



Chemipedia

BUKU • JILID 3 • BAB 29-39

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

Ini adalah Jilid 3 dari versi cetak 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

BAGIAN G • REDOKS & ELEKTROKIMIA

29	Reaksi Redoks	4
30	Sel Volta & Baterai	36
31	Elektrolisis & Korosi	67

BAGIAN H • KIMIA KARBON & KEHIDUPAN

32	Hidrokarbon & Minyak Bumi	101
33	Gugus Fungsi	135
34	Reaksi & Mekanisme Organik	170
35	Polimer & Material	203
36	Biokimia: Molekul Kehidupan	239

BAGIAN I • INTI, LINGKUNGAN & ANALISIS

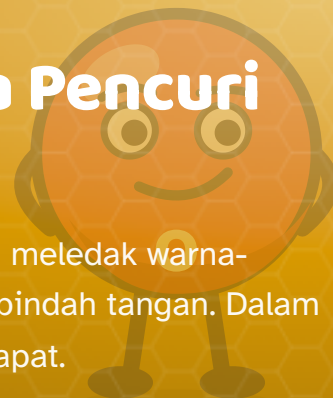
37	Kimia Inti & Radioaktivitas	273
38	Kimia Lingkungan & Kimia Hijau	307
39	Detektif Molekul: Analisis & Spektroskopi	340

LAMPIRAN

Peta Rumus: semua Rumus Hidup	379
Penutup, glosarium & panduan guru	397

29

Reaksi Redoks: Kisah Para Pencuri Elektron



Pagar yang berkarat, apel yang menjadi coklat, 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

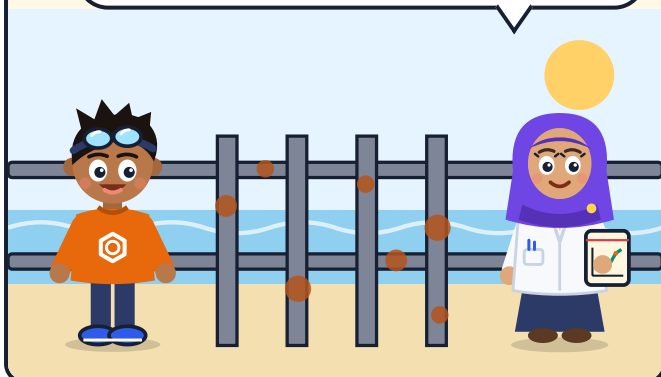
Pulang sekolah, di pagar tepi pantai

BIMA

Pagar ini cepat sekali berkarat. Besinya dimakan udara laut, ya?

LARAS

Kalau dimakan, mestinya berkurang. Karat justru lebih berat daripada besinya!



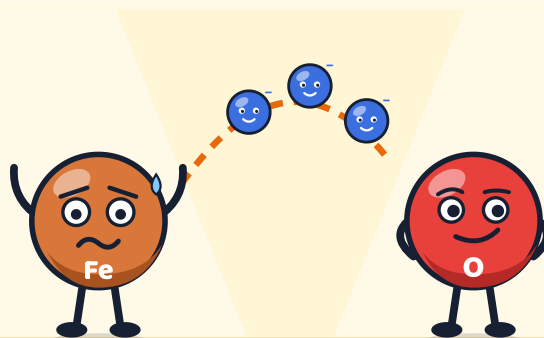
Sementara itu, di dunia atom...

OKSIGEN

Serahkan elektronmu, Besi! Aku butuh dua lagi.

BESI

Tolong! Satu, dua, tiga... elektronku dicuri!

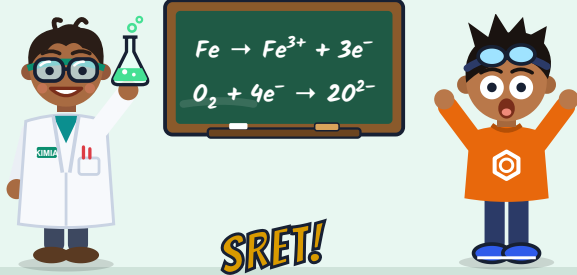


KAK TIRTA

Besi **melepas** elektron: itu **oksidasi**. Oksigen **menerima** elektron: itu **reduksi**. Selalu berpasangan, jadi namanya **redoks**!

BIMA

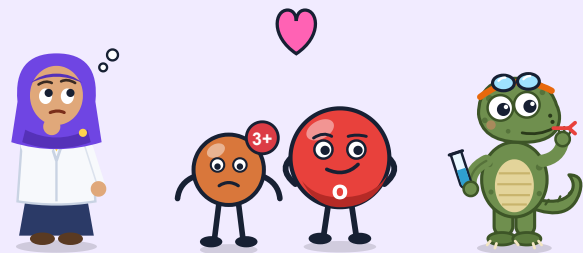
Jadi karat itu... pencurian elektron?!

**Kimo punya jembatan keledai****KIMO**

Ingat **OPER-REBUT**: Oksidasi meng-**Oper** elektron, **Reduksi** me-**Rebut** elektron. Tak ada pencuri tanpa korban!

LARAS

Berarti setiap oksidasi pasti ditemani reduksi...



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 $\text{Mg} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{MgCl}_2$, 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 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*.

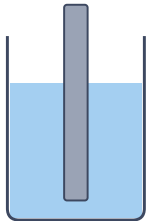
Definisi	Oksidasi	Reduksi	Contoh
1. Oksigen	mengikat oksigen	melepas oksigen	$4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fe teroksidasi) $\text{CuO} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$ (CuO tereduksi)
2. Hidrogen	melepas hidrogen	mengikat hidrogen	$\text{H}_2\text{S} + \text{Cl}_2 \longrightarrow \text{S} + 2\text{HCl}$ (H_2S teroksidasi, Cl_2 tereduksi)
3. Elektron	melepas elektron	menerima elektron	$\text{Zn} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$
4. Biloks (29.2)	biloks naik	biloks turun	Mg: $0 \rightarrow +2$ (oksidasi)



DEFINISI • OKSIDASI DAN REDUKSI

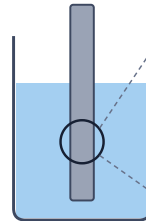
Oksidasi adalah peristiwa **pelepasan elektron** (biloks naik). **Reduksi** adalah peristiwa **penerimaan elektron** (biloks turun). Keduanya selalu berpasangan dalam satu reaksi yang disebut **reaksi redoks**. Mengikat oksigen atau melepas hidrogen hanyalah dua cara khusus untuk kehilangan elektron.

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?



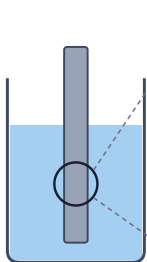
lempeng Zn dalam larutan CuSO_4

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.



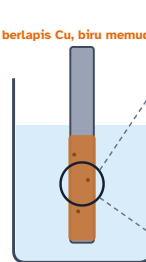
lempeng Zn dalam larutan CuSO_4

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.



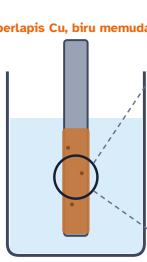
lempeng Zn dalam larutan CuSO_4

Langkah 3. Ketika ion Cu^{2+} menyentuh lempeng, **dua elektron** melompat dari satu atom Zn kepadanya.



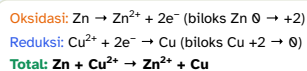
lempeng Zn dalam larutan CuSO_4

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.



lempeng Zn dalam larutan CuSO_4

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

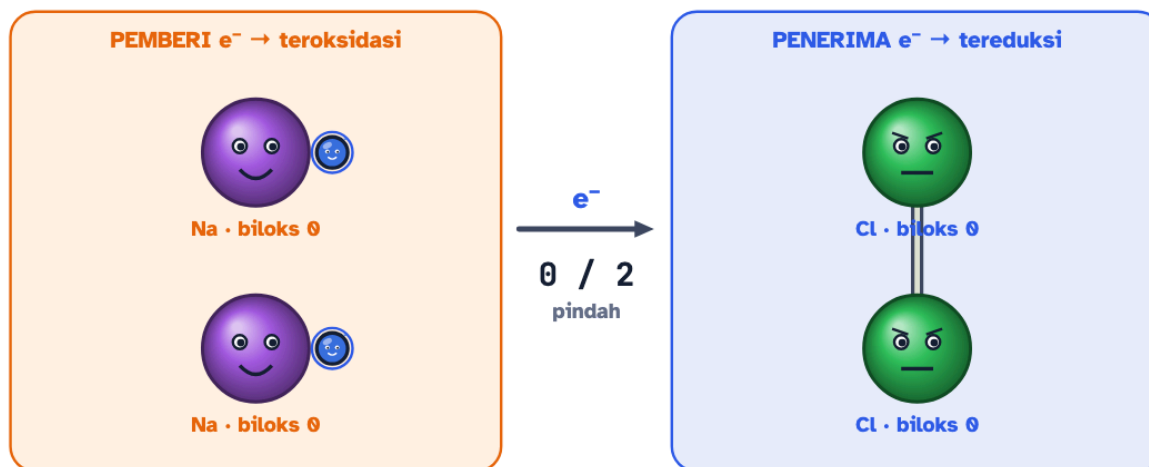
Oksidasi = mengoper elektron (melepas). **Reduksi** = merebut elektron (menerima). Dalam bahasa Inggris dikenal *OIL RIG*: *Oxidation Is Loss, Reduction Is Gain*. Seperti umpan dalam sepak bola, tidak ada operan tanpa penerima: jumlah elektron yang dioper selalu sama dengan yang direbut.



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: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ bukan redoks karena tidak ada biloks yang berubah.

Natrium + klorin → garam dapur



Seret elektron biru (atau ketuk atom kiri lalu seret) ke atom di kanan. Atau tekan ⚡ Reaksikan.
 Total elektron yang harus pindah: 2

e^- dilepas
0

e^- diterima
0

Reduktor
?

Oksidator
?

Keadaan
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, $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$? 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

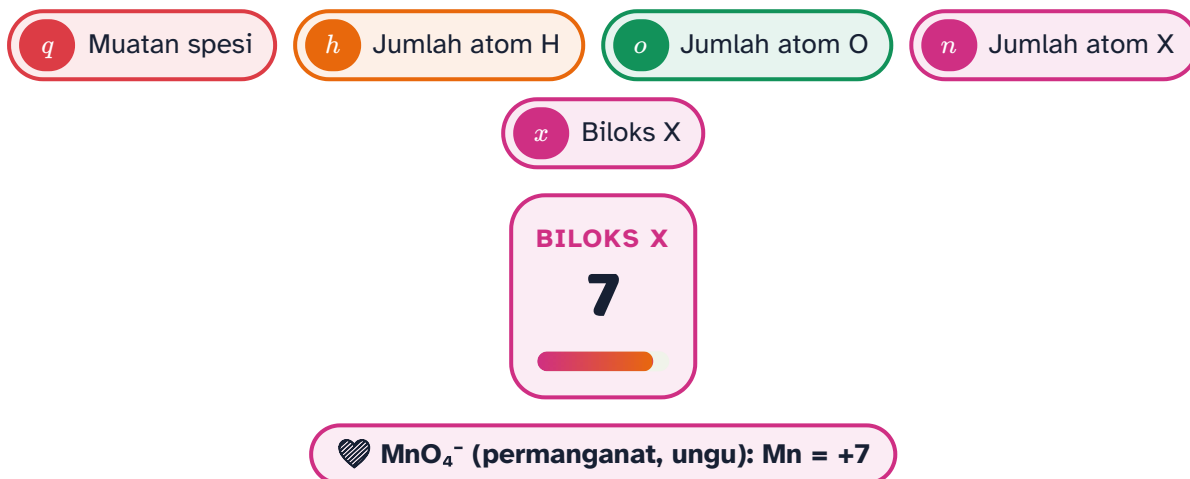
1. Unsur bebas (Fe, O₂, Cl₂, S₈, P₄) biloksnya **0**.
2. Ion monoatom: biloks = muatannya (Na⁺ = +1, S²⁻ = -2).
3. Jumlah biloks semua atom dalam senyawa netral = **0**; dalam ion poliatom = **muatan ion**.
4. Logam golongan 1 selalu +1, golongan 2 selalu +2, dan Al +3.
5. F selalu -1 (unsur paling elektronegatif).
6. H biasanya +1, kecuali dalam hidrida logam (NaH, CaH₂) = -1.
7. O biasanya -2, kecuali dalam peroksida (H₂O₂, Na₂O₂) = -1, superoksida (KO₂) = -½, dan OF₂ = +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.

$$\sum (\text{jumlah atom} \times \text{biloks}) = \text{muatan spesi}$$

$$x = \frac{q - h(+1) - o(-2)}{n}$$

Biloks X sama dengan muatan spesi dikurangi sumbangan semua H dan O, lalu dibagi jumlah atom X.



Cek: $1 \cdot x + 0 \cdot (+1) + 4 \cdot (-2) = -1$, 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).

- (a) $2(+1) + x + 4(-2) = 0$, sehingga $x = +6$.
- (b) K golongan 1: $(+1) + x + 4(-2) = 0$, sehingga $x = +7$.
- (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+.

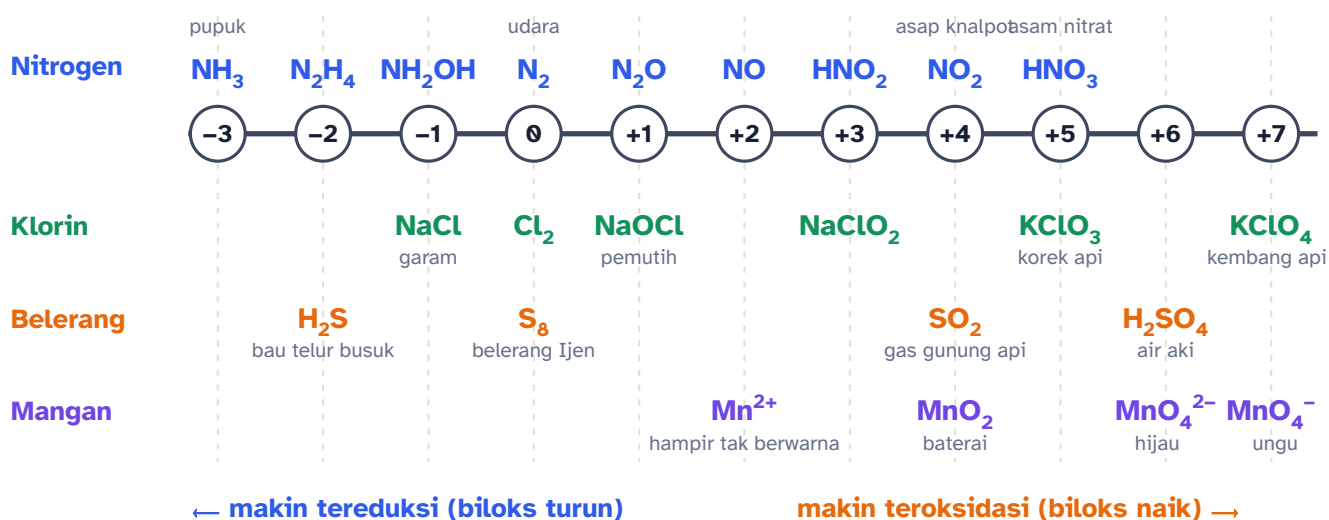
Atom S bermuatan 2-, sama dengan muatan ionnya.

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^+)
 $\rightarrow x + 4 = +1 \rightarrow x = -3$.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

BILOKS KARBON: DARI METANA SAMPAI KARBON DIOKSIDA

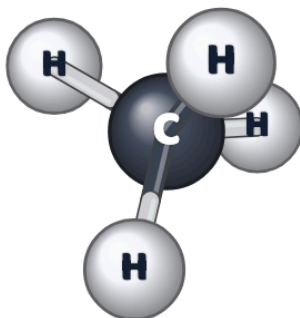
Dalam senyawa organik, biloks setiap atom C dapat dihitung dari ikatannya: tiap ikatan C-H menyumbang -1, tiap ikatan C-O (atau C-N, C-Cl) menyumbang +1 per pasangan elektron, dan ikatan C-C menyumbang 0.

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 tetratrat, $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$, 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 CH₄

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*.

Di tanur tinggi, bijih besi diolah menjadi besi: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \longrightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$. 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 $\times$ 3 = 6 elektron diterima; 3 atom C $\times$ 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
$\text{Cl}_2, \text{OCl}^-$	oksidator	Cl^-	kaporit air PDAM & kolam, pemutih pakaian
MnO_4^- (ungu)	oksidator	Mn^{2+} (asam) atau MnO_2	PK untuk akuarium, titrasi
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (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
$\text{H}_2\text{O}_2, \text{SO}_2$	keduanya	bergantung pasangannya	obat luka, pengawet buah kering

$$n_e = k \times |x_{\text{akhir}} - x_{\text{awal}}|$$

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^-)

♥ $\text{MnO}_4^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ (suasana asam): 5 e^-

1 atom $\times |(2) - (7)| = 5$ elektron per satuan rumus.

Cek satuan: atom $\times$ (perubahan biloks) = elektron ✓

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

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-29

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Δ = jumlah atom $\times$ (biloks akhir – biloks awal). Positif = oksidasi (melepas e^-), negatif = reduksi (menerima e^-). Contoh: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} \rightarrow 2\text{Cr}^{3+}$ memberi $2 \times (3 - 6) = -6$.

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 (autoredox) 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 $+1$:



Dalam NaOH panas, hasilnya lain: klorat (Cl $+5$) yang dipakai di kepala korek api.



Hydrogen peroksida di botol cokelat apotek juga pelan-pelan berdisproporsionasi: $2 \text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$. Biloks O berubah dari -1 menjadi -2 (dalam air) dan 0 (dalam O_2).

Contoh komproporsionasi terjadi di kawah gunung api. Gas H_2S (S $= -2$) dan SO_2 (S $= +4$) bertemu dan menghasilkan belerang kuning (S $= 0$):



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 SO_2 . Gas SO_2 dan H_2S di sana beracun, sehingga penambang dan wisatawan perlu masker.

MITOS

"Oksidator pasti mengandung oksigen."

MITOS

"Zat yang teroksidasi disebut oksidator."

FAKTA

Tidak.

Cl_2

,

F_2

, dan

Fe^{3+}

adalah oksidator tanpa oksigen. Oksidator adalah

penerima elektron

, apa pun rumusnya.

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

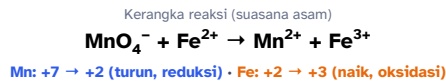
Menyetarakan redoks: metode setengah reaksi

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.



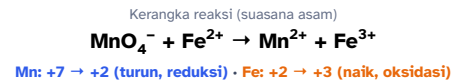
ATURAN • METODE SETENGAH REAKSI (SUASANA ASAM)

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.

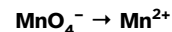


Dua unsur berubah biloks → ada dua setengah reaksi.

