa tekanan' dengan faktor RT yang dipangkatkan selisih mol gas.

Bab 22 · #16

Hasil ICE: berapa HI yang terbentuk?

$$K_c = \frac{(2x)^2}{(a - x)(b - x)} \;\Rightarrow\; [\mathrm{HI}] = 2x$$

Masukkan konsentrasi awal H_2 dan I_2 serta Kc. Mesin menyelesaikan persamaan kuadrat dalam x (H_2 yang bereaksi) sehingga hasil baginya tepat sama dengan Kc.

Bab 22 · #17

K dari ΔG°

$$K = e^{-\Delta G^\circ / RT}$$

Semakin negatif ΔG°, semakin besar K: reaksi sangat 'ingin' menuju produk.

Bagian F · Larutan & Asam-Basa

Bab 23 · #1

Hukum Henry: gas larut sebanding tekanannya

$$C = k_H \times P$$

Makin besar tekanan gas di atas cairan, makin banyak gas yang larut, asalkan suhunya tetap.

Bab 23 · #2

ppm dan ppb dalam air

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}}\ (\text{mg})}{V_{\text{air}}\ (\text{L})}$$

Untuk air yang encer, 1 L beratnya ±1 kg, jadi miligram per liter sama dengan bagian per sejuta.

Bab 23 · #3

Molaritas dari massa zat

$$M = \frac{m\ /\ M_r}{V}$$

Molaritas adalah jumlah mol zat terlarut di setiap liter larutan.

Bab 23 · #4

Pengenceran

$$M_1\,V_1 = M_2\,V_2$$

Saat diencerkan, mol zat terlarut tetap; yang bertambah hanya pelarutnya.

Bab 23 · #5

Molalitas dan fraksi mol

$$m = \frac{m_t\ /\ M_r}{p} \times 1000$$

Molalitas adalah mol zat terlarut untuk setiap kilogram pelarut, bukan larutan.

Bab 24 · #6

Hukum Raoult: tekanan uap larutan

$$P = \frac{n_p}{n_p + i\,n_t} \times P^\circ$$

Tekanan uap larutan = bagian pelarut di antara semua partikel × tekanan uap pelarut murni.

Bab 24 · #7

Kenaikan titik didih

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$$

Setiap mol partikel zat terlarut dalam satu kilogram pelarut menaikkan titik didih sebesar Kb derajat.

Bab 24 · #8

Penurunan titik beku larutan dalam air

$$\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p} \cdot i$$

Penurunan titik beku = Kf × molalitas × jumlah partikel per satuan zat.

Bab 24 · #9

Tekanan osmotik

$$\pi = M \cdot R \cdot T \cdot i$$

Tekanan osmotik = konsentrasi partikel × R × suhu mutlak, seperti tekanan gas ideal.

Bab 24 · #10

Faktor van 't Hoff

$$i = 1 + (n - 1)\,\alpha$$

Jumlah partikel dari setiap satuan zat setelah sebagian atau seluruhnya terurai menjadi ion.

Bab 25 · #11

Skala ukuran partikel

$$A = \frac{6000}{\rho\, d}$$

Luas permukaan setiap gram butiran bulat berbanding terbalik dengan diameternya: pecah butir menjadi sepuluh kali lebih kecil, permukaannya sepuluh kali lebih luas.

Bab 25 · #12

Daya penggumpal ion (Hardy–Schulze)

$$c_z \approx \frac{c_1}{z^6}$$

Konsentrasi ion yang cukup untuk menggumpalkan koloid turun drastis bila muatan ionnya naik: ion bermuatan 3 sekitar 729 kali lebih jago daripada ion bermuatan 1.

Bab 25 · #13

Dosis tawas untuk volume air

$$m = \frac{D \times V}{1000}$$

Massa tawas (gram) sama dengan dosis (mg per liter, alias ppm) dikali volume air (liter), lalu dibagi 1000 untuk mengubah miligram menjadi gram.