Langkah 1. Tulis kerangka reaksi dan tentukan biloks. Mn turun dari +7 ke +2 (reduksi); Fe naik dari +2 ke +3 (oksidasi).

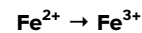


REDUKSI



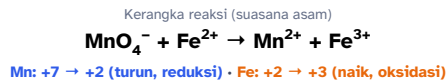
Mn sudah setara (1 = 1)

OKSIDASI



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.

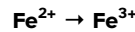


REDUKSI



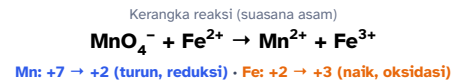
kiri 4 O, kanan 0 O → tambah 4 H₂O di kanan

OKSIDASI

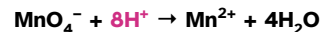


tidak ada O atau H yang perlu disetarakan

Langkah 3. Setarakan O dengan H₂O: kiri ada 4 atom O, jadi kanan diberi 4H₂O.

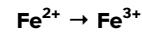


REDUKSI



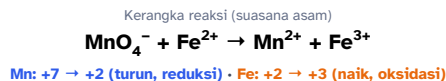
kanan 8 H → tambah 8 H⁺ di kiri

OKSIDASI



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⁺.



REDUKSI



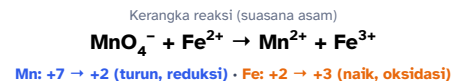
muatan kiri -1 + 8 = +7, kanan +2 → tambah 5 e⁻ di kiri

OKSIDASI

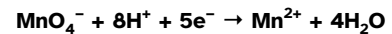


muatan kiri +2, kanan +3 → tambah 1 e⁻ di kanan

Langkah 5. Setarakan muatan dengan elektron. Reduksi: kiri -1 + 8 = +7, kanan +2, jadi kiri diberi 5e⁻. Oksidasi: kanan diberi 1e⁻.

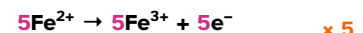


REDUKSI



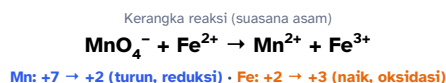
menerima 5 e⁻

OKSIDASI

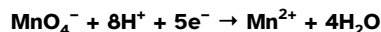


dikali 5 agar elektron yang dilepas = 5

Langkah 6. Samakan elektron: reduksi menerima 5e⁻, oksidasi melepas 1e⁻, jadi setengah reaksi oksidasi dikali 5.



REDUKSI

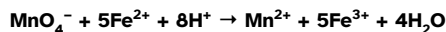


menerima 5 e⁻

OKSIDASI



melepas 5 e⁻



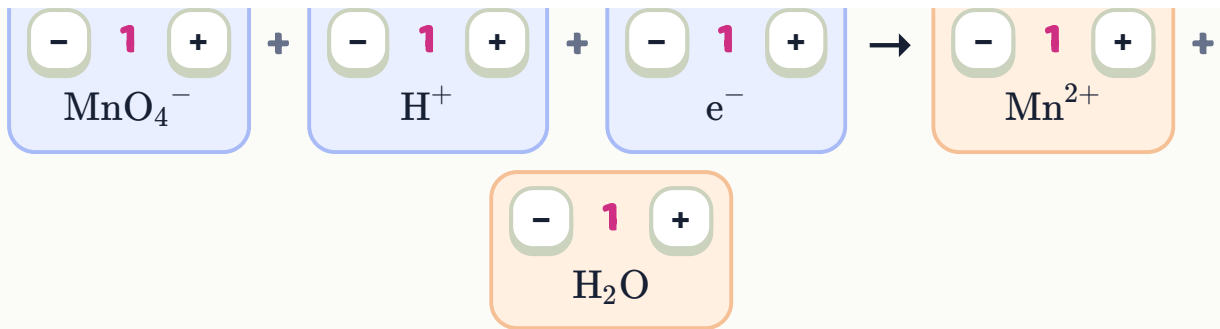
5e⁻ dicoret • muatan kiri -1 + 10 + 8 = +17 • kanan +2 + 15 = +17 ✓

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



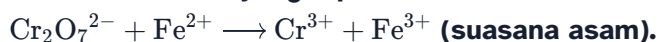
Ulang

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.

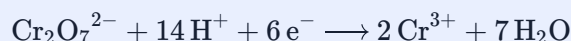
Setarakan reaksi yang dipakai untuk menentukan kadar besi dalam bijih:



1 Reduksi, setarakan Cr dulu: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} \longrightarrow 2 \text{Cr}^{3+}$.

2 Setarakan O dengan $7\text{H}_2\text{O}$ di kanan, lalu H dengan 14H^+ di kiri.

3 Muatan kiri $-2 + 14 = +12$, kanan $+6$, jadi tambahkan 6e^- di kiri:



4 Oksidasi $\text{Fe}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$ dikali 6, lalu jumlahkan dan coret 6e^- :



Cek muatan: kiri $-2 + 12 + 14 = +24$, kanan $+6 + 18 = +24$ ✓. Satu ion dikromat mengoksidasi enam ion besi(II).

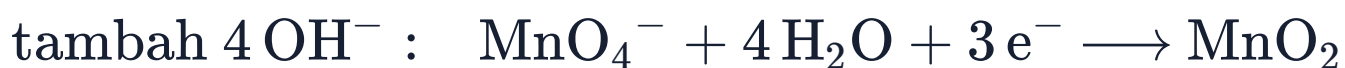
Bagaimana dalam suasana basa?

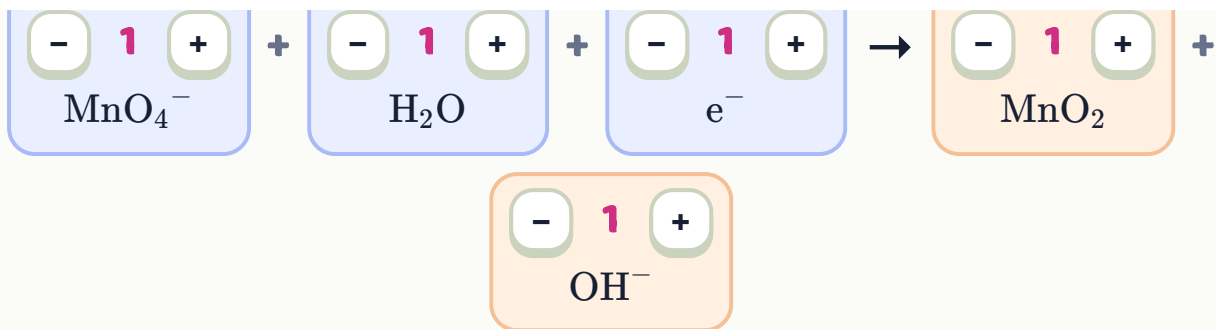


ATURAN TAMBAHAN • SUASANA BASA

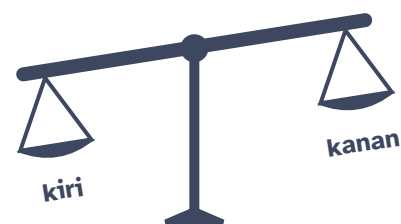
Kerjakan seperti suasana asam sampai langkah 4. Lalu tambahkan OH^- di **kedua ruas** sebanyak jumlah H^+ . Pasangan H^+ dan OH^- di ruas yang sama digabung menjadi H_2O . Terakhir, coret H_2O yang muncul di kedua ruas.

Contoh: permanganat dalam suasana basa berubah menjadi MnO_2 yang cokelat.





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 disproportionasi klorin dalam basa panas: satu zat menjadi oksidator sekaligus reduktor.

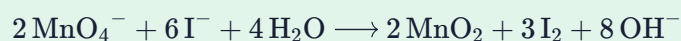
COBA SENDIRI Permanganat dan iodida (basa)

Coba sendiri: setarakan dalam suasana basa $\text{MnO}_4^- + \text{I}^- \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{I}_2$.

1 Reduksi (dari contoh di atas): $\text{MnO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3e^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$.

2 Oksidasi: $2\text{I}^- \rightarrow \text{I}_2 + 2e^-$.

3 KPK elektron 3 dan 2 adalah 6: reduksi $\times 2$, oksidasi $\times 3$, lalu jumlahkan.



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 $\rightarrow$ hijau $\rightarrow$ cokelat-jingga: "bunglon kimia".

Karena jumlah elektron per satuan rumus berubah-ubah, kimiawan analitik memakai **ekivalen**: $n_{\text{ek}} = n \times (\text{elektron per satuan rumus})$. Pada titik ekuivalen titrasi redoks, ekuivalen oksidator = ekuivalen reduktor. Misalnya 1 mmol MnO_4^- (asam) = 5 mek, cukup untuk 5 mmol Fe^{2+} atau 2,5 mmol $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$.

29.5

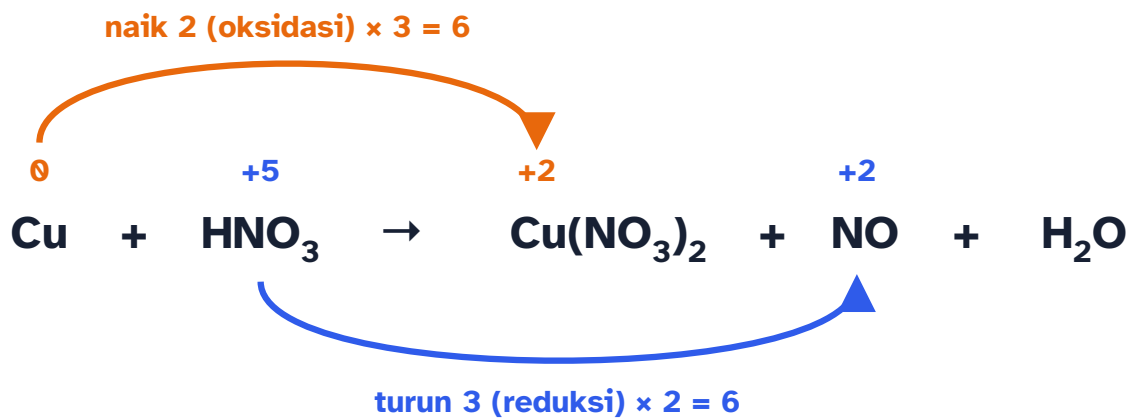
Metode perubahan bilangan oksidasi

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 biloksnnya 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 .

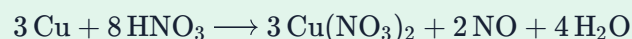


Jembatan biloks untuk tembaga dalam asam nitrat encer. Cu naik 2, N turun 3. Agar sama-sama 6, Cu dikali 3 dan NO dikali 2.

KERJAKAN BERSAMA Tembaga dalam asam nitrat encer

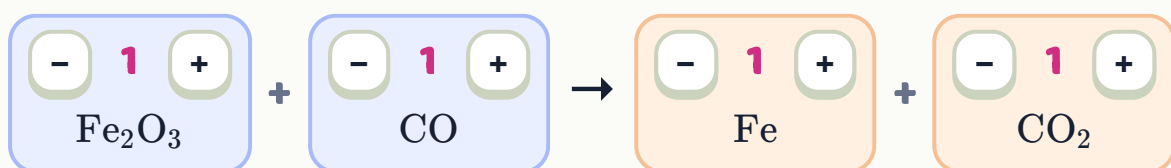
Setarakan $\text{Cu} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{Cu(NO}_3)_2 + \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$ dengan metode perubahan biloks.

- 1 Biloks: Cu 0 $\rightarrow$ +2 (naik 2); N +5 (dalam HNO_3) $\rightarrow$ +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 8HNO_3 .
- 4 H: 8 di kiri, jadi $4\text{H}_2\text{O}$ di kanan. Cek O: kiri 24; kanan $18 + 2 + 4 = 24 \checkmark$.

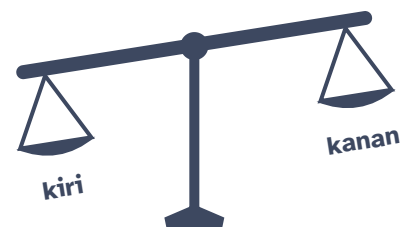


Hanya 2 dari 8 molekul HNO_3 yang benar-benar menjadi oksidator; 6 sisanya hanya menyumbang ion nitrat penonton.

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 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$)

Coba sendiri: setarakan $\text{KMnO}_4 + \text{HCl} \longrightarrow \text{KCl} + \text{MnCl}_2 + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

- 1 Mn: $+7 \rightarrow +2$, turun 5. Cl: $-1 \rightarrow 0$, naik 1 per atom, atau naik 2 per molekul Cl_2 .
- 2 KPK 5 dan 2 adalah 10: 2 Mn dan 5 Cl_2 .
- 3 K: 2KCl. Cl di kanan: $2 + 2(2) + 5(2) = 16$, jadi 16HCl. H: 16, jadi 8 H_2O . Cek O: $8 = 8 \checkmark$.



Dari 16 HCl, hanya 10 yang dioksidasi menjadi Cl_2 ; 6 lainnya berakhir sebagai ion Cl^- dalam KCl dan 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 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 OCl^- sendiri tereduksi:



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 $\text{OCl}^- + \text{Cl}^- + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$. 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 coklat

Bahasa sederhana • Irisan apel atau salak cepat menjadi coklat. Buahnya tidak busuk. Oksigen di udara "mencuri" elektron dari zat di dalam buah, dan zat yang sudah dicuri elektronnya berwarna coklat. 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 coklat (melanin). Untuk fenol sederhana katekol:



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:

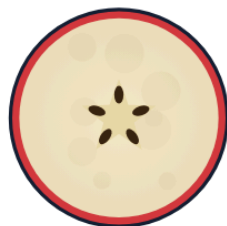


LAB MINI
Balapan Pencokelatan: buah, oksigen, dan antioksidan

 LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-29

⌚ 5 menit

Apel • 28 °C

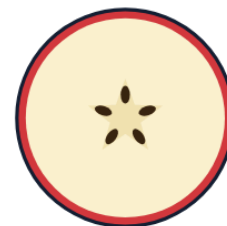

A • Dibiarkan
 cokelat 11%

 kontak penuh dengan O₂

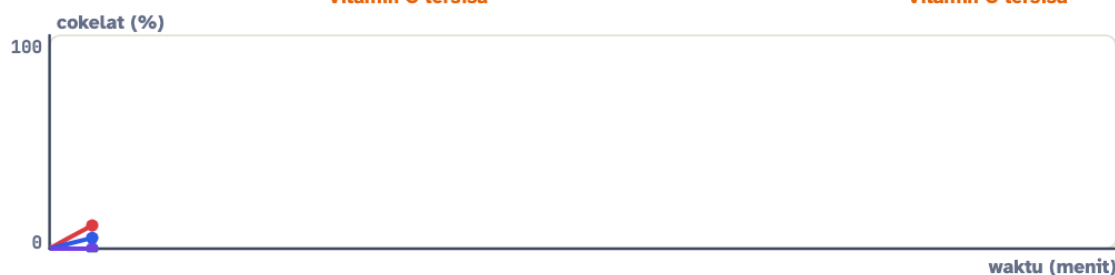
B • Jeruk nipis
 cokelat 0%

vitamin C tersisa


C • Air garam
 cokelat 5%

 ion Cl⁻ menghambat enzim

D • Larutan vitamin C
 cokelat 0%

vitamin C tersisa



Waktu

5 menit

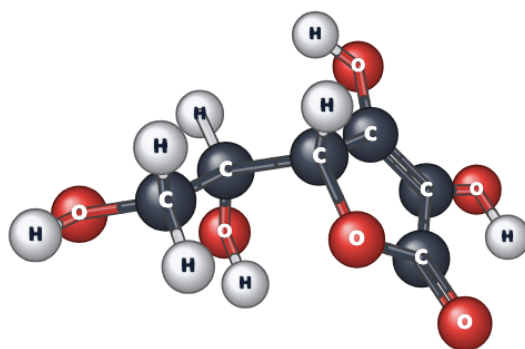
Paling cepat cokelat

A • Dibiarkan

Paling awet

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 $\approx 176,12$

[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 $\rightarrow$ asetaldehida $\rightarrow$ 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 CO_2 (+4), sedangkan oksigen (0) tereduksi menjadi air (-2). Energinya disimpan dalam ATP.



Fotosintesis berjalan ke arah sebaliknya dengan energi cahaya matahari: CO_2 direduksi menjadi glukosa, sedangkan air dioksidasi menjadi O_2 , $2 H_2O \longrightarrow O_2 + 4 H^+ + 4 e^-$. Jadi oksigen yang kamu hirup berasal dari molekul air yang dipecah daun, bukan dari CO_2 .

Uji alkohol napas

Alat uji napas klasik berisi kristal kalium dikromat jingga yang diasamkan. Etanol dalam napas mereduksi $Cr_2O_7^{2-}$ (Cr +6) menjadi Cr^{3+} (+3) yang hijau, sedangkan etanol teroksidasi menjadi asam asetat:



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 $\rightarrow$ +4), sedangkan nitrogen (+5 $\rightarrow$ 0) dan belerang (0 $\rightarrow$ -2) tereduksi. Warna-warnanya berasal dari garam logam: stronsium merah, barium hijau, natrium kuning.



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: $\text{NiO} + \text{C} \longrightarrow \text{Ni} + \text{CO}$. **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."

MITOS

"Apel yang sudah cokelat berarti busuk."

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.

FAKTA

Warna cokelat hanyalah hasil oksidasi fenol oleh oksigen udara. Rasanya sedikit berubah, tetapi itu bukan pembusukan oleh mikroba.



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 $\pm 60\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$.



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:



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 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,100 M. Mol tiosulfat = 3,36 mmol, mol I_2 = mol OCl^- = 1,68 mmol. Massa NaOCl = 1,68 mmol $\times$ 74,5 mg/mmol = 125 mg dalam 2,50 mL, yaitu $\pm 50\text{ g/L}$ atau sekitar 5% (m/v). Cocok dengan label!

$$c_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{5 \times c_{\text{MnO}_4^-} \times V_{\text{MnO}_4^-}}{V_{\text{sampel}}}$$

Setiap ion permanganat menerima 5 elektron, cukup untuk mengoksidasi 5 ion besi(II).