Bab 26 · #14

pH + pOH = 14

$$\mathrm{pH} = 14 - \mathrm{pOH} = 14 + \log\left[\mathrm{OH^-}\right]$$

H^+ dan OH^- seperti dua ujung jungkat-jungkit: hasil kali keduanya selalu 10^{-14} pada 25 °C. Kalau OH^- naik, H^+ turun, dan pH naik.

Bab 26 · #15

pH asam kuat

$$\mathrm{pH} = -\log\left(a \times C_a\right)$$

Asam kuat melepas semua H^+-nya. Kalikan konsentrasi asam dengan jumlah H^+ per molekul, lalu ambil minus logaritmanya.

Bab 26 · #16

pH asam lemah

$$\left[\mathrm{H^+}\right] \approx \sqrt{K_a \cdot C_a}$$

Asam lemah hanya melepas sebagian kecil H^+. Konsentrasi H^+ kira-kira akar dari Ka dikali konsentrasi asam.

Bab 26 · #17

pH basa lemah

$$\left[\mathrm{OH^-}\right] \approx \sqrt{K_b \cdot C_b}, \qquad \mathrm{pH} = 14 + \log[\mathrm{OH^-}]$$

Basa lemah hanya menarik sedikit H^+ dari air. Hitung dulu OH^- dengan akar Kb kali konsentrasi, lalu ubah ke pH lewat pOH.

Bab 27 · #18

Titrasi: mol H^+ = mol OH^-

$$M_a = \frac{M_b\, V_b\, b}{V_a\, a}$$

Di titik ekuivalen, jumlah H^+ dari asam tepat sama dengan jumlah OH^- dari basa. Volume basa yang terbaca di buret membuka rahasia konsentrasi asam.

Bab 27 · #19

Kadar asam asetat dalam cuka

$$\text{kadar} = \frac{M_b\, V_b}{V_a} \times f_p \times \frac{60}{10}\ \%$$

Molaritas cuka encer dikali faktor pengenceran memberi molaritas cuka asli. Dikali massa molar asam asetat (60 g/mol) lalu dibagi 10, kita dapat gram asam asetat per 100 mL.

Bab 27 · #20

pH garam dari asam lemah + basa kuat

$$[\mathrm{OH^-}] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a}\, C_g} \qquad \mathrm{pH} = 14 + \log[\mathrm{OH^-}]$$

Anion dari asam lemah merebut H^+ dari air dan meninggalkan OH^-. Makin lemah asam induknya (pKa besar), makin basa garamnya.

Bab 27 · #21

Henderson–Hasselbalch: pH larutan penyangga

$$\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a + \log \frac{[\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]}$$

pH penyangga ditentukan oleh pKa asamnya dan perbandingan basa konjugat terhadap asam, bukan oleh banyaknya air.

Bab 28 · #22

Ksp dari kelarutan (garam A_xB_y)

$$K_{sp} = x^{\,x}\; y^{\,y}\; s^{\,x+y}$$

Setiap mol garam yang larut melepas x mol kation dan y mol anion. Kalikan konsentrasi keduanya, masing-masing dipangkatkan koefisiennya.

Bab 28 · #23

Kelarutan garam AB_2 dari Ksp

$$s = \sqrt[3]{\frac{K_{sp}}{4}}$$

Untuk garam yang melepas satu ion dan dua ion pasangannya, Ksp = s × $(2s)^2$ = $4s^3$. Bagi Ksp dengan 4, lalu tarik akar pangkat tiga.

Bab 28 · #24

Qsp setelah dua larutan dicampur ($AgNO_3$ + NaCl)

$$Q_{sp} = \frac{c_1\, V_1}{V_1 + V_2} \times \frac{c_2\, V_2}{V_1 + V_2}$$

Encerkan dulu setiap ion dengan volume total, baru kalikan. Jika hasilnya melewati Ksp AgCl ($1{,}8 \times 10^{-10}$), endapan putih muncul.

Bab 28 · #25

Kelarutan garam AB bila ada ion senama

$$s = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 4K_{sp}}}{2} \approx \frac{K_{sp}}{c}$$

Ion senama yang sudah ada membuat larutan cepat jenuh. Bila c jauh lebih besar daripada s, kelarutan cukup dihitung Ksp dibagi c.

Bagian G · Redoks & Elektrokimia

Bab 29 · #1

Biloks unsur X dalam spesi

$$x = \frac{q - h\,(+1) - o\,(-2)}{n}$$

Biloks X sama dengan muatan spesi dikurangi sumbangan semua H dan O, lalu dibagi jumlah atom X.

Bab 29 · #2

Elektron yang dipindahkan

$$n_e = k \times \left| x_{\text{akhir}} - x_{\text{awal}} \right|$$

Jumlah elektron per satuan rumus sama dengan jumlah atom yang berubah dikali besar perubahan biloksnya.

Bab 29 · #3

Kadar Fe^{2+} dari titrasi permanganat

$$c_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{5 \times c_{\text{MnO}_4^-} \times V_{\text{MnO}_4^-}}{V_{\text{sampel}}}$$

Setiap ion permanganat menerima 5 elektron, cukup untuk mengoksidasi 5 ion besi(II).

Bab 30 · #4

Potensial sel standar

$$E^\circ_{sel} = E^\circ_{katode} - E^\circ_{anode}$$

Tegangan sel sama dengan 'ketinggian' setengah sel katode dikurangi 'ketinggian' setengah sel anode.

Bab 30 · #5

Kapasitas teoretis logam anode

$$Q = \frac{m}{A_r} \times n \times F$$

Muatan yang dapat dilepas = jumlah mol logam × elektron yang dilepas setiap atom × muatan satu mol elektron.

Bab 30 · #6

ΔG° dari E°sel

$$\Delta G^\circ = -n\,F\,E^\circ_{sel}$$

Makin banyak elektron yang dipindahkan dan makin besar tegangannya, makin besar energi bebas yang dilepaskan.

Bab 30 · #7

Persamaan Nernst

$$E_{sel} = E^\circ_{sel} - \frac{R\,T}{n\,F} \ln Q$$

Tegangan sel nyata = tegangan standar dikurangi 'hukuman' karena hasil reaksi sudah menumpuk (Q besar).

Bab 31 · #8

Hukum Faraday: massa endapan

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I\,t}{F}$$

Massa logam yang menempel sama dengan mol elektron (arus kali waktu dibagi 96.485) dibagi elektron per ion, lalu dikali massa satu mol logam.

Bab 31 · #9

Volume gas hasil elektrolisis

$$V = \frac{I\,t}{z\,F} \times V_m$$

Hitung mol elektron, bagi dengan banyaknya elektron untuk membentuk satu molekul gas, lalu kalikan dengan volume satu mol gas.

Bab 31 · #10

Energi listrik untuk 1 kg aluminium

$$W = \frac{3\,F\,V}{A_r \times \eta}$$

Setiap mol Al butuh 3 mol elektron yang didorong dengan tegangan V; bagi dengan efisiensi arus karena sebagian elektron terbuang.

Bagian H · Kimia Karbon & Kehidupan

Bab 32 · #1

Rumus umum alkana

$$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2} \qquad M_r = 12n + (2n+2) = 14n + 2$$

Setiap tambahan satu karbon membawa dua hidrogen, jadi Mr naik 14 setiap kali rantai bertambah satu gugus CH_2.

Bab 32 · #2

Derajat ketidakjenuhan

$$DBE = \frac{2C + 2 - H}{2}$$

Bandingkan jumlah H molekulmu dengan alkana yang jumlah C-nya sama; setiap kekurangan dua H berarti satu ikatan π atau satu cincin.