$c_{\text{MnO}_4^-}$ Konsentrasi KMnO_4 mol/L

$V_{\text{MnO}_4^-}$ Volume KMnO_4 di titik akhir mL

V_{sampel} Volume sampel Fe^{2+} mL

$c_{\text{Fe}^{2+}}$ Konsentrasi Fe^{2+} mol/L

KONSENTRASI Fe^{2+}

0,0215

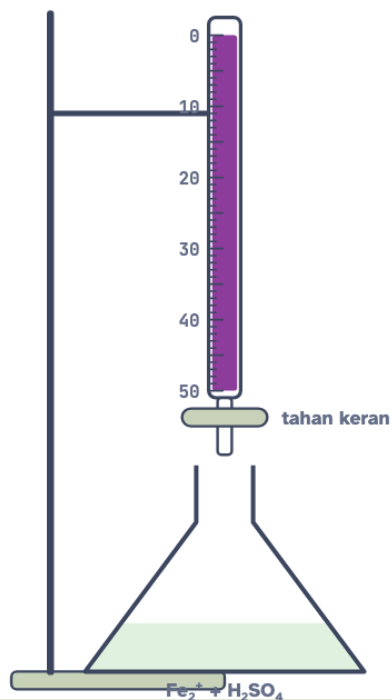
mol/L

💊 ± 60 mg besi per tablet (sampel 25 mL dari larutan satu tablet 50 mL)

$10,75 \text{ mL} \times 0,01 \text{ M} = 0,108 \text{ mmol MnO}_4^- \rightarrow 0,538 \text{ mmol Fe}^{2+} = 30,019 \text{ mg besi dalam } 25 \text{ mL sampel.}$

Cek satuan: $(\text{mol/L} \times \text{mL}) \div \text{mL} = \text{mol/L} \checkmark$

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



Isi labu (mmol)

Fe^{2+}

Fe^{3+}

Mn^{2+}

MnO_4^- berlebih

1 MnO_4^- menghabiskan 5 Fe^{2+}



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
0 mL

Fe^{2+} tersisa
0,538 mmol

Warna labu
hijau sangat pucat (Fe^{2+})

c Fe^{2+} hitunganmu
—

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, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$, 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 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 $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$, zat yang bertindak sebagai oksidator adalah ...

Zn

Cu^{2+}

Zn^{2+}

Cu

Biloks Cr dalam $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ adalah ...

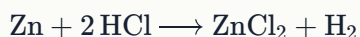
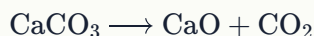
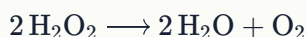
+3

+7

+12

+6

Reaksi manakah yang merupakan disproporsionasi?



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.

$$n_e = k \times |x_{\text{akhir}} - x_{\text{awal}}|$$

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**.

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 $\Delta G^{\circ} = -nFE^{\circ}$.

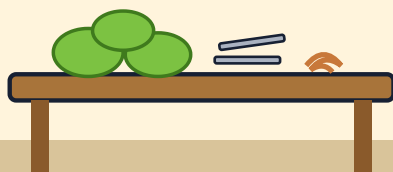
JAM DINDING BERTENAGA JERUK NIPIS

KOMIK • 4 PANEL

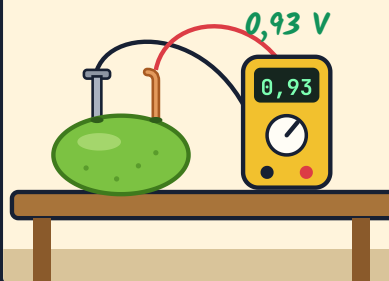
Malam sebelum pameran sains sekolah

BIMA

Yah, jam dinding mati dan toko sudah tutup! Eh... katanya jeruk nipis bisa jadi baterai. Ayo kita coba!

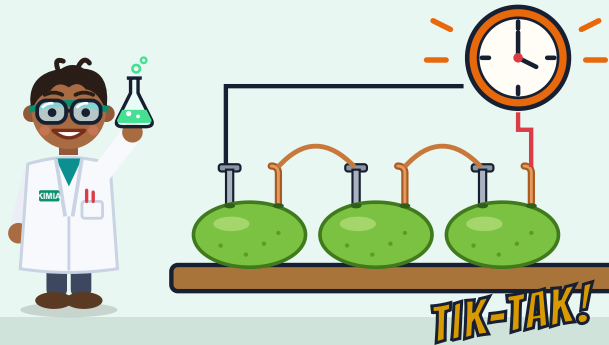
**LARAS**

Ukur dulu, Bim! Satu jeruk nipis cuma $\pm 0,9$ volt. Jam dinding butuh baterai 1,5 volt.



KAK TIRTA

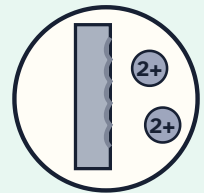
Rangkai tiga jeruk secara seri: tembaga ke seng, tembaga ke seng. Tegangannya dijumlahkan!

**Kimo ikut nimbrung...****KIMO**

Fakta unik: listriknya bukan dari "sari" jeruk! Lapisan seng di paku yang dimakan asam dan melepas elektron. Jeruk hanya menjadi kolam ion.

BIMA

Jadi yang habis pelan-pelan itu... pakunya?!

**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.

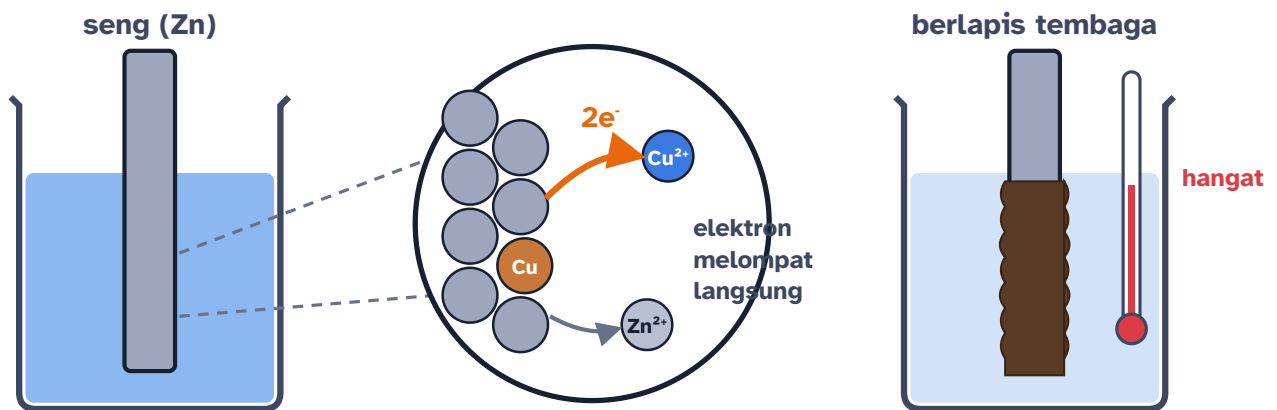
Dari vitamin C yang bermuatan listrik.

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. Rahasiannya 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 gelasny terasa sedikit **hangat**.



Sebelum tingkat atom: energi terbuang sebagai panas. **Sesudah ±15 menit**

Tiga tingkat pengamatan. **Makroskopik:** seng berlapis coklat 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!

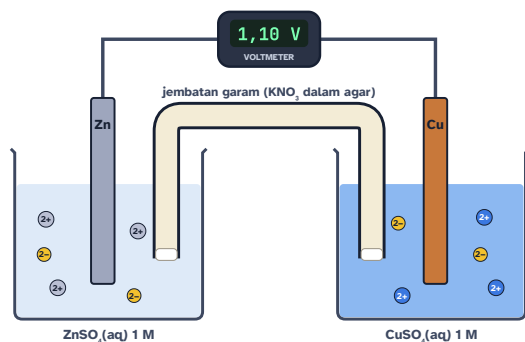


DEFINISI • SEL VOLTA (SEL GALVANI)

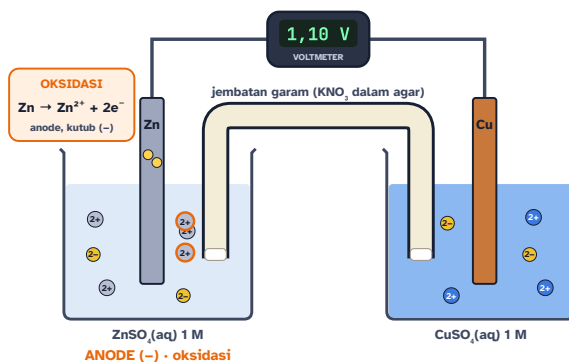
Sel volta adalah sel elektrokimia yang mengubah **energi kimia** dari reaksi redoks **spontan** menjadi **energi listrik**. Oksidasi dan reduksi terjadi di dua tempat terpisah (dua **setengah sel**):

- **Anode** = elektrode tempat terjadinya **oksidasi**.
- **Katode** = elektrode tempat terjadinya **reduksi**.
- **Jembatan garam** = tabung berisi larutan elektrolit (misalnya KNO_3 dalam agar-agar) yang menghubungkan kedua larutan sehingga **ion** dapat berpindah.

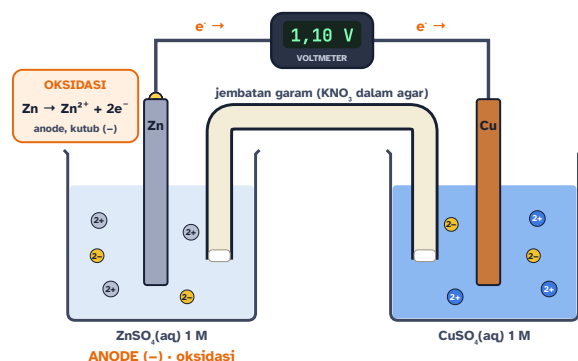
Contoh paling terkenal adalah **sel Daniell**: seng dalam larutan seng sulfat, tembaga dalam larutan tembaga sulfat. Tekan **Lanjut** untuk melihat apa yang dilakukan setiap partikel.



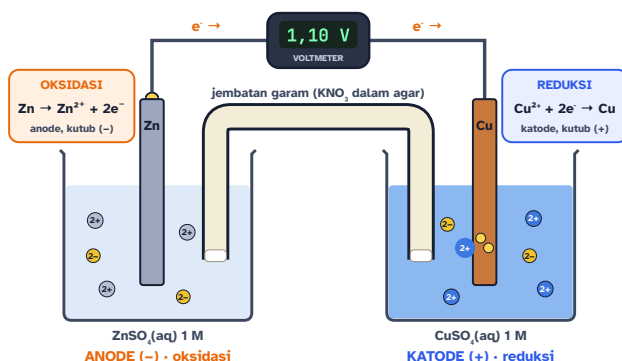
Langkah 1. Sel Daniell. Seng dicelup dalam larutan ZnSO_4 1 M, tembaga dalam CuSO_4 1 M. Kedua logam dihubungkan kawat dan voltmeter; kedua larutan dihubungkan jembatan garam berisi KNO_3 . Voltmeter membaca 1,10 V.



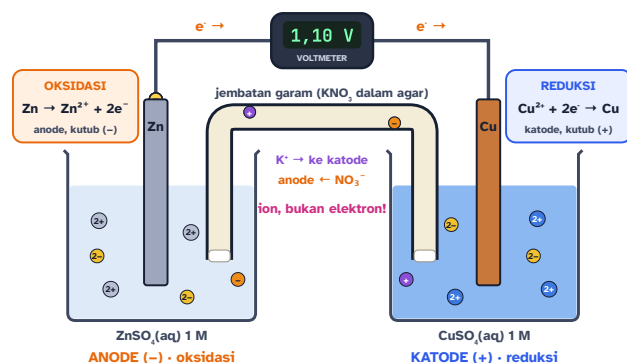
Langkah 2. Di **anode** (seng), atom Zn melepas 2 elektron lalu masuk ke larutan sebagai ion Zn^{2+} : $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^-$. Inilah **oksidasi**. Elektronnya tertinggal di logam, sehingga seng menjadi kutub **negatif**.



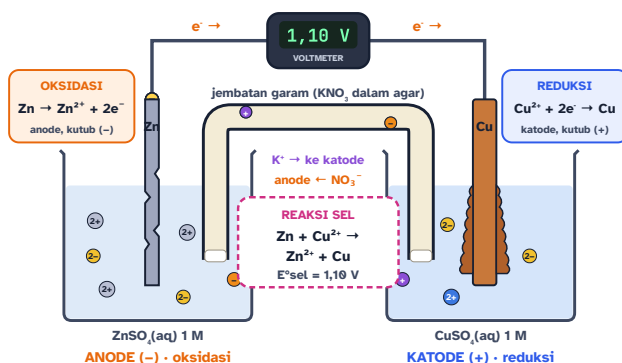
Langkah 3. Elektron yang berdesakan di seng mengalir lewat kawat menuju tembaga. Tegangan 1,10 V adalah "dorongan" yang menggerakkan elektron itu, mirip beda ketinggian yang membuat air mengalir.



Langkah 4. Di **katode** (tembaga), ion Cu^{2+} dari larutan menangkap elektron dan menempel sebagai atom Cu: $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$. 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 NO_3^- ke gelas anode dan ion 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 Cu^{2+} terpakai. Reaksi selnya $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$ dengan $E_{\text{sel}}^\circ = 1,10$ 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: Katode–Reduksi, **Anode–Oksidasi**. Ini berlaku untuk semua sel elektrokimia, kapan pun. Lalu khusus sel volta: **KPAN**, Katode **Positif**, **Anode Negatif**. (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.

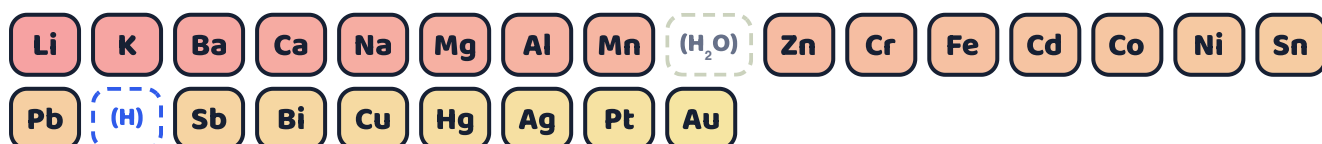
Setengah reaksi reduksi (25 °C)	E° (V)	Catatan
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{Li}$	-3,04	reduktor terkuat; anode baterai litium
$\text{K}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{K}$	-2,93	
$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{Ca}$	-2,87	
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{Na}$	-2,71	
$\text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{Mg}$	-2,37	anode korban kapal (Bab 31)
$\text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^- \longrightarrow \text{Al}$	-1,66	terlindung lapisan oksida
$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$	-0,83	air direduksi (larutan basa)
$\text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{Zn}$	-0,76	atap seng, baterai alkalin
$\text{Cr}^{3+} + 3 \text{e}^- \longrightarrow \text{Cr}$	-0,74	
$\text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}$	-0,44	paku, pagar, kerangka jembatan
$\text{PbSO}_4 + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0,36	anode aki

$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ni}$	-0,25	nikel Sulawesi
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Sn}$	-0,14	timah Bangka
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb}$	-0,13	
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$	0,00	patokan (elektrode hidrogen standar)
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$	+0,34	kabel listrik
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-$	+0,40	oksigen di larutan basa
$\text{I}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{I}^-$	+0,54	
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,77	pasangan ion (elektrode Pt)
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}$	+0,80	perak Kotagede
$\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Br}^-$	+1,07	
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1,23	katode sel bahan bakar
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cl}^-$	+1,36	
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Au}$	+1,50	emas: logam paling "mulia"
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,51	permanganat (Bab 29)
$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,69	katode aki
$\text{F}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{F}^-$	+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):



← makin mudah teroksidasi, reduktor makin kuat

logam makin mulia, ionnya makin mudah tereduksi →



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: $\text{Fe} + \text{CuSO}_4 \longrightarrow \text{FeSO}_4 + \text{Cu}$ berlangsung, tetapi $\text{Cu} + \text{FeSO}_4$ tidak bereaksi.
3. Logam di kiri **H** dapat bereaksi dengan asam encer (misalnya HCl) menghasilkan gas 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 CuSO_4 ; (b) kawat tembaga dicelup ke larutan ZnSO_4 ; (c) kawat tembaga dicelup ke larutan AgNO_3 .

- 1 (a) Fe di kiri Cu: Fe dapat mendesak Cu^{2+} . Paku berlapis tembaga merah, larutan memudar. **Bereaksi.**
- 2 (b) Cu di kanan Zn: tembaga tidak mampu mereduksi Zn^{2+} . **Tidak bereaksi.**
- 3 (c) Cu di kiri Ag: $\text{Cu} + 2 \text{Ag}^+ \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{Ag}$. 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

$$E_{sel}^\circ = E_{katode}^\circ - E_{anode}^\circ$$

Keduanya memakai nilai **potensial reduksi** dari tabel, tanpa mengubah tanda. Bila $E_{sel}^\circ > 0$, reaksi berlangsung **spontan** sehingga dapat dipakai sebagai sel volta. Bila $E_{sel}^\circ < 0$, reaksi **tidak spontan** ke arah itu; reaksi kebalikannya yang spontan, atau perlu listrik dari luar (elektrolisis, Bab 31).

$$E_{sel}^{\circ} = E_{katode}^{\circ} - E_{anode}^{\circ}$$

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

$\text{Cu} + 2 \text{Ag}^{+} \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{Ag}$ tetap memakai $E_{\text{Ag}^{+}/\text{Ag}}^{\circ} = +0,80 \text{ V}$, 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. ($E^{\circ} \text{Zn}^{2+}/\text{Zn} = -0,76 \text{ V}$; $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu} = +0,34 \text{ V}$)

1 Katode = E° lebih besar = tembaga (+0,34 V). Anode = seng (-0,76 V).

2 $E_{sel}^{\circ} = E_{katode}^{\circ} - E_{anode}^{\circ} = 0,34 - (-0,76) = 1,10 \text{ V}$.

$E_{sel}^{\circ} = +1,10 \text{ V}$. Positif, jadi reaksinya spontan, persis angka yang dibaca voltmeter di stepper tadi.

KERJAKAN BERSAMA Sel magnesium–perak

Sebuah sel volta memakai magnesium dalam $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ dan perak dalam AgNO_3 . Tuliskan setengah reaksi, reaksi sel, dan E_{sel}° . ($E^{\circ} \text{Mg}^{2+}/\text{Mg} = -2,37 \text{ V}$; $\text{Ag}^{+}/\text{Ag} = +0,80 \text{ V}$)

1 Mg lebih negatif → **anode**: $\text{Mg} \longrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^{-}$.

2 Ag lebih positif → **katode**: $\text{Ag}^{+} + \text{e}^{-} \longrightarrow \text{Ag}$, dikali 2 agar elektronnya sama:
 $2 \text{Ag}^{+} + 2 \text{e}^{-} \longrightarrow 2 \text{Ag}$.

3 Jumlahkan dan coret elektronnya: $\text{Mg} + 2 \text{Ag}^{+} \longrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{Ag}$.

4 $E_{sel}^{\circ} = 0,80 - (-2,37) = 3,17 \text{ V}$. Nilai 0,80 **tidak** dikali 2.