Bab 32 · #3

Oksigen untuk pembakaran sempurna

$$n_{\mathrm{O_2}} = x + \frac{y}{4}$$

Setiap atom C butuh satu molekul O_2 untuk menjadi CO_2, dan setiap empat atom H butuh satu molekul O_2 untuk menjadi dua H_2O.

Bab 32 · #4

Bilangan oktan campuran

$$ON \approx \frac{V_A\,ON_A + V_B\,ON_B}{V_A + V_B}$$

Oktan campuran kira-kira sama dengan rata-rata oktan kedua bensin, ditimbang menurut volumenya.

Bab 33 · #5

Rumus umum dan Mr deret homolog

$$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2-2u}\mathrm{O}_x \quad \Rightarrow \quad M_r = 14n + 2 - 2u + 16x$$

Setiap tambahan satu gugus –CH_2– menambah Mr sebesar 14; jumlah atom O dan ikatan rangkap C=O menentukan 'keluarga' molekulnya.

Bab 33 · #6

Rendemen esterifikasi

$$\%\,\text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{\dfrac{m_{\text{asam}}}{M_{r,\text{asam}}} \times M_{r,\text{ester}}} \times 100\%$$

Bandingkan ester yang benar-benar kamu tampung dengan ester yang seharusnya terbentuk bila semua asam (pereaksi pembatas) berubah menjadi ester.

Bab 33 · #7

Rendemen setimbang esterifikasi

$$K = \frac{x^2}{(1-x)(r-x)}$$

Satu mol asam dicampur r mol alkohol. Saat setimbang, x mol ester terbentuk; makin banyak alkohol, makin besar x.

Bab 34 · #8

Ekonomi atom

$$\%\,\mathrm{EA} = \frac{M_r \text{ produk yang diinginkan}}{\sum M_r \text{ pereaksi}} \times 100\%$$

Persentase massa atom pereaksi yang benar-benar masuk ke produk yang kita inginkan. Sisanya menjadi produk samping alias limbah.

Bab 34 · #9

Selektivitas klorinasi radikal

$$\%\,\text{produk } 2^\circ = \frac{n_2\, r}{n_1 + n_2\, r} \times 100\%$$

Peluang klorin menempel di karbon sekunder = jumlah H sekunder dikali reaktivitasnya, dibagi total 'tiket undian' semua atom H.

Bab 34 · #10

Hukum laju substitusi nukleofilik

$$r = k\,[\mathrm{RX}]\,[\mathrm{Nu}]^n$$

Laju sebanding dengan konsentrasi haloalkana. Nukleofil hanya ikut menentukan laju bila ia terlibat di tahap paling lambat: n = 1 untuk SN2, n = 0 untuk SN1.

Bab 35 · #11

Derajat polimerisasi

$$n = \frac{M_{\text{polimer}}}{M_{\text{unit ulang}}}$$

Berapa 'gerbong' dalam satu rantai? Bagi massa seluruh rantai dengan massa satu unit ulang.

Bab 35 · #12

Massa molekul polimer adisi

$$M = n \times M_{\text{monomer}}$$

Massa satu rantai polimer adisi sama dengan banyaknya monomer yang bergandengan dikali massa satu monomer, karena tidak ada atom yang hilang.

Bab 35 · #13

Massa rantai polimer kondensasi

$$M = n\,(M_A + M_B) - (2n-1) \times 18$$

Jumlahkan massa semua monomer, lalu kurangi massa air yang lepas: satu molekul air untuk setiap ikatan baru.

Bab 36 · #14

Massa polipeptida

$$M_r = n\,\bar{M} - (n-1) \times 18$$

Jumlahkan massa semua asam amino, lalu kurangi 18 (satu molekul air) untuk setiap ikatan peptida yang terbentuk.

Bab 36 · #15

Energi makanan (angka Atwater)

$$E = 4\,m_K + 4\,m_P + 9\,m_L$$

Setiap gram karbohidrat dan protein memberi sekitar 4 kkal, sedangkan setiap gram lemak memberi sekitar 9 kkal.

Bab 36 · #16

Etanol dan CO_2 dari fermentasi

$$m_{\text{etanol}} = \frac{m_{\text{gula}}}{180} \times 2 \times 46 \times \frac{\eta}{100}$$

Setiap molekul glukosa dipecah ragi menjadi dua molekul etanol dan dua molekul karbon dioksida.

Bagian I · Inti, Lingkungan & Analisis

Bab 37 · #1

Sisa zat radioaktif setelah waktu t

$$N = N_0 \left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Setiap lewat satu waktu paruh, yang tersisa tinggal separuh dari jumlah sebelumnya.

Bab 37 · #2

Umur dari sisa karbon-14

$$t = T_{1/2} \times \frac{\ln\left(100\% \,/\, p\right)}{\ln 2}$$

Hitung berapa kali C-14 sudah 'dibagi dua', lalu kalikan dengan 5.730 tahun.

Bab 37 · #3

Aktivitas sumber radioaktif

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \frac{m}{M} \times N_A$$

Makin banyak inti dan makin pendek waktu paruhnya, makin sering terdengar 'klik' peluruhan setiap detik.

Bab 37 · #4

Energi dari defek massa

$$E = \Delta m \times 931{,}5\ \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

Massa yang 'hilang' dalam reaksi inti berubah menjadi energi. Setiap 1 u massa setara dengan 931,5 MeV.

Bab 37 · #5

Jarak adalah perisai: hukum kuadrat terbalik

$$D_2 = D_1 \times \left(\frac{1\ \text{m}}{r}\right)^2$$

Menjauh dua kali lipat dari sumber titik membuat laju dosis tinggal seperempatnya.

Bab 38 · #6

Dari ppm ke µg/m³ (gas di udara)

$$c = \frac{\text{ppm} \times M_r \times 1000}{24{,}45}$$

Satu ppm berarti satu mililiter gas di setiap meter kubik udara. Ubah mililiter itu menjadi mol, lalu menjadi mikrogram.

Bab 38 · #7

Jejak karbon pembakaran

$$m_{CO_2} = m_{bb} \times w_C \times \frac{44}{12}$$

Setiap 12 gram karbon dalam bahan bakar berubah menjadi 44 gram karbon dioksida. CO_2 lebih berat daripada bahan bakarnya karena 'meminjam' oksigen dari udara.

Bab 38 · #8

ppm, mg/L, dan mol/L di air

$$c = \frac{\text{ppm}}{1000 \times M_r}$$

Di air yang encer, 1 ppm sama dengan 1 mg per liter. Bagi miligram dengan 1000 untuk mendapat gram, lalu bagi dengan massa molar untuk mendapat mol per liter.

Bab 38 · #9

Ekonomi atom: berapa atom yang 'pulang' ke produk?

$$\%\,\mathrm{EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{produk}} + M_{\text{samping}}} \times 100\%$$

Massa semua pereaksi sama dengan massa produk utama ditambah produk samping. Makin kecil produk sampingnya, makin hijau reaksinya.

Bab 39 · #10

Kadar klorida dari endapan AgCl

$$\%\,\mathrm{Cl} = \frac{m_{\mathrm{AgCl}} \times \dfrac{35{,}5}{143{,}5}}{m_{\text{sampel}}} \times 100\%$$

Timbang endapan perak klorida, ambil bagian massa klorinnya, lalu bandingkan dengan massa sampel.

Bab 39 · #11

Hukum Beer–Lambert

$$A = \varepsilon\, b\, c$$

Makin kuat daya serap zat, makin tebal kuvet, dan makin pekat larutannya, makin banyak cahaya yang ditelan.