Reaksi sel $\text{Mg} + 2 \text{Ag}^{+} \longrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{Ag}$, $E_{sel}^{\circ} = 3,17 \text{ V}$, 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

Reaksi sel:

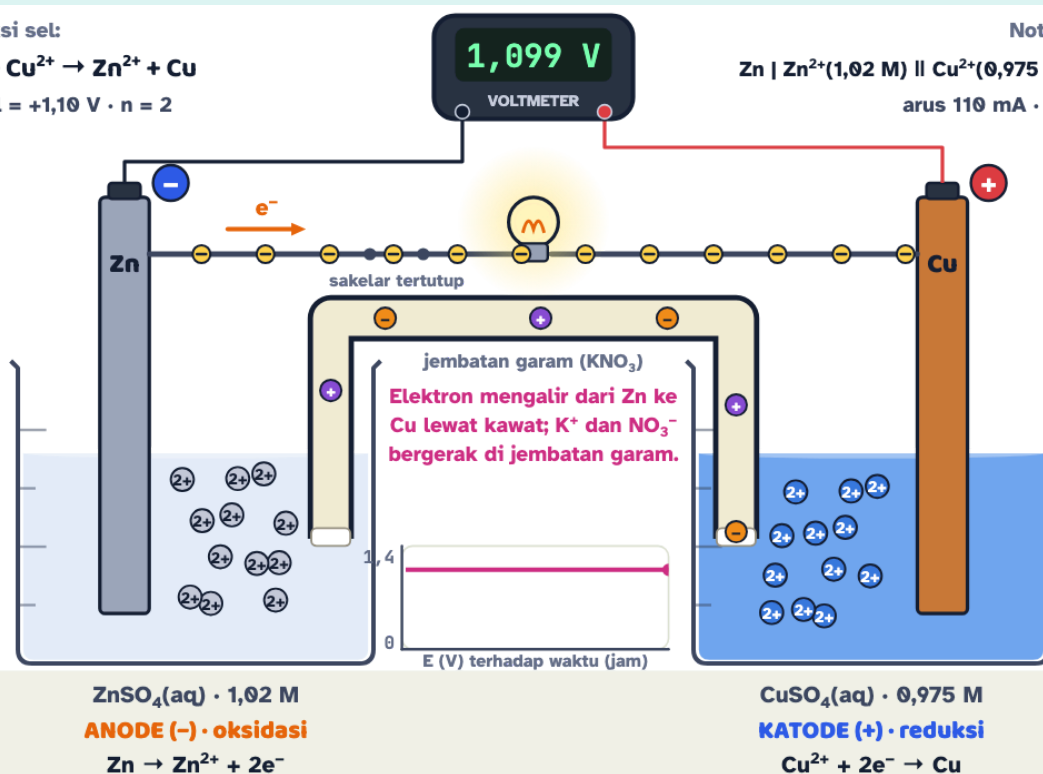


$$E^\circ_{\text{sel}} = +1,10 \text{ V} \cdot n = 2$$

Notasi sel:



arus 110 mA • 1,2 jam



Voltmeter

1,099 V

E°_{sel}

+1,10 V

Anode (-) • oksidasi

Zn (seng)

Katode (+) • reduksi

Cu (tembaga)

Arus (model)

110 mA

Waktu berjalan

1,2 jam

Notasi sel



Ketuk gelas kiri atau kanan untuk mengganti logam, ketuk jembatan garam untuk mencabut atau memasangnya, dan ketuk lampu untuk membuka atau menutup saklar. 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?

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 $\text{Fe} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Cu}$. Fe dioksidasi (anode), Cu^{2+} direduksi (katode).
- 2 $E_{\text{sel}}^\circ = 0,34 - (-0,44) = +0,78 \text{ V} > 0 \rightarrow$ **spontan**. Ember akan berlapis tembaga, lama-lama keropos, dan terusnya habis.
- 3 Wadah perak: reaksi yang mungkin $2 \text{Ag} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow 2 \text{Ag}^+ + \text{Cu}$. $E_{\text{sel}}^\circ = 0,34 - 0,80 = -0,46 \text{ V} < 0 \rightarrow$ **tidak spontan**.

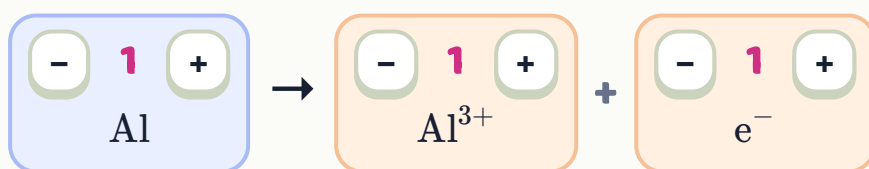
Jangan pakai ember besi; wadah perak (atau, lebih murah, plastik dan kaca) aman. Aturan cepatnya: larutan ion logam aman disimpan dalam wadah logam yang letaknya lebih kanan di deret volta.

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.

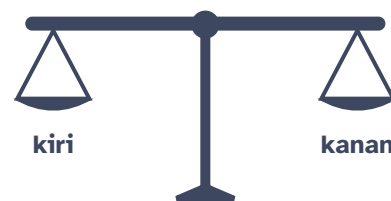


PENYETARA REAKSI

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 $\text{Al} + \text{Cu}^{2+}$, 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**

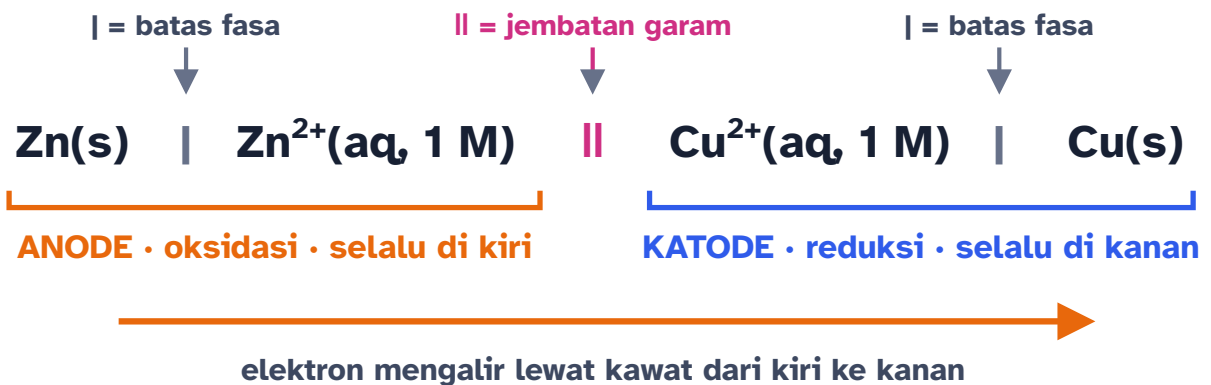
ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-30

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Katode = E° yang lebih besar. $E^\circ_{\text{sel}} = E^\circ_{\text{besar}} - E^\circ_{\text{kecil}}$, 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:





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: $\text{Pt(s)} | \text{H}_2(\text{g}) | \text{H}^+(\text{aq})$ atau $\text{Fe}^{3+}(\text{aq}), \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) | \text{Pt(s)}$.
Spesi dalam fasa yang sama dipisah koma.
4. Elektron dan ion jembatan garam **tidak** ditulis.



TRIK KAK TIRTA • URUTAN ABJAD

"Anode di kiri, Katode 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 $\text{Ni(s)} | \text{Ni}^{2+}(\text{aq}) || \text{Ag}^+(\text{aq}) | \text{Ag(s)}$. **Tuliskan reaksi selnya dan hitung E_{sel}° .** ($E^\circ_{\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}} = -0,25 \text{ V}$; $E^\circ_{\text{Ag}^+/\text{Ag}} = +0,80 \text{ V}$)

- 1 Kiri = anode: $\text{Ni} \longrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2 \text{e}^-$.
- 2 Kanan = katode: $2 \text{Ag}^+ + 2 \text{e}^- \longrightarrow 2 \text{Ag}$.
- 3 Reaksi sel: $\text{Ni} + 2 \text{Ag}^+ \longrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2 \text{Ag}$.
- 4 $E_{\text{sel}}^\circ = 0,80 - (-0,25) = 1,05 \text{ V}$.

$E_{\text{sel}}^\circ = +1,05 \text{ V}$, positif, jadi notasi itu menggambarkan sel volta yang benar-benar dapat bekerja.

Laras merakit $\text{Pt(s)} \mid \text{H}_2(\text{g}, 1 \text{ bar}) \mid \text{H}^+(\text{aq}, 1 \text{ M}) \parallel \text{X}^{2+}(\text{aq}, 1 \text{ M}) \mid \text{X(s)}$ dan voltmeter membaca **+0,34 V**. Lalu ia merakit $\text{Y(s)} \mid \text{Y}^{2+}(\text{aq}, 1 \text{ M}) \parallel \text{H}^+(\text{aq}, 1 \text{ M}) \mid \text{H}_2(\text{g}, 1 \text{ bar}) \mid \text{Pt(s)}$ 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). $0,34 = E_X^\circ - 0,00 \rightarrow E_X^\circ = +0,34 \text{ V}$.
- 2 Sel kedua: Y di kiri (anode), hidrogen di kanan (katode). $0,76 = 0,00 - E_Y^\circ \rightarrow E_Y^\circ = -0,76 \text{ V}$.
- 3 Cocokkan dengan tabel: X = tembaga, Y = seng.

$E_X^\circ = +0,34 \text{ V (Cu)}$ dan $E_Y^\circ = -0,76 \text{ V (Zn)}$. 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.

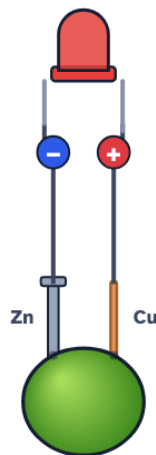
Satu sel hanya memberi tegangan beberapa volt. Untuk tegangan lebih besar, sel dirangkai **seri** (kutub + satu sel ke kutub – sel berikutnya): tegangannya dijumlahkan. Untuk kapasitas atau arus lebih besar, sel dirangkai **paralel**: tegangannya tetap. Coba sendiri dengan buah-buahan!

1 × jeruk nipis • seri

 $ggl = 1 \times 0,93 = 0,93 \text{ V}$ hambatan dalam = $1 \times 1,5 \text{ k}\Omega$

Zn = anode (–) • Cu = katode (+)

kaki panjang (+) ke Cu



0,93 V

MULTIMETER - DC V
di ujung rangkaian

Tegangan 0,93 V < 1,8 V: LED padam. Tambah buah secara seri!

Ketuk buah untuk menambah • ketuk LED untuk membalik

Tegangan di ujung rangkaian

0,93 V

Arus

0 mA

Tegangan tanpa beban (ggl)

0,93 V

Hambatan dalam total

1,5 k Ω

Keadaan

Tegangan 0,93 V < 1,8 V: LED padam. Tambah buah secara seri!

Nyalakan LED merah (butuh $\pm 1,8 \text{ V}$) 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 ₂ SO 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:



Kedua lempeng sama-sama berubah menjadi PbSO₄, 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 PbSO₄ 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



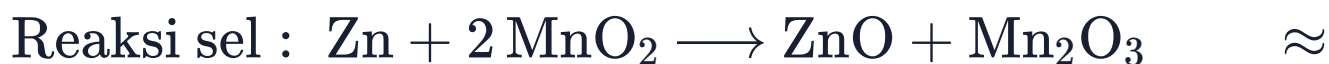
Mudah menyala



Bahaya lingkungan

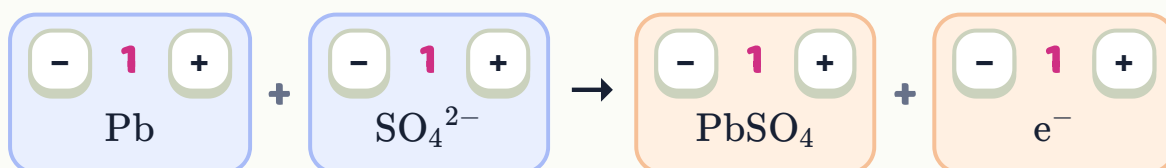
Baterai alkalin

Baterai AA dan AAA di remote televisi biasanya alkalin. Serbuk seng menjadi anode, mangan dioksida menjadi katode, dan pasta kalium hidroksida menjadi elektrolit:

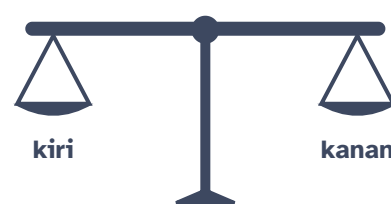


PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi di dalam baterai



Unsur	Kiri	Kanan	
Pb	1 ●	1 ●	✓
S	1 ●	1 ●	✓
O	4 ●●●●	4 ●●●●	✓



Unsur	Kiri	Kanan	
muatan	-2	-1	✗

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

 **Petunjuk**

 **Ulang**

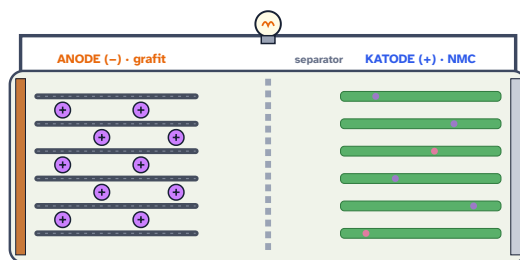
Persamaan berikutnya ▶

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.

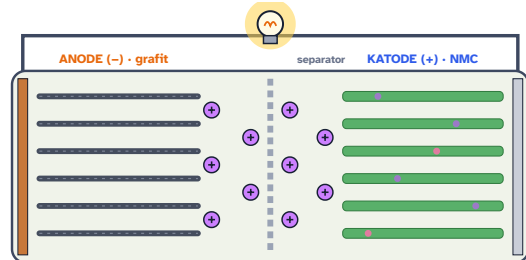
Litium-ion: baterai "kursi goyang"

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.



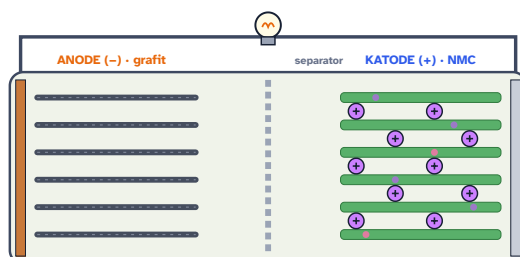
Baterai penuh: litium "menginap" di sela lapisan grafit.

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.



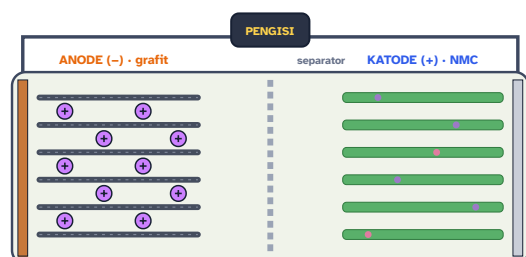
Anode: $\text{LiC}_6 \rightarrow \text{C}_6 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$ Katode: $\text{Li}^+ + \text{e}^- + \text{oksida logam} \rightarrow \text{LiMO}_2$

Langkah 2. Dipakai. Di anode litium melepas elektron: $\text{LiC}_6 \rightarrow \text{C}_6 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$. Elektron mengalir lewat kabel dan menyalakan lampu, sedangkan ion Li^+ menyeberang lewat elektrolit dan menembus pori separator.



Baterai kosong: ion Li^+ sudah pindah ke lapisan oksida logam.

Langkah 3. Kosong. Ion 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 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 $\times$ elektron yang dilepas setiap atom $\times$ 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: $(g \div g/mol) \times C/mol = C$; 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".

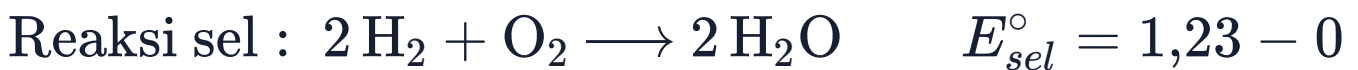
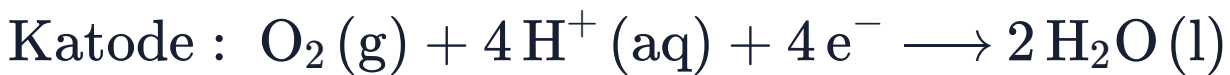


TAMU DARI MASA LALU

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 H^+ , sehingga elektron terpaksa lewat kabel:



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 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."

MITOS

"Makin besar buahnya, makin tinggi tegangannya."

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.

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."

MITOS

"Aki kering tidak berisi asam."

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.

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 $\times$ tegangan, yaitu $nF \times$

E. Kerja berguna maksimum itu berasal dari penurunan energi bebas sistem:



HUBUNGAN • ENERGI BEBAS DAN POTENSIAL SEL

$$\Delta G^\circ = -nFE_{sel}^\circ \quad F = 96.485 \text{ C/mol elektron} \quad E_{sel}^\circ = \frac{RT}{nF} \ln K$$

n = mol elektron yang dipindahkan dalam persamaan reaksi; F = **tetapan Faraday**, muatan satu mol elektron ($N_A \times e$). $E_{sel}^\circ > 0 \Leftrightarrow \Delta G^\circ < 0 \Leftrightarrow K > 1$: tiga cara mengatakan "spontan".

▼ Mengapa begitu? Menurunkan $\Delta G = -nFE$

Kerja listrik untuk memindahkan muatan Q melalui beda potensial E adalah $w = QE$ ($1 \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1 \text{ J}$). 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}

$$\Delta G^\circ = -n F E_{sel}^\circ$$

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

$\Delta G^\circ < 0$: spontan, $K > 1$

sel Daniell: -212 kJ

$n = 2$, $E^\circ_{sel} = 1,1 \text{ V} \rightarrow \Delta G^\circ = -212,3 \text{ kJ}$, dan $\log K = 37,187$ pada 25°C .

Cek satuan: $\text{mol} \times \text{C/mol} \times \text{V} = \text{J}$; $\div 1000 = \text{kJ}$ ✓

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

Hitung ΔG° dan K untuk $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$ ($E_{\text{sel}}^\circ = 1,10 \text{ V}$) pada 25°C .

1 Elektron yang dipindahkan: $n = 2$.

2 $\Delta G^\circ = -2 \times 96.485 \times 1,10 = -212.267 \text{ J} \approx -212 \text{ kJ}$.

3 $\log K = \frac{nE^\circ}{0,0592} = \frac{2 \times 1,10}{0,0592} = 37,2$, jadi $K \approx 10^{37}$.

$\Delta G^\circ \approx -212 \text{ kJ}$ dan $K \approx 10^{37}$: reaksi praktis berjalan tuntas. Tidak heran seng di larutan terus 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

$$E_{\text{sel}} = E_{\text{sel}}^\circ - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad \Longrightarrow \quad E_{\text{sel}} = E_{\text{sel}}^\circ - \frac{0,0592}{n} \log Q \quad (25^\circ\text{C})$$

Q adalah kuosien reaksi (Bab 22) yang ditulis dari reaksi sel; padatan tidak ikut dimasukkan. Untuk sel Daniell, $Q = \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]}$.

$$E_{sel} = E_{sel}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

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: $(\text{J/mol} \cdot \text{K} \times \text{K}) \div (\text{C/mol}) = \text{J/C} = \text{V} \checkmark$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-NERNST](https://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.

$$E = E^{\circ} - \frac{0,0592}{n} \log Q$$

$$\log Q = 0 : E = 1,1 \text{ V}, \quad \log K = 37,19$$



Q = 1: keadaan standar, E = E°

E

1,1 V ΔG **-212,3 kJ**

log K

37,2

Sel Daniell ($E^{\circ} = 1,10 \text{ V}$, $n = 2$) baru "mati" ketika $\log Q \approx 37$, yaitu ketika $[\text{Zn}^{2+}]$ kira-kira 10^{37} kali $[\text{Cu}^{2+}]$.

Kecilkan E° atau ubah n : titik hijau $Q = K$ bergeser. Garis lebih landai bila n lebih besar.

Hitung tegangan $\text{Zn(s)} \mid \text{Zn}^{2+}(0,010 \text{ M}) \parallel \text{Cu}^{2+}(2,0 \text{ M}) \mid \text{Cu(s)}$ **pada 25 °C.** ($E_{\text{sel}}^{\circ} = 1,10 \text{ V}$)

- 1 Reaksi sel $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$, $n = 2$.
- 2 $Q = \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} = \frac{0,010}{2,0} = 0,0050$; $\log Q = -2,30$.
- 3 $E = 1,10 - \frac{0,0592}{2}(-2,30) = 1,10 + 0,068 = 1,168 \text{ V}$.

$E \approx 1,17 \text{ V}$, sedikit di atas **1,10 V** karena pereaksinya (Cu^{2+}) melimpah dan hasilnya (Zn^{2+}) sedikit, sesuai prinsip Le Chatelier.

Sel konsentrasi memakai dua setengah sel yang **sama persis** tetapi konsentrasinya berbeda, misalnya $\text{Cu(s)} \mid \text{Cu}^{2+}(0,010 \text{ M}) \parallel \text{Cu}^{2+}(1,0 \text{ M}) \mid \text{Cu(s)}$. Karena $E_{\text{sel}}^{\circ} = 0$, seluruh tegangannya berasal dari suku Nernst: $E = -\frac{0,0592}{2} \log \frac{0,010}{1,0} = +0,059 \text{ V}$. Tembaga di larutan encer larut (anode) sehingga larutannya makin pekat, sedangkan di larutan pekat 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

$\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^{-} \longrightarrow \text{Fe}$ dari $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^{-} \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$ (+0,77 V) dan $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^{-} \longrightarrow \text{Fe}$ (-0,44 V), jumlahkan energinya: $-3FE^{\circ} = -1F(0,77) - 2F(-0,44)$, sehingga $E^{\circ} = \frac{0,77 - 0,88}{3} = -0,037 \text{ V}$. 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 $E_{\text{sel}}^{\circ} = E_{\text{katode}}^{\circ} - E_{\text{anode}}^{\circ}$ tetap berlaku.

Sel saraf adalah sel konsentrasi. Di dalam sel saraf $[\text{K}^{+}] \approx 140 \text{ mM}$, di luar $\pm 5 \text{ mM}$. Membran yang hanya meloloskan K^{+} membangun potensial Nernst $E = \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{K}^{+}]_{\text{luar}}}{[\text{K}^{+}]_{\text{dalam}}} \approx 61,5 \text{ mV} \times \log \frac{5}{140} \approx -89 \text{ mV}$ pada 37 °C. Potensial istirahat nyata $\pm 70 \text{ mV}$ karena membran juga sedikit meloloskan Na^{+} .

pH-meter juga sel konsentrasi. Elektrode kaca peka terhadap $[\text{H}^{+}]$; tegangannya berubah $\pm 59 \text{ mV}$ 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

$E^\circ \text{Fe}^{2+}/\text{Fe} = -0,44 \text{ V}$ dan $\text{Ag}^+/\text{Ag} = +0,80 \text{ V}$. 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

$$E_{sel}^{\circ} = E_{katode}^{\circ} - E_{anode}^{\circ}$$

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 $\times$ elektron yang dilepas setiap atom $\times$ muatan satu mol elektron.

$$\Delta G^{\circ} = -n F E_{sel}^{\circ}$$

ΔG° dari E° sel. Makin banyak elektron yang dipindahkan dan makin besar tegangannya, makin besar energi bebas yang dilepaskan.

$$E_{sel} = E_{sel}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

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-Hérault). Mengisi ulang aki dan ponselmu sebenarnya juga elektrolisis kecil-kecilan. Selengkapnya di Bab 31.

31 Elektrolisis & Korosi: Listrik yang Memaksa, Karat yang Menggerogoti

Di Bab 30, reaksi kimia menghasilkan listrik. Sekarang kita membalikinya: 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–Hérault**, dan industri **klor-alkali**;
- menjelaskan **korosi besi** sebagai sel volta mini dan memilih cara pencegahannya: cat, galvanisasi, proteksi katodik, atau baja tahan karat.

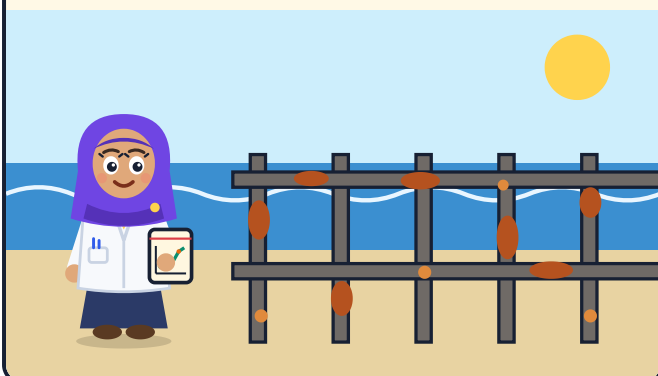
PAGAR BERKARAT, SENDOK PERAK

KOMIK • 4 PANEL

Sore hari di Pantai Losari, Makassar

LARAS

Lihat, Bim! Pagar besi di tepi pantai ini karatan semua. Padahal katanya baru dicat dua tahun lalu.

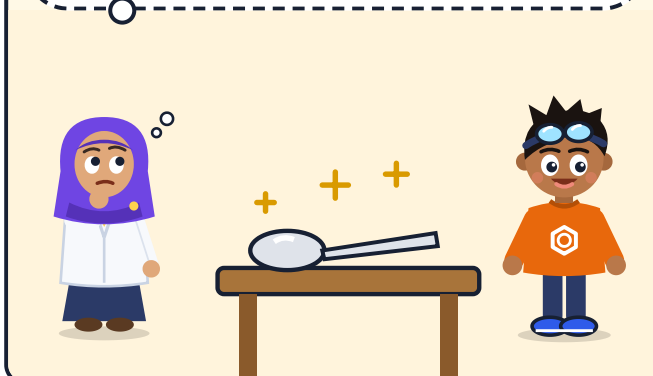


BIMA

Aneh. Sendok perak warisan Nenek umurnya sudah 50 tahun, tapi masih kinclong!

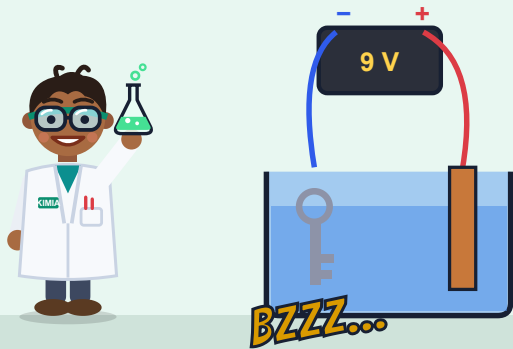
LARAS

Kenapa besi gampang berkarat, perak tidak?



KAK TIRTA

Listrik juga bisa memindahkan logam. Kunci ini kusambung ke kutub negatif baterai, lempeng tembaga ke kutub positif, lalu keduanya dicelup larutan tembaga sulfat.

**Sepuluh menit kemudian...****KIMO**

Kuncinya jadi berwarna tembaga! Namanya penyepuhan: listrik memaksa ion Cu^{2+} menempel di kunci.

BIMA

Jadi listrik bisa memaksa reaksi terjadi?!

**Tebak Dulu!**

Kak Tirta mengelektrolisis air yang diberi sedikit garam 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 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 H_2O berisi dua atom H untuk setiap satu atom O, sehingga $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas sebanding dengan jumlah molekulnya (Bab 14). Dilihat dari elektronnya: membuat satu molekul O_2 butuh 4 elektron, sedangkan satu H_2 cukup 2. Dengan aliran elektron yang sama, 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!

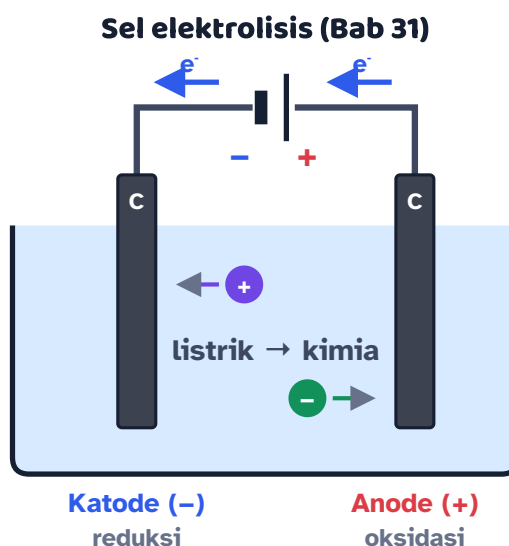
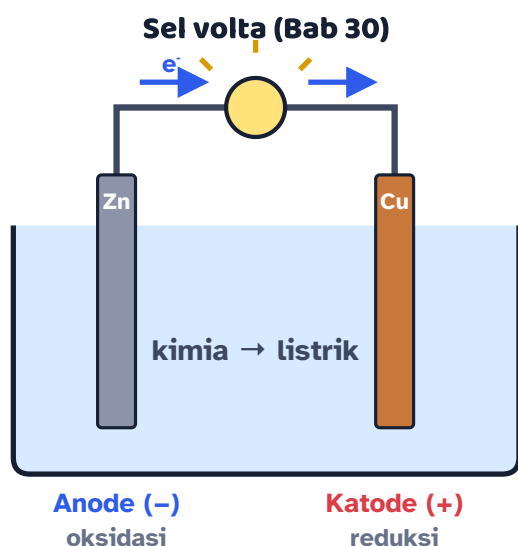
Bayangkan air di rumahmu. Air mengalir sendiri dari tandon di atap ke keran: itu seperti sel volta, dan alirannya bisa memutar kincir kecil. Untuk menaikkan air dari sumur ke tandon, kamu butuh **pompa listrik**. Elektrolisis adalah "pompa" kimia: energi listrik memaksa elektron mengalir ke arah yang 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 $\rightarrow$ listrik	listrik $\rightarrow$ kimia
Reaksi	spontan, $E_{sel}^{\circ} > 0$	tidak spontan, $E_{sel}^{\circ} < 0$, 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

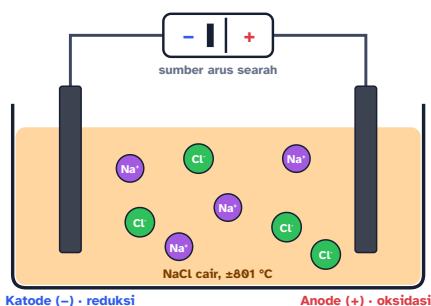
Untuk semua jenis sel: "**KaRed-AnOks**", Katode Reduksi, Anode Oksidasi. Untuk tanda kutub sel elektrolisis: "**KNAP**", Katode Negatif, Anode Positif. Sel volta kebalikannya: "**KPAN**". Kalau bingung, ingat saja bahwa kutub negatif sumber arus "menyemprotkan" elektron, dan zat yang menerima elektron pasti tereduksi.



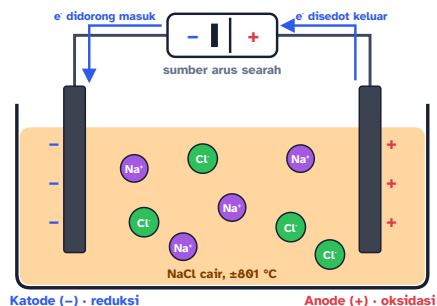
AWAS JEBAKAN

"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.

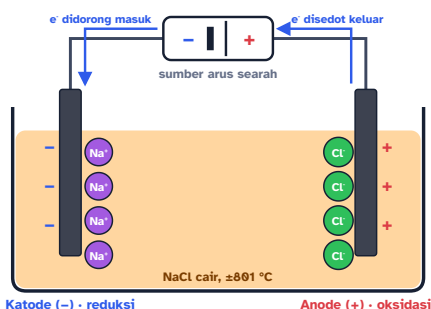
Mari kita lihat apa yang terjadi pada partikel-partikelnya, memakai contoh paling klasik: elektrolisis lelehan garam dapur.



Langkah 1. Garam padat tidak menghantar listrik karena ion-ionnya terkunci di dalam kisi. Setelah dilelehkan ($\pm 801^\circ\text{C}$), ion Na^+ dan Cl^- bebas bergerak.



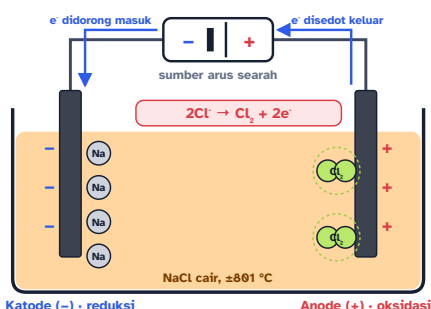
Langkah 2. Sumber arus dinyalakan. Ia mendorong elektron **masuk** ke elektrode kiri (menjadi negatif: **katode**) dan menyedot elektron **keluar** dari elektrode kanan (menjadi positif: **anode**).



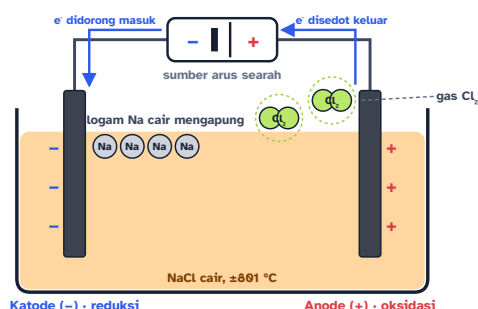
Langkah 3. Muatan berlawanan saling menarik: kation Na^+ bergerak ke katode (-), anion Cl^- ke anode (+). Di dalam lelehan, yang berjalan adalah **ion**, bukan elektron.



Langkah 4. Di katode terjadi **reduksi**: $\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}$. Setiap ion natrium menerima satu elektron dan menjadi atom natrium.



Langkah 5. Di anode terjadi **oksidasi**: $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2e^-$. Elektron yang dilepas ditarik kembali ke sumber arus, sehingga rangkaian tertutup.



Langkah 6. Hasilnya: logam natrium cair mengumpul (lebih ringan daripada lelehan garam) dan gas klorin keluar. Reaksi totalnya $2\text{NaCl(l)} \rightarrow 2\text{Na(l)} + \text{Cl}_2\text{(g)}$. Pabrik natrium (sel Downs) memakai cara ini, dengan tambahan CaCl_2 agar garam meleleh pada $\pm 600^\circ\text{C}$.



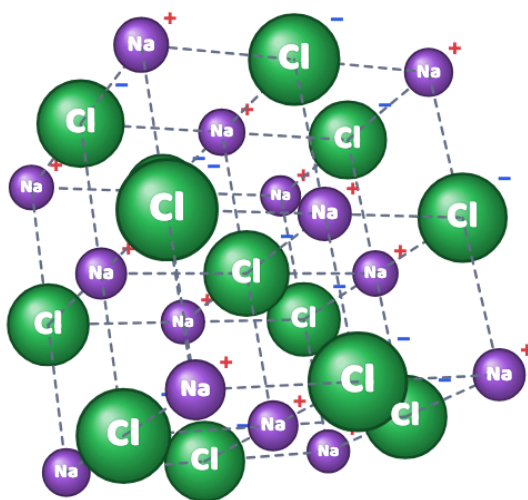
TAMU DARI MASA LALU

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 MgCl_2 memberi magnesium dan klorin; lelehan 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 Na^+ dikelilingi 6 ion Cl^- dan sebaliknya (bilangan koordinasi 6). Tidak ada "molekul" NaCl, yang ada kisi raksasa.

Putar kisi NaCl: setiap ion Na^+ dikelilingi enam ion 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: Cl_2 , H_2 , dan O_2 .

Pada **larutan**, ceritanya lebih seru. Selain ion zat terlarut, ada molekul air yang juga bisa direduksi atau dioksidasi:



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: $\text{Na}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{Na}$	air yang direduksi: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
	Ion H^+ dari asam	-	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$
	Kation logam lain: Cu^{2+} , Ag^+ , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Sn^{2+} , Fe^{2+}	logamnya terbentuk	logamnya mengendap : $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$
Anode (oksidasi)	Anode aktif (Cu, Ag, Ni, Zn, Fe, ...)	anodenya sendiri yang larut: $\text{Cu} \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	
	Anode inert (C, Pt, Au) + ion halida Cl^- , Br^- , I^-	$2\text{Cl}^- \longrightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	$2\text{Cl}^- \longrightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ (bila larutannya pekat)
	Anode inert + ion OH^- (larutan basa)	-	$4\text{OH}^- \longrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$
	Anode inert + ion sisa asam okso (SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-}) atau F^-	-	air yang dioksidasi: $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

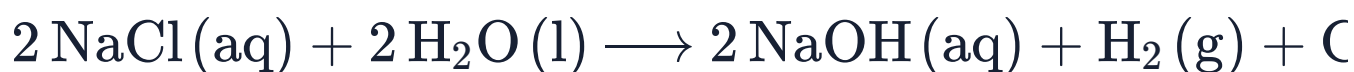
Elektrode **inert** (karbon/grafit, platina, emas) hanya menjadi tempat reaksi dan tidak ikut bereaksi. **Anode aktif** (logam selain itu) ikut teroksidasi dan larut.



AWAS JEBAKAN

Pada larutan NaCl, logam natrium **tidak pernah** terbentuk. Air jauh lebih mudah direduksi daripada Na^+ ($E^\circ \text{Na}^+/\text{Na} = -2,71 \text{ V}$). Seandainya pun ada natrium yang terbentuk, ia akan langsung bereaksi hebat dengan air. Hal yang sama berlaku untuk K^+ , Mg^{2+} , dan Al^{3+} : mereka hanya bisa diperoleh dari leburan.