Bab 39 · #12

Indeks kekurangan hidrogen (IHD)

$$\mathrm{IHD} = \frac{2C + 2 + N - H - X}{2}$$

Bandingkan jumlah H molekulmu dengan senyawa jenuh rantai terbuka: setiap pasang H yang hilang berarti satu ikatan π atau satu cincin.

PENUTUP

Sampai jumpa di reaksi berikutnya!

Glosarium istilah penting, panduan untuk guru dan orang tua, aturan keselamatan, serta informasi tentang buku ini.

Panduan untuk guru & orang tua

- **Mulai dari tebakan.** Minta anak memilih jawaban "Tebak Dulu" *sebelum* membaca. Tebakan yang keliru lalu dibuktikan sendiri jauh lebih melekat daripada jawaban yang langsung diberikan.
- **Tiga tingkat representasi.** Kimia dipahami pada tiga tingkat: **makroskopik** (yang terlihat: warna berubah, gas keluar), **submikroskopik** (atom dan molekul), dan **simbolik** (rumus dan persamaan). Ajak anak berpindah di antara ketiganya. Molekul 3D, Lab Mini, dan Penyetara Reaksi dibuat untuk itu.
- **Biarkan mereka bereksperimen.** Rumus Hidup dan Lab Mini sengaja dibuat untuk diutak-atik. Tanyakan: "Kalau konsentrasinya dijadikan dua kali lipat, apa yang terjadi?" Biarkan mereka menebak, lalu mengecek.
- **Minta penjelasan, bukan hanya jawaban.** Setelah anak menjawab benar, tanyakan "Apa yang terjadi pada partikelnya?" Kemampuan menjelaskan adalah tanda paham yang sesungguhnya.
- **Tangga latihan.** Untuk SD–SMP cukup Lv 1–2. Untuk SMA dan TKA, targetkan Lv 3. Lv 4–5 untuk siswa IGCSE/IB, dan Lv 6 untuk peserta OSN Kimia.
- **LKPD praktikum** memakai bahan dapur dan warung. Bacakan bagian keselamatan sebelum mulai dan dampingi setiap kegiatan yang memakai api, air panas, atau benda tajam.
- **Progres** (XP, kartu, soal yang sudah benar) tersimpan di perangkat. Jika dibuka di aurumgen.my.id, hasil latihan juga direkam secara anonim untuk menghitung statistik "berapa persen pembaca menjawab benar".

⚠ **ATURAN EMAS KESELAMATAN**

1. Jangan pernah mencicipi, mencium langsung, atau menyentuh bahan kimia tanpa izin. Kibaskan uap ke arah hidung bila perlu mencium bau.
2. Pakai kacamata pelindung saat memanaskan atau mencampur larutan. Ikat rambut panjang.
3. Jangan pernah mencampur pembersih rumah tangga (misalnya pemutih berklorin dengan pembersih lantai beramonia atau asam): dapat terbentuk gas beracun.
4. Selalu tambahkan asam ke air, bukan air ke asam.
5. Baca label dan piktogram bahaya. Simpan bahan kimia di wadah aslinya, jauh dari jangkauan adik kecil.
6. Cuci tangan setelah praktikum, dan buang limbah sesuai petunjuk guru.

Glosarium

A · Dunia Kimia

Istilah	Arti singkat
Materi	Segala sesuatu yang punya massa dan menempati ruang.

Unsur	Zat tunggal yang tersusun dari satu jenis atom dan tidak dapat diuraikan dengan reaksi kimia biasa.
Senyawa	Zat tunggal dari dua jenis unsur atau lebih yang terikat secara kimia dengan perbandingan tetap.
Campuran	Gabungan dua zat atau lebih tanpa ikatan kimia; komposisinya bisa berubah-ubah.
Perubahan kimia	Perubahan yang menghasilkan zat baru, ditandai gas, endapan, perubahan warna, atau perubahan suhu.
Angka penting	Angka hasil pengukuran yang diketahui pasti ditambah satu angka taksiran.