Contoh terpenting adalah **air garam pekat** (brine). Di katode, air direduksi menjadi H_2 dan ion OH^- . Di anode, Cl^- dioksidasi menjadi Cl_2 . Ion Na^+ tidak berubah dan berpasangan dengan OH^- menjadi natrium hidroksida (soda api):



Tiga produk berharga sekaligus dari garam dan air! Jika larutannya **encer**, ion Cl^- terlalu sedikit sehingga di anode terbentuk terutama O_2 (dengan sedikit Cl_2). Berikut ringkasan elektrolisis yang paling sering muncul di soal:

Elektrolit (elektrode)	Katode (–)	Anode (+)	Perubahan larutan
NaCl leburan (C)	Na	Cl_2	garam terurai
NaCl larutan pekat (C)	H_2	Cl_2	menjadi NaOH (basa)
NaCl larutan encer (C)	H_2	O_2 (sedikit Cl_2)	air berkurang
Na_2SO_4 atau H_2SO_4 encer (C)	H_2	O_2	hanya air yang terurai, $\text{H}_2 : \text{O}_2 = 2 : 1$
CuSO_4 larutan (C)	Cu mengendap	O_2	biru memudar, menjadi asam (H_2SO_4)
CuSO_4 larutan (Cu)	Cu mengendap	anode Cu larut	biru tetap, tembaga "pindah" dari anode ke katode
KI larutan (C)	H_2	I_2 (cokelat)	sekitar katode menjadi basa
AgNO_3 larutan (C)	Ag mengendap	O_2	menjadi asam (HNO_3)

Na₂SO₄ larutan**t = 1 menit**

1 detik di layar = 1 menit

katode
H₂
200 mL

4,1 mL

Katode (-)
reduksi

Anode (+)
oksidasi

Katode (-): $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

Anode (+): $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

anode
O₂
200 mL

2,1 mL

Waktu

1 menit

Arus terbaca

0,5 A

Muatan

36 C

Katode (-)

gas H₂

Anode (+)

gas O₂

Hasil

4,1 mL H₂ • 2,1 mL O₂ (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 Na₂SO₄. Coba juga "air murni": mengapa hampir tidak terjadi apa-apa? Lalu bandingkan CuSO₄ 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.

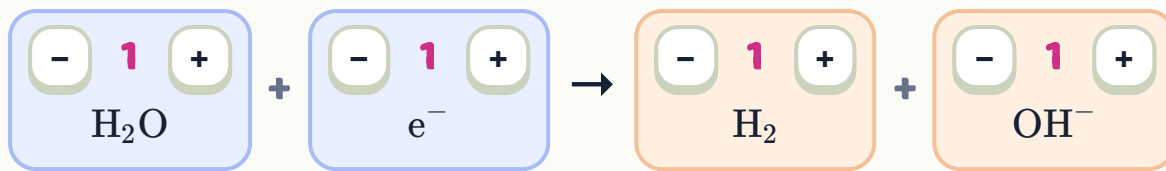
- 1 Ion yang ada: K^+ , I^- , dan molekul air. Elektrodenya inert.
- 2 Katode: K^+ adalah kation logam golongan IA, jadi **air** yang direduksi:
 $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$. Ada gelembung H_2 , dan ion OH^- membuat fenolftalein merah muda.
- 3 Anode: I^- adalah ion halida, jadi $2I^- \rightarrow I_2 + 2e^-$. Iodin membuat larutan di sekitar anode cokelat kekuningan.

Katode: gas H_2 + warna merah muda; **anode:** I_2 dengan warna cokelat. **Reaksi total:**
 $2KI + 2H_2O \rightarrow 2KOH + H_2 + I_2$.

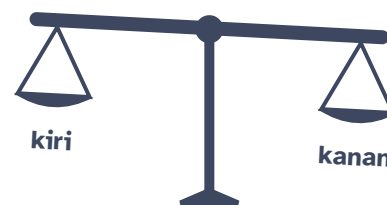


PENYETARA REAKSI

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 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: $E_{sel}^{\circ} = E_{katode}^{\circ} - E_{anode}^{\circ} = 0 - 1,23 = -1,23$ 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 $\pm 1,8$ – 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 $E^{\circ} Zn^{2+}/Zn$ ($-0,76$ 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 $6,022 \times 10^{23} \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} = 96.485 \text{ C}$. Besaran ini disebut **tetapan Faraday**, F . Di banyak buku sekolah dibulatkan menjadi 96.500 C/mol .

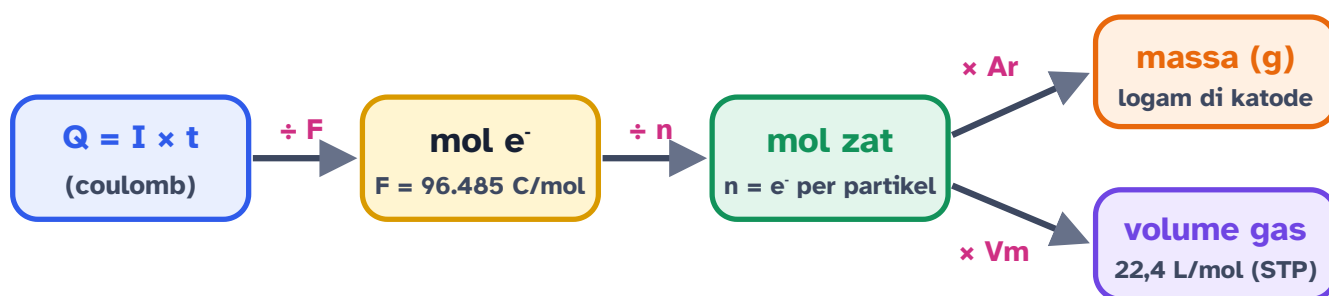


HUKUM FARADAY

Hukum I: massa zat yang dihasilkan di elektrode sebanding dengan muatan listrik yang dialirkan.

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I t}{F} = e \cdot \frac{I t}{F} \quad e = \frac{A_r}{n} \text{ (massa ekuivalen)}$$

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 ekuivalennya: $\frac{m_1}{e_1} = \frac{m_2}{e_2}$.



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.

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I t}{F}$$

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: $\approx 1,3 \times$ sebutir kacang tanah ($\pm$) $\cdot \approx 13\%$ dari satu sendok teh gula pasir ($\pm$) $\cdot \approx 4\%$ dari satu sendok makan air

Cek satuan: $(\text{g/mol}) \times (\text{A} \cdot \text{s}) \div (\text{C/mol}) = (\text{g/mol}) \times \text{mol} = \text{g} \checkmark$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-FARADAY-MASSA-ENDAPAN](https://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? ($F = 96.500 \text{ C/mol}$)

1 Ubah waktu ke detik: $16 \times 60 + 5 = 965 \text{ s}$.

2 Muatan: $Q = It = 2,00 \times 965 = 1.930 \text{ C}$.

3 Mol elektron: $1.930/96.500 = 0,0200 \text{ mol}$.

$Q = 1.930 \text{ C}$, setara dengan $0,0200 \text{ mol elektron}$ ($1,2 \times 10^{22}$ elektron).

KERJAKAN BERSAMA Menyepuh sendok dengan perak

Sebuah sendok disepuh perak dari larutan yang mengandung ion Ag^+ , dengan arus 0,500 A selama 30,0 menit. Berapa gram perak yang menempel? ($\text{Ar Ag} = 108$; $F = 96.500 \text{ C/mol}$)

1 $Q = 0,500 \times (30,0 \times 60) = 900 \text{ C}$.

2 Mol elektron $= 900/96.500 = 9,33 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

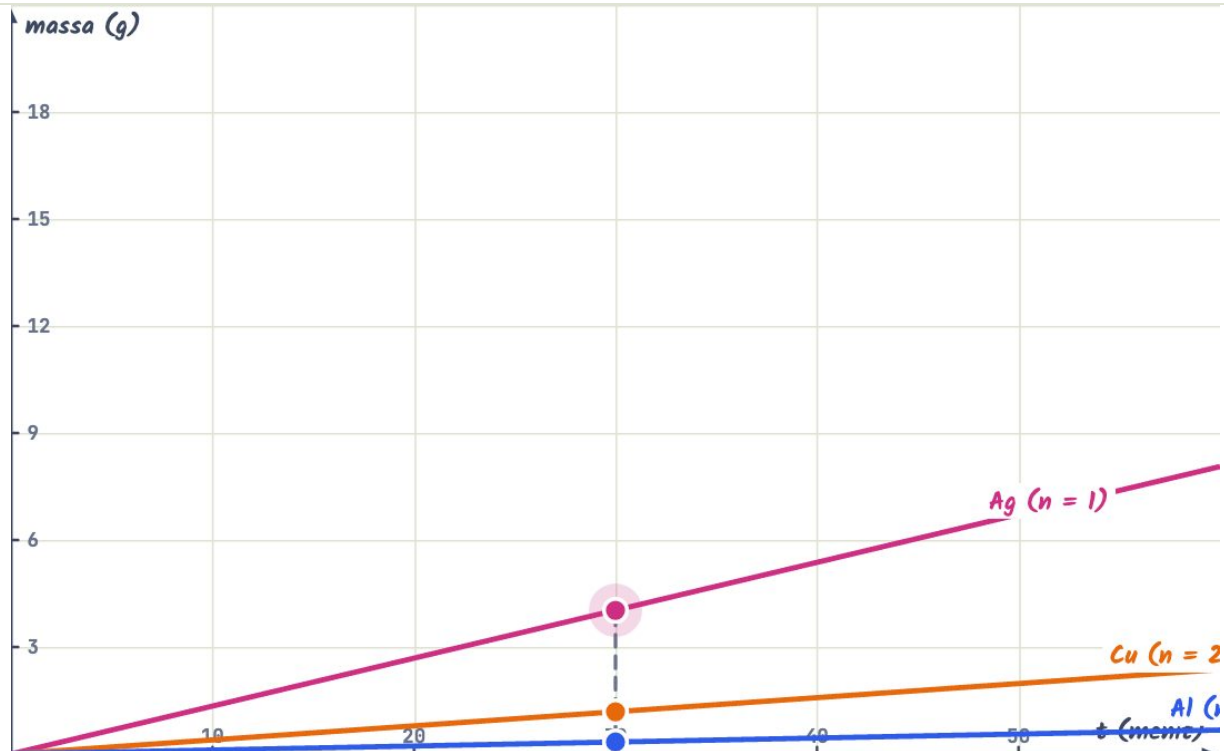
3 Setengah reaksi $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}$: 1 elektron untuk 1 atom, jadi mol Ag $= 9,33 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

4 Massa $= 9,33 \times 10^{-3} \times 108 = 1,01 \text{ g}$.

Sekitar 1,01 g perak. Bila luas sendok $\pm 40 \text{ cm}^2$, tebal lapisannya $\pm 2,4 \mu\text{m}$ (massa jenis perak $10,5 \text{ g/cm}^3$), kira-kira sepertiga puluh tebal rambut.

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{I t}{F}$$

$I = 2 \text{ A}$, $t = 30 \text{ menit}$: $m_{\text{Ag}} = 4,03 \text{ g}$, $m_{\text{Cu}} = 1,18 \text{ g}$, $m_{\text{Al}} = 0$,



muatan Q
3.600 C

mol elektron
0,0373 mol

Ag : Cu : Al (massa)
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 ekuivalen A_r/n (Hukum Faraday II). Gandakan arusnya: apa yang terjadi pada kemiringan garis?

$$V = \frac{I t}{z F} \times V_m$$

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 H₂ (katode) atau Cl₂ (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](https://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 AgNO_3 , sel B berisi CuSO_4 , dan sel C berisi 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 $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$, mol elektron = 0,0100 mol.
Rangkaian seri: semua sel dilewati 0,0100 mol elektron.
- 2 Sel B: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$, mol Cu = $0,0100/2 = 0,00500$ mol, massa = $0,00500 \times 63,5 = 0,318$ g.
- 3 Sel C, katode: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$, mol H_2 = $0,00500$ mol $\rightarrow 0,00500 \times 22,4 = 0,112$ L.
- 4 Sel C, anode: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$, mol O_2 = $0,0100/4 = 0,00250$ mol $\rightarrow 0,0560$ L.

Cu = 0,318 g; H_2 = 112 mL; O_2 = 56 mL. Perhatikan perbandingan $\text{H}_2 : \text{O}_2 = 2 : 1$, 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.

$\text{mol e}^- = I \cdot t / 96.500$; mol logam = $\text{mol e}^- \div n$; massa = mol $\times$ Ar.



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 $\pm 95\%$. 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: $(C/mol \times V) \div (kg/mol) = J/kg; \div 3,6 \times 10^6 = kWh/kg$ ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENERGI-SMELTER-AL](https://aurumgen.my.id/chemipedia#RM-ENERGI-SMELTER-AL)

Elektrolisis bekerja: sepuh, tembaga murni, aluminium, dan klorin

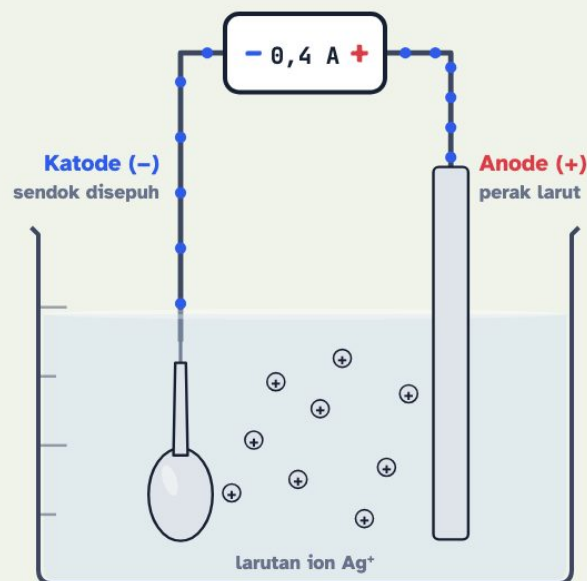
Penyepuhan (elektroplating)

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.



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.

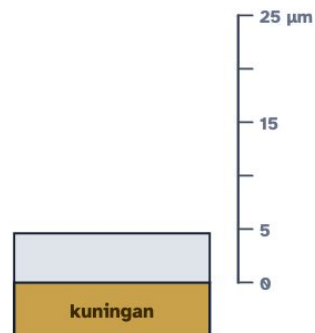


Hukum Faraday: $m = \frac{Ar \cdot I \cdot t}{n \cdot F} = 193,2 \text{ mg perak}$

Penampang diperbesar

tebal 4,6 μm

rambut $\pm 70 \mu\text{m} = 15\times$ lebih tebal



Waktu berjalan
7,2 menit

Muatan
173 C

Massa lapisan
193,2 mg

Tebal lapisan
4,6 μm

Rapat arus
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 $\pm 20 \mu\text{m}$. 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

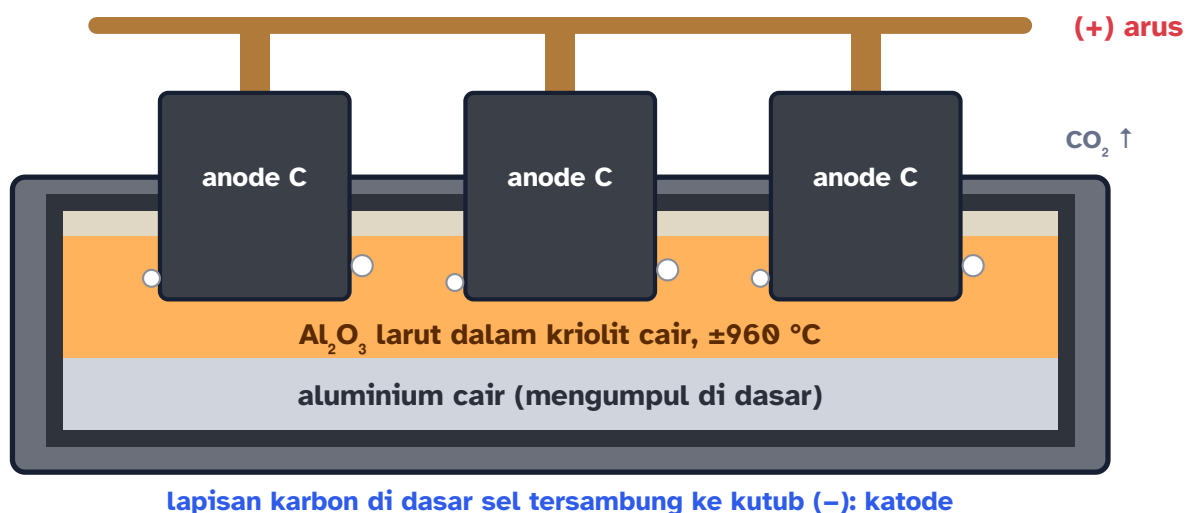
Pemurnian tembaga

Kabel listrik butuh tembaga dengan kemurnian 99,99%, karena sedikit pengotor saja sudah menaikkan hambatan listrik. Tembaga hasil peleburan bijih ($\pm 99\%$) dijadikan **anode**, lempeng tipis tembaga murni menjadi **katode**, dan elektrolitnya larutan 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 (Al_2O_3) dari bijih bauksit, yang banyak ditambang di Kalimantan Barat dan Kepulauan Riau. Masalahnya, Al_2O_3 baru meleleh pada $\pm 2.070^\circ\text{C}$. Kuncinya: alumina dilarutkan dalam lelehan **kriolit** (Na_3AlF_6), sehingga campuran bisa dielektrolisis pada $\pm 960^\circ\text{C}$ saja.



Gelembung di sekitar anode adalah CO_2 : oksigen yang dilepas di anode langsung membakar karbonnya, sehingga anode karbon harus diganti secara berkala.





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. Kebetulanannya 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 $\pm 13\text{--}15$ kWh listrik, jadi smelter selalu dibangun dekat sumber listrik murah dan besar. Mendaur ulang kaleng aluminium hanya butuh $\pm 5\%$ 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 $Q = 2,00 \times 10^5 \times 86.400 = 1,728 \times 10^{10} \text{ C.}$

2 Mol elektron = $1,728 \times 10^{10} / 96.500 = 1,791 \times 10^5 \text{ mol.}$

3 $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Al}$: mol Al (teoretis) = $1,791 \times 10^5 / 3 = 5,969 \times 10^4 \text{ mol} \rightarrow \times 27 = 1,61 \times 10^6 \text{ g} = 1,61 \text{ ton.}$

4 Dengan efisiensi 95%: $0,95 \times 1,61 = 1,53 \text{ ton.}$

$\pm 1,53$ 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 Na^+ . Klorin terbentuk di ruang anode, sedangkan H_2 dan NaOH di ruang katode. Membran mencegah 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, 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, 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, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$. Korosi bukan masalah kecil: sebuah studi internasional tahun 2016 memperkirakan kerugian akibat korosi di seluruh dunia sekitar 3% PDB dunia setiap tahun.

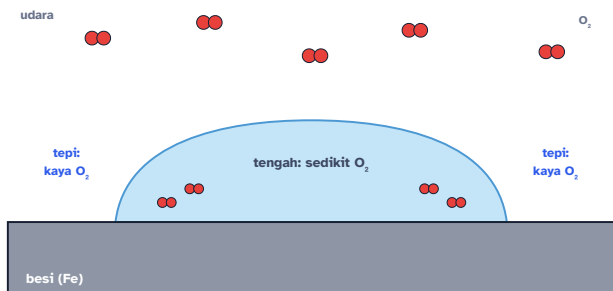
Bahasa sederhana • Karat muncul bila besi bertemu **air** dan **udara** sekaligus. Di tepi pantai, angin membawa butiran air laut yang asin, sehingga pagar, tiang, dan kapal berkarat jauh lebih cepat daripada di pegunungan yang sejuk dan kering. Karat berwarna cokelat kemerahan, rapuh, dan mudah mengelupas.



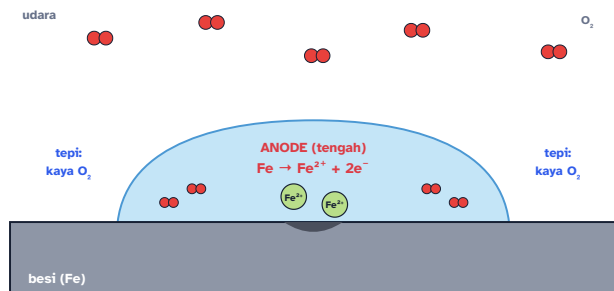
DEFINISI • KOROSI SEBAGAI SEL VOLTA

Korosi besi adalah reaksi redoks **spontan** yang berlangsung seperti sel volta mini. Bagian besi yang menjadi **anode** teroksidasi ($\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$), elektron mengalir di dalam besi, dan di bagian **katode** oksigen direduksi ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-$). Air yang menempel berperan sebagai elektrolit. Reaksi totalnya:

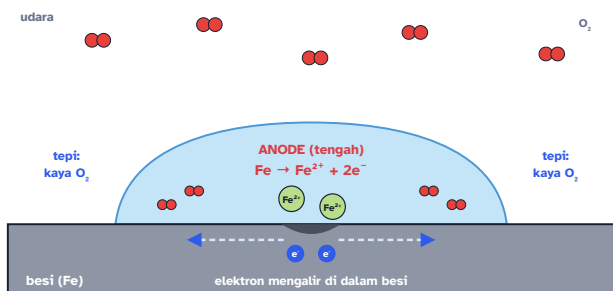




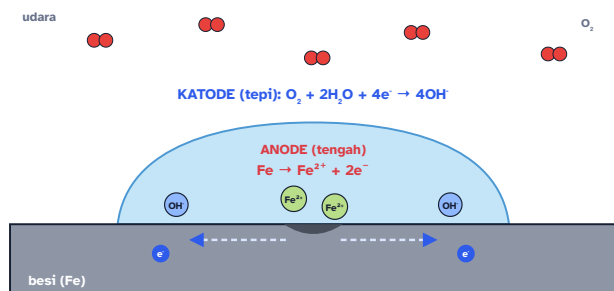
Langkah 1. Setetes air (embun, hujan, atau cipratan ombak) menempel di besi. Oksigen dari udara lebih mudah masuk ke **tapi** tetesan yang tipis daripada ke **tengahnya**.



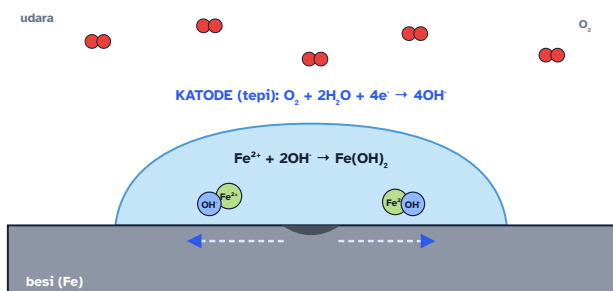
Langkah 2. Di tengah tetesan yang miskin O_2 , besi menjadi **anode** dan teroksidasi: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$. Di sinilah besi terkikis dan membentuk lubang kecil.



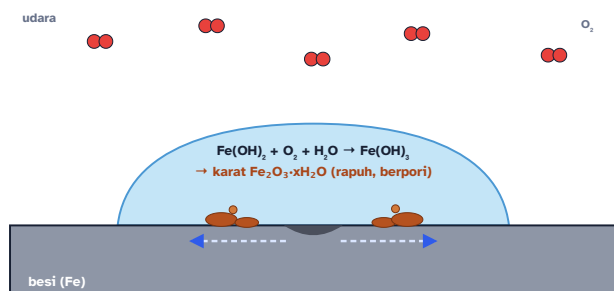
Langkah 3. Elektron tidak bisa berjalan di air, tetapi dengan mudah mengalir **di dalam besi** menuju tepi tetesan. Besi sekaligus berperan sebagai kawat penghubung sel volta mini.



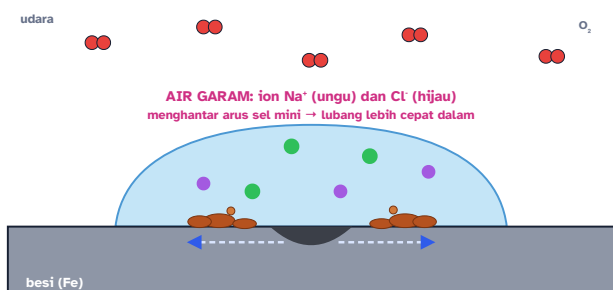
Langkah 4. Di tepi tetesan yang kaya O_2 terjadi **reduksi**: $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$. Bagian ini menjadi **katode**.



Langkah 5. Ion Fe^{2+} dan OH^{-} bergerak di dalam air lalu bertemu: $Fe^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$.



Langkah 6. Oksigen mengoksidasi lebih lanjut: $4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$, yang kemudian kehilangan sebagian air menjadi **karat** cokelat $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$. 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 H^+ menambah reaksi katode $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2$ 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.

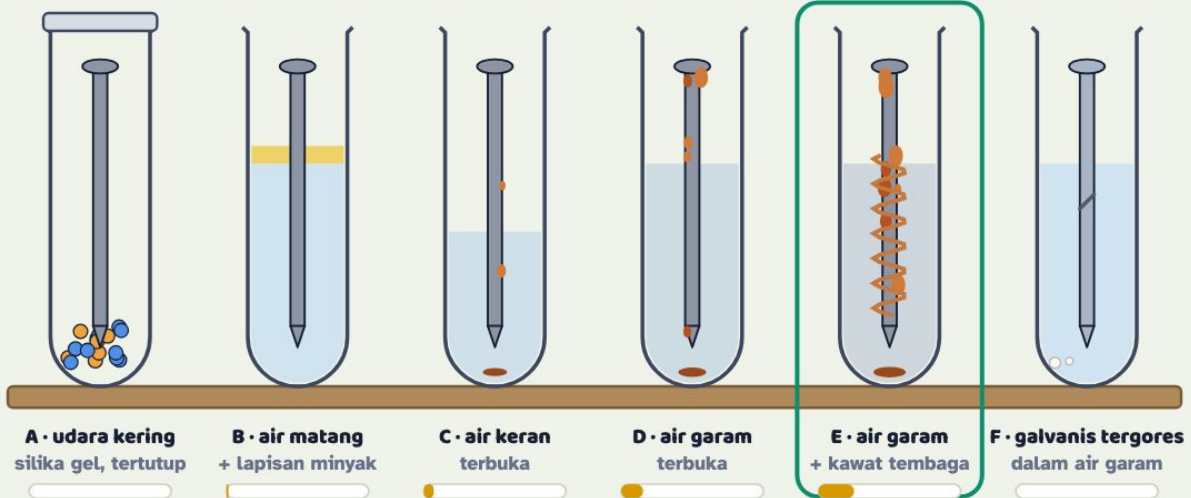
LAB MINI Uji Korosi Paku: minggu demi minggu

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-31

Hari ke-2

ketuk tabung untuk membaca penjelasannya

suhu 28 °C



E • air garam + kawat tembaga

air ✓ • O_2 ✓ • skor karat 1 / 4

Air garam + kawat tembaga: tembaga kurang reaktif ($E^\circ Cu^{2+}/Cu = +0,34 V$) daripada besi ($-0,44 V$). Besi dipaksa menjadi anode sel Fe-Cu dan berkarat paling parah, tembaganya tetap mengkilap.

Hari ke-
2

Minggu ke-
1

Paling berkarat
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



Fe

Fe²⁺e⁻

Unsur

Kiri

Kanan

Fe

1 ●

1 ●

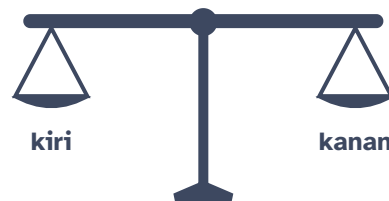
✓

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 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (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."

MITOS

"Elektrolisis air menghasilkan hidrogen dan oksigen sama banyak."

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 Al_2O_3 pada aluminium.

FAKTA

Volumenya 2 : 1. Membentuk satu O_2 butuh 4 elektron, sedangkan satu 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



atau



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**)

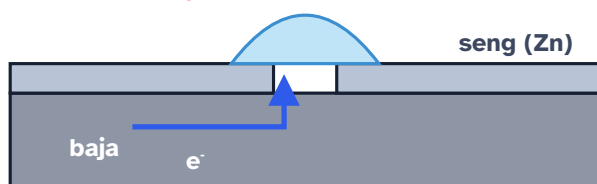
sendok, wastafel,
peralatan rumah
sakit

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

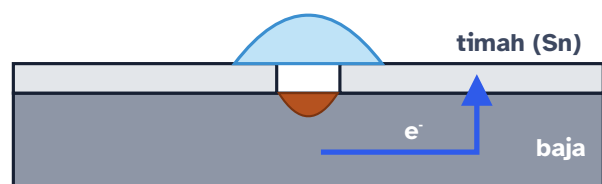
seng berkorban:
 $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$



besi di goresan = katode → aman ✓

Baja berlapis timah, tergores

timah = katode



besi = anode: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ✗

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; $F = 96.500 \text{ C/mol}$)

1 $t = 365 \times 24 \times 3.600 = 3,154 \times 10^7 \text{ s.}$

2 $Q = 0,200 \times 3,154 \times 10^7 = 6,307 \times 10^6 \text{ C, mol elektron} = 6,307 \times 10^6 / 96.500 = 65,4 \text{ mol.}$

3 $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$: mol Zn = $65,4 / 2 = 32,7 \text{ mol} \rightarrow 32,7 \times 65 = 2.124 \text{ g.}$

±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."

MITOS

"Baja tahan karat tidak pernah berkarat."

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.

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 ($E^\circ = -1,66 \text{ V}$). 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 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 dididihkan 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 diperiksa. 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 menyentuh 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 H_2 dan 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?

✓ **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 $\pm 5\text{--}10$ 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 memisahnya.

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 kuarternar**;
- 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**.

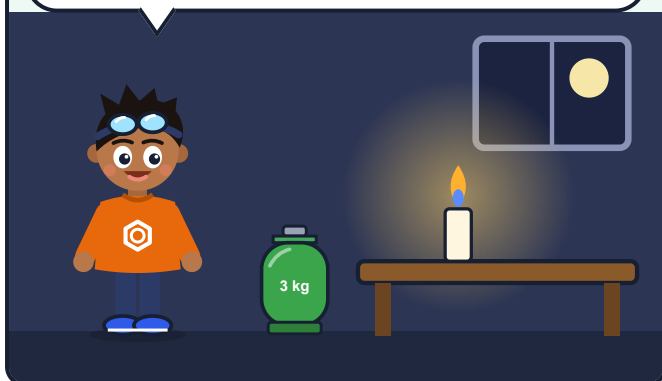
ULAR NAGA KARBON

KOMIK • 4 PANEL

Malam hari, mati lampu di rumah Bima

BIMA

Untung ada lilin! Eh, Kak, katanya lilin, gas LPG, dan bensin motor sama-sama dari minyak bumi, ya?



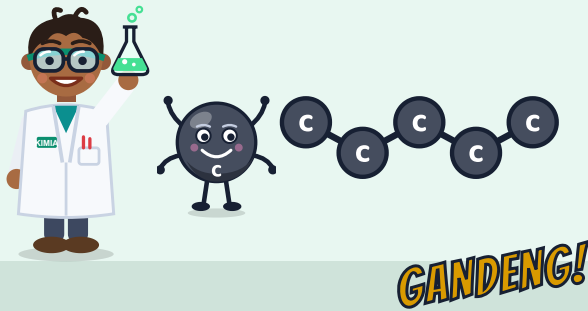
LARAS

Padahal isinya cuma karbon dan hidrogen. Kok yang satu gas, yang satu cair, yang lain padat?



KAK TIRTA

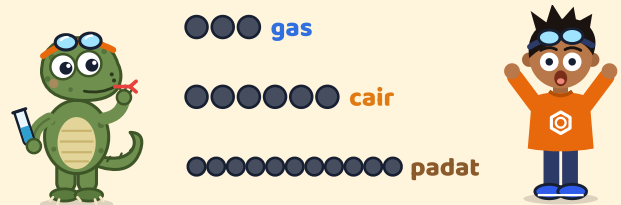
Rahasiannya di panjang rantai! Karbon punya empat tangan dan suka bergandengan dengan karbon lain, seperti main ular naga.

**KIMO**

LPG cuma 3-4 karbon, bensin 5-10, lilin lebih dari 20! Makin panjang ularnya, makin erat saling menempel.

BIMA

Jadi panjang rantai menentukan wujudnya...

**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. Rahasiannya, 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 $\equiv$ C).
4. **Bentuk beragam**: rantai lurus, bercabang, atau cincin.



DEFINISI • HIDROKARBON

Hidrokarbon adalah senyawa yang **hanya** tersusun atas atom karbon dan hidrogen. Contohnya metana CH₄, propana C₃H₈, etena C₂H₄, dan benzena C₆H₆. Gula C₆H₁₂O₆ bukan hidrokarbon, karena mengandung oksigen.



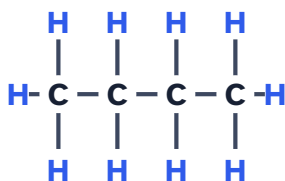
Peta keluarga hidrokarbon. "Jenuh" berarti semua ikatan C-C tunggal, sehingga setiap karbon sudah "kenyang" hidrogen.

Satu molekul bisa ditulis dengan beberapa cara. Kimiawan memilih cara yang paling praktis untuk keperluannya:

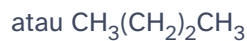
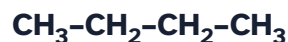
Rumus molekul



Struktur lengkap



Struktur singkat



Rumus kerangka

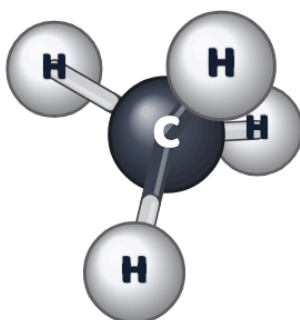


tiap sudut & ujung = 1 C,
H tidak digambar

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 $\approx 16,04$

[PubChem](#) ↗

Tetrahedral sempurna ($109,5^\circ$). Gas rumah kaca dari sawah, sampah, dan peternakan; komponen utama gas alam.

Ketuk tiga atom untuk mengukur sudut di sekitar karbon. Pada etana sudutnya $\pm 109,5^\circ$ (tetrahedral), pada etena $\pm 120^\circ$ (segitiga datar), dan pada etuna 180° (lurus). Ukur juga panjang ikatan C-C, C=C, dan C $\equiv$ C: makin banyak ikatan, makin pendek!

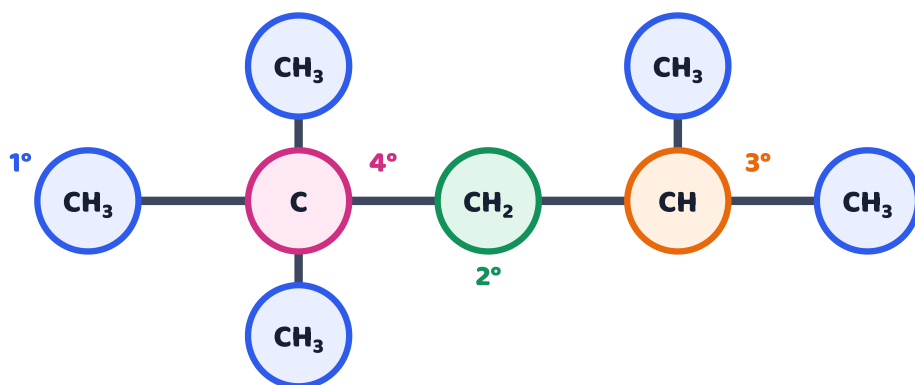
Karbon primer, sekunder, tersier, kuarterner

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 kuarternar** (4°): mengikat 4 atom C lain.



● primer: 5 ● sekunder: 1 ● tersier: 1 ● kuarternar: 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 kuarternar. Banyaknya H + banyaknya tetangga C selalu 4.

CONTOH Menghitung jenis karbon

Tentukan jumlah atom C primer, sekunder, tersier, dan kuarternar dalam $\text{CH}_3-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ (**2-metilpentana**).

- 1 Tiga gugus CH_3 (dua di ujung rantai, satu cabang) masing-masing mengikat 1 C $\rightarrow$ 3 C primer.
- 2 CH di posisi 2 mengikat tiga C (dua di rantai + cabang) $\rightarrow$ 1 C tersier.
- 3 Dua CH_2 di tengah rantai masing-masing mengikat 2 C $\rightarrow$ 2 C sekunder. Tidak ada C tanpa H $\rightarrow$ 0 kuarternar.

Primer 3, sekunder 2, tersier 1, kuarternar 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 C_nH_{2n+2} . Nama alkana berakhiran **-ana**.

n	Nama	Rumus	Struktur singkat	Mr	Titik didih (°C)	Wujud (25 °C)
1	metana	CH ₄	CH ₄	16	–162	gas
2	etana	C ₂ H ₆	CH ₃ CH ₃	30	–89	gas
3	propana	C ₃ H ₈	CH ₃ CH ₂ CH ₃	44	–42	gas
4	butana	C ₄ H ₁₀	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₃	58	–0,5	gas
5	pentana	C ₅ H ₁₂	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₃	72	36	cair
6	heksana	C ₆ H ₁₄	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	86	69	cair
7	heptana	C ₇ H ₁₆	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	100	98	cair
8	oktana	C ₈ H ₁₈	CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₃	114	126	cair
9	nonana	C ₉ H ₂₀	CH ₃ (CH ₂) ₇ CH ₃	128	151	cair
10	dekana	C ₁₀ H ₂₂	CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₃	142	174	cair



DEFINISI • DERET HOMOLOG

Deret homolog adalah kelompok senyawa dengan rumus umum yang sama, yang anggota berurutannya berbeda satu gugus –CH₂– (Mr selisih 14). Sifat kimianya mirip, sedangkan sifat fisiknya (titik didih, massa jenis) berubah secara teratur.