B · Atom & Tabel Periodik

Istilah	Arti singkat
Nomor atom (Z)	Jumlah proton dalam inti; menentukan identitas unsur.
Isotop	Atom dari unsur yang sama dengan jumlah neutron berbeda.
Massa atom relatif (Ar)	Rata-rata massa atom suatu unsur dibandingkan dengan 1/12 massa atom C-12.
Orbital	Daerah di sekitar inti tempat elektron paling mungkin ditemukan; berisi maksimal dua elektron.
Elektron valensi	Elektron di kulit terluar yang berperan dalam ikatan kimia.
Keelektronegatifan	Kemampuan atom menarik pasangan elektron ikatan ke arahnya.
Energi ionisasi	Energi minimum untuk melepas satu elektron dari atom berwujud gas.

C · Ikatan & Wujud Zat

Istilah	Arti singkat
Ikatan ion	Gaya tarik listrik antara kation dan anion yang terbentuk karena serah terima elektron.
Ikatan kovalen	Ikatan karena dua atom memakai pasangan elektron bersama.

Struktur Lewis	Gambar molekul yang menunjukkan pasangan elektron ikatan dan pasangan elektron bebas.
VSEPR	Teori tolakan pasangan elektron kulit valensi untuk meramalkan bentuk molekul.
Ikatan hidrogen	Gaya antarmolekul kuat antara H yang terikat pada F, O, atau N dengan pasangan elektron bebas atom elektronegatif lain.
Gas ideal	Model gas yang partikelnya tidak saling tarik dan volumenya diabaikan; memenuhi $PV = nRT$.

D · Stoikiometri

Istilah	Arti singkat
Mol	Satuan jumlah zat; 1 mol berisi $6{,}022 \times 10^{23}$ partikel (bilangan Avogadro).
Massa molar	Massa 1 mol zat, dalam g/mol; nilainya sama dengan Ar atau Mr.
Rumus empiris	Perbandingan bilangan bulat paling sederhana dari atom-atom dalam senyawa.
Pereaksi pembatas	Pereaksi yang habis lebih dulu dan menentukan jumlah produk.
Rendemen	Persentase hasil nyata terhadap hasil teoretis.

E · Energi, Laju & Kesetimbangan

Istilah	Arti singkat
Entalpi (ΔH)	Kalor reaksi pada tekanan tetap; negatif untuk eksoterm, positif untuk endoterm.
Hukum Hess	Perubahan entalpi reaksi hanya bergantung pada keadaan awal dan akhir, bukan jalannya.
Entropi (S)	Ukuran banyaknya cara partikel dan energi tersebar.
Energi bebas Gibbs (ΔG)	$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$; reaksi spontan bila ΔG negatif.
Energi aktivasi	Energi minimum yang diperlukan tumbukan agar reaksi terjadi.

Katalis	Zat yang mempercepat reaksi dengan menurunkan energi aktivasi tanpa ikut habis.
Kesetimbangan dinamis	Keadaan saat laju reaksi maju sama dengan laju reaksi balik sehingga konsentrasi tetap.
Asas Le Chatelier	Sistem setimbang yang diganggu akan bergeser untuk mengurangi gangguan itu.

F · Larutan & Asam-Basa

Istilah	Arti singkat
Molaritas (M)	Jumlah mol zat terlarut per liter larutan.
Sifat koligatif	Sifat larutan yang bergantung pada jumlah partikel terlarut, bukan jenisnya.
Koloid	Campuran dengan partikel berukuran 1–1000 nm; menunjukkan efek Tyndall.
pH	$-\log[\mathrm{H}^+]$; di bawah 7 asam, di atas 7 basa (pada 25 °C).
Asam Brønsted–Lowry	Zat yang memberikan ion H^+ (proton); basa adalah penerima proton.
Larutan penyangga	Larutan yang mempertahankan pH saat ditambah sedikit asam, basa, atau air.
Ksp	Hasil kali kelarutan: hasil kali konsentrasi ion dalam larutan jenuh garam sukar larut.

G · Redoks & Elektrokimia

Istilah	Arti singkat
Oksidasi & reduksi	Oksidasi = melepas elektron (biloks naik); reduksi = menerima elektron (biloks turun).
Bilangan oksidasi	Muatan "seolah-olah" sebuah atom bila semua ikatannya dianggap ion.
Sel volta	Sel yang mengubah energi reaksi redoks spontan menjadi listrik.
Elektrolisis	Penguraian zat dengan arus listrik (reaksi tidak spontan dipaksa terjadi).

Korosi	Kerusakan logam karena reaksi redoks dengan lingkungannya, misalnya karat besi.

H · Kimia Karbon & Kehidupan

Istilah	Arti singkat
Hidrokarbon	Senyawa yang hanya tersusun atas karbon dan hidrogen.
Isomer	Senyawa dengan rumus molekul sama tetapi struktur berbeda.
Gugus fungsi	Bagian molekul yang menentukan sifat khasnya, misalnya –OH, –COOH, –CHO.
Nukleofil & elektrofil	Nukleofil = "pencinta inti", memberikan pasangan elektron; elektrofil = "pencinta elektron", menerimanya.
Polimer	Molekul raksasa dari banyak satuan berulang (monomer).
Enzim	Protein yang berperan sebagai katalis biologis.

I · Inti, Lingkungan & Analisis

Istilah	Arti singkat
Waktu paruh	Waktu yang diperlukan agar separuh inti radioaktif meluruh.
Hujan asam	Hujan dengan pH di bawah ±5,6 karena terlarutnya oksida belerang dan nitrogen.
Kimia hijau	Rancangan proses kimia yang mengurangi atau menghilangkan zat berbahaya dan limbah.
Hukum Beer–Lambert	$A = \varepsilon bc$: absorbansi sebanding dengan konsentrasi dan panjang jalur cahaya.
Spektroskopi	Cara mempelajari zat dari interaksinya dengan cahaya atau gelombang elektromagnetik (UV-Vis, IR, NMR) dan spektrometri massa.

Tentang buku ini

Chemipedia · Kimia Itu Asyik! Edisi 1 (2026). Buku kimia interaktif untuk SD, SMP, SMA, IGCSE, IB, dan olimpiade.

Penulis: **dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD** · Editor: **Abdullah Hanif Hidayat** · Didukung oleh **Aurumgen Academy**.

Semua soal adalah karya asli. Label "gaya IGCSE", "gaya IB", dan "gaya olimpiade" menunjukkan tingkat dan format, bukan salinan soal resmi. Disusun selaras dengan Capaian Pembelajaran 2025 (Keputusan Kepala BSKAP No. 046/H/KR/2025) dan pendekatan Pembelajaran Mendalam.



RUJUKAN

- Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan (2025). *Capaian Pembelajaran Mata Pelajaran IPA dan Kimia Fase D–F* (Keputusan Kepala BSKAP No. 046/H/KR/2025).
- Cambridge Assessment International Education. *Cambridge IGCSE Chemistry 0620: Syllabus*.
- International Baccalaureate Organization. *Chemistry Guide (first assessment 2025)*.
- IUPAC. *Nomenclature of Inorganic Chemistry* (2005) dan *Nomenclature of Organic Chemistry* (2013); *Standard Atomic Weights*.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75–83.
- Taber, K. S. (2002). *Chemical Misconceptions: Prevention, Diagnosis and Cure*. Royal Society of Chemistry.
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.
- Kim, S. dkk. PubChem 2023 update. *Nucleic Acids Research*, 51(D1), D1373–D1380 (sumber data unsur dan koordinat 3D molekul).

© 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD. Hak cipta dilindungi undang-undang. Boleh dipakai untuk pembelajaran nonkomersial dengan menyebut sumbernya.