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, $M_r = 58$. Perkiraan titik didihnya $\approx -0,5^\circ\text{C}$.

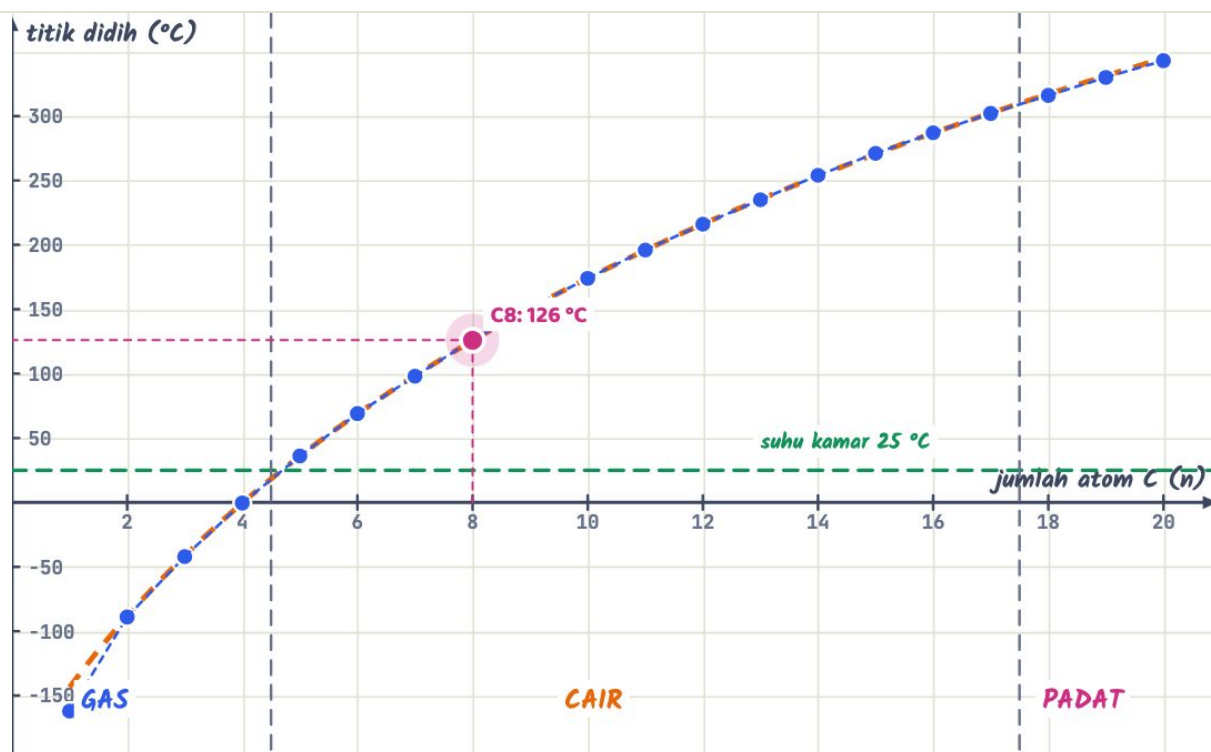
Cek satuan: Ar C = 12, H = 1 · titik didih dari rumus empiris Egloff (cocok untuk $n \geq 2$)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ALKANA-UMUM](https://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.

$$T_d = f(n)$$

$$n = 8 : T_d = 126 ^\circ\text{C}$$



cair pada suhu kamar

titik didih (data)
126 $^\circ\text{C}$

perkiraan rumus
125,6 $^\circ\text{C}$

naik bila +1 C
25 $^\circ\text{C}$

Titik biru adalah data; garis jingga putus-putus adalah rumus perkiraan (Egloff). Seret titik magenta. Perhatikan: kenaikan titik didih paling besar di awal (metana $\rightarrow$ etana naik $73 ^\circ\text{C}$), lalu makin kecil (C19 $\rightarrow$ C20 hanya naik $13 ^\circ\text{C}$). Di mana garis hijau $25 ^\circ\text{C}$ 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

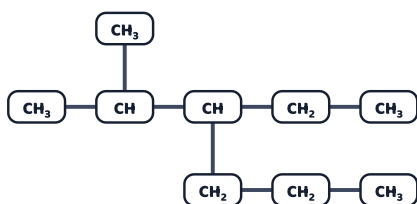
Nama IUPAC bekerja seperti alamat rumah: **nama jalan** (rantai induk), **nomor rumah** (posisi cabang), dan **nama penghuni** (jenis cabang). Cabang alkana disebut **gugus alkil**: alkana yang kehilangan satu atom H, berakhiran -il.

Gugus alkil	Rumus	Asal
metil	$-\text{CH}_3$	metana
etil	$-\text{CH}_2\text{CH}_3$	etana
propil	$-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	propana (lewat C ujung)
isopropil	$-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	propana (lewat C tengah)
<i>tert</i> -butil	$-\text{C}(\text{CH}_3)_3$	isobutana (lewat C tersier)

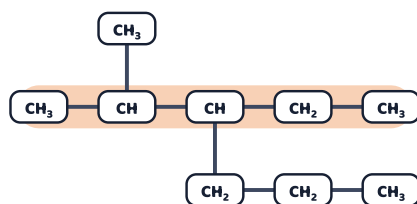


ATURAN IUPAC • MENAMAI ALKANA BERCABANG

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 diabadkan, tetapi iso- ikut.
5. **Tulis**: angka dipisah koma, angka dan huruf dipisah tanda hubung, cabang terakhir menyatu dengan nama induk: **3-etil-2-metilheksana**.

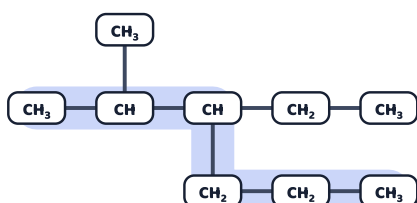


Langkah 1. Alkana C_9H_{20} ini akan kita beri nama. Bima langsung membaca baris mendatar dari kiri ke kanan...



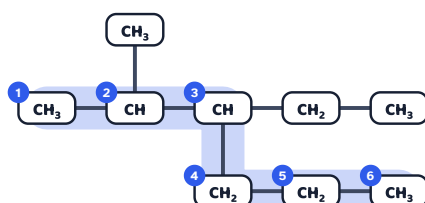
baris mendatar: 5 C → "pentana"? X

Langkah 2. Baris mendatar hanya berisi 5 atom C. Rantai di gambar boleh berbelok, jadi jangan tertipu bentuk gambarnya!



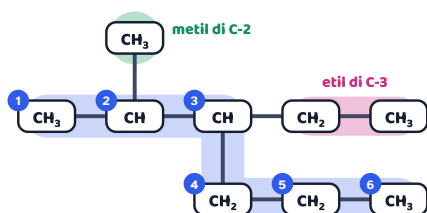
rantai terpanjang: 6 C → heksana ✓

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.)



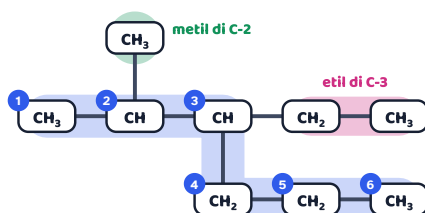
cabang di C-2 dan C-3 ✓ (dari ujung lain: C-4 dan C-5 X)

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.



cabang: metil (C-2) dan etil (C-3)

Langkah 5. Kenali cabangnya: $-CH_3$ di C-2 adalah **metil**, $-CH_2CH_3$ di C-3 adalah **etil**.



e sebelum m
(urutan abjad)

3-etil-2-metilheksana

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: **pentagon** (5), **heksagon** (6), **heptagon** (7), **oktopus** berkaki 8, **nonagon** (9), **dekade** (10). Dan ingat: kalau namamu memuat "2-etil" atau "1-metil", rantai induknya pasti belum terpanjang!

Beri nama IUPAC isooktana: $(\text{CH}_3)_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$.

- 1 Tulis lengkap: $\text{CH}_3-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_3$. 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.

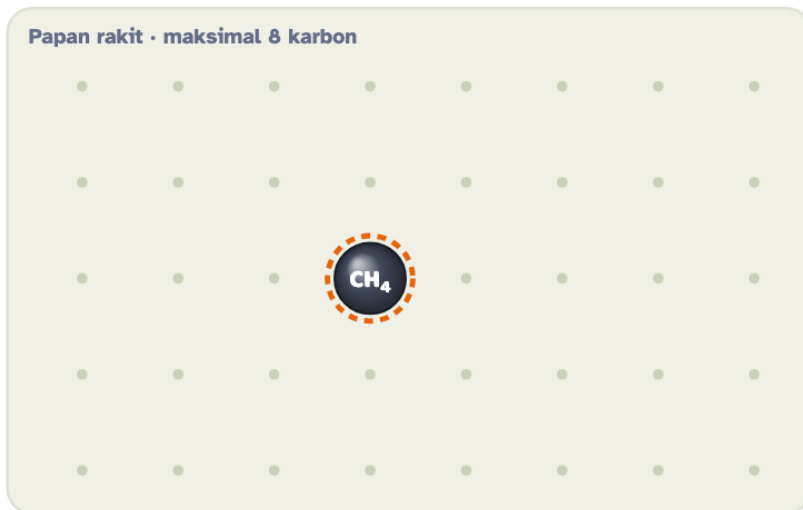
2,2,4-trimetilpentana. Nomor 2 ditulis dua kali karena ada dua metil di C-2: setiap cabang wajib punya nomornya sendiri.

Bima menamai $\text{CH}_3-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_2\text{H}_5)-\text{CH}_3$ sebagai "**2-metil-4-etilpentana**". Periksa dan perbaiki namanya.

- 1 Gugus etil $-\text{C}_2\text{H}_5$ bisa menjadi bagian rantai! Rantai $\text{CH}_3-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ 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.

Papan rakit • maksimal 8 karbon



Rumus molekul

CH₄

Mr = 16

Titik didih ≈ -162 °C

Jenis atom C

● metana: 1

Isomer CH₄: 1/1

●

metana

Ketuk titik di sebelah karbon untuk menyambung karbon baru.

Rumus

CH₄

Mr

16

Nama IUPAC

metana

Isomer ditemukan

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 melepaskannya. Rumus, Mr, titik didih, jenis karbon, dan **nama IUPAC** muncul otomatis. Misi: temukan kelima isomer C₆H₁₄ dan kesembilan isomer C₇H₁₆. Kalau kamu merakit molekul yang sama dengan gambar berbeda, perakitan 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."

MITOS

"Minyak tanah bisa dicuci dengan air karena sama-sama cair."

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).

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 C_nH_{2n}). Hidrokarbon dengan satu ikatan rangkap tiga (C≡C) disebut **alkuna** (akhiran **-una**, rumus C_nH_{2n-2}). Keduanya **tak jenuh**: masih "lapar" dan bisa menampung atom tambahan.

	Alkana	Alkena	Alkuna
Rumus umum	C_nH_{2n+2}	C_nH_{2n}	C_nH_{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 C_2H_4	etuna C_2H_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**. Nomor dari ujung yang membuat ikatan rangkap mendapat nomor **sekecil mungkin**, lalu tulis nomor itu sebelum nama induk. Contoh: $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ adalah 1-butena, $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$ adalah 2-butena, $\text{CH}_3-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}-\text{CH}_3$ adalah 2-metil-2-butena, dan $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{C}-\text{CH}_3$ adalah 2-butuna. (Gaya IUPAC terbaru menyisipkan nomornya: but-1-ena, but-2-ena; 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 etena (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 $-0,5^\circ\text{C}$).

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**.

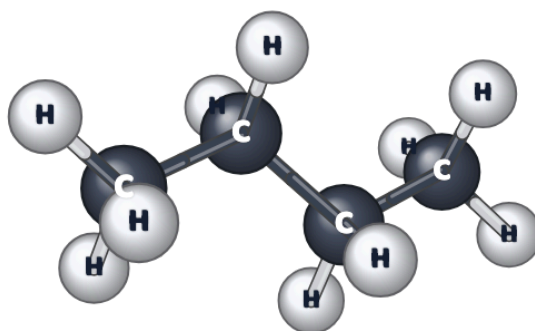


DEFINISI • ISOMER

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 ₅ H ₁₂	Struktur singkat	Bentuk	Titik didih (°C)
pentana (n-pentana)	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	rantai lurus, memanjang	36
2-metilbutana (isopentana)	CH ₃ CH(CH ₃)CH ₂ CH ₃	satu cabang	28
2,2-dimetilpropana (neopentana)	C(CH ₃) ₄	hampir bulat seperti bola	9,5

MOLEKUL 3D Kembar rumus, beda bentuk



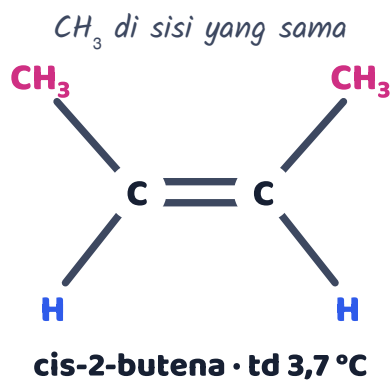
Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Butana (n-butana) C₄H₁₀ Mr ≈ 58,12 PubChem ↗

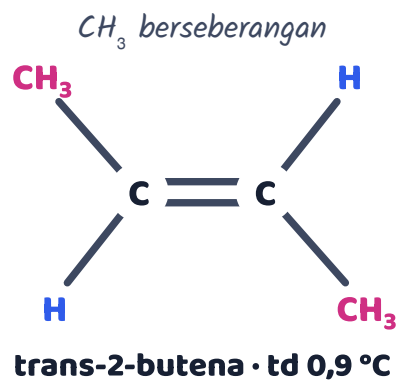
Isi korek gas dan LPG. Isomernya: isobutana.

Bandingkan butana yang memanjang dengan isobutana yang membulat: hitung atomnya, rumusnya sama-sama C₄H₁₀. Lalu bandingkan cis- dan trans-2-butena: di mana letak kedua gugus CH₃ 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.



*tidak bisa
diputar X*



Isomer geometri 2-butena. Trans lebih simetris dan meleleh pada $-106\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan cis pada $-139\text{ }^{\circ}\text{C}$.



SYARAT ISOMER CIS-TRANS

(1) Ada ikatan yang tidak bisa berputar, misalnya $\text{C}=\text{C}$. (2) **Setiap** atom C pada ikatan rangkap itu mengikat **dua gugus yang berbeda**. Karena itu 2-butena punya isomer cis-trans, sedangkan 1-butena ($\text{CH}_2=$: 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."

MITOS

"Rantai lurus yang digambar berbelok adalah isomer baru."

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.

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!

MITOS

"Cis-2-butena bisa berubah jadi trans-2-butena dengan sendirinya, cukup diputar."

FAKTA

Ikatan π pada $\text{C}=\text{C}$ mengunci rotasi. Untuk mengubah cis menjadi trans, ikatan π harus diputus dulu, misalnya dengan cahaya ultraviolet atau katalis.



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

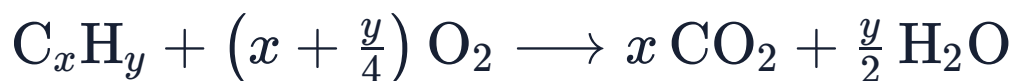
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KETIDAKJENUHAN](https://aurumgen.my.id/chemipedia#RM-KETIDAKJENUHAN)

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.



RUMUS HIDUP Oksigen untuk pembakaran sempurna

$$n_{\text{O}_2} = x + \frac{y}{4}$$

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)

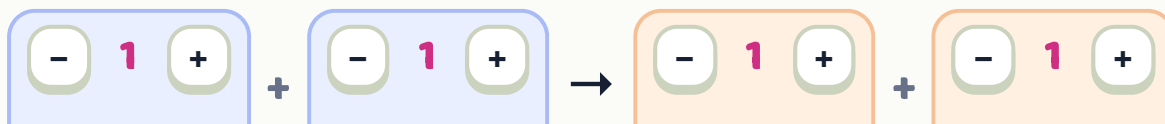
1 mol C_3H_8 + 5 mol $\text{O}_2 \rightarrow$ 3 mol CO_2 + 4 mol H_2O . Udara hanya $\pm 21\%$ O_2 , jadi butuh ± 533 L udara (STP).

Cek satuan: mol O_2 per mol bahan bakar

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

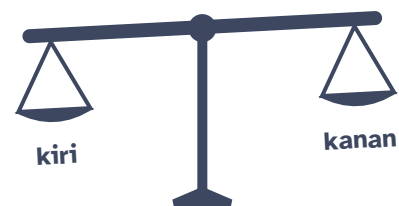
PENYETARA REAKSI

Setarakan pembakaran hidrokarbon





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 $\frac{13}{2}$ 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:



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

Anggap isi tabung LPG 3 kg seluruhnya butana, C₄H₁₀. Berapa kilogram O₂ yang dibutuhkan dan berapa kilogram CO₂ yang terbentuk bila semuanya terbakar sempurna? (Ar C = 12, H = 1, O = 16)

- 1 Persamaan setara: $2 \text{C}_4\text{H}_{10} + 13 \text{O}_2 \longrightarrow 8 \text{CO}_2 + 10 \text{H}_2\text{O}$.
- 2 Mol butana: $n = 3000/58 = 51,7 \text{ mol}$.
- 3 Mol O₂ = $\frac{13}{2} \times 51,7 = 336,2 \text{ mol} \rightarrow \text{massa} = 336,2 \times 32 = 10.759 \text{ g} \approx 10,8 \text{ kg}$.
- 4 Mol CO₂ = $4 \times 51,7 = 206,9 \text{ mol} \rightarrow \text{massa} = 206,9 \times 44 = 9.103 \text{ g} \approx 9,1 \text{ kg}$.

Butuh ±10,8 kg oksigen dan menghasilkan ±9,1 kg CO₂, 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 C₃H₈ butuh $3 + 8/4 = 5 \text{ mol O}_2$.

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):



Bila klorin berlebih, penggantian berlanjut menjadi CH₂Cl₂, CHCl₃ (kloroform), dan CCl₄. Hasilnya campuran, sehingga di industri reaksi ini diatur dengan perbandingan pereaksi yang cermat.

**MEKANISME RADIKAL BEBAS**

Substitusi alkana berlangsung lewat **radikal bebas** (atom atau gugus dengan elektron tak berpasangan, ditandai titik):

- **Inisiasi:** $\text{Cl}_2 \xrightarrow{\text{UV}} 2 \text{Cl}^\bullet$ (pemutusan homolitik).
- **Propagasi:** $\text{Cl}^\bullet + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{HCl} + \text{CH}_3^\bullet$ lalu $\text{CH}_3^\bullet + \text{Cl}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}^\bullet$. Radikal Cl lahir kembali, sehingga satu foton bisa memicu ribuan reaksi: **reaksi berantai**.
- **Terminasi:** dua radikal bertemu, misalnya $\text{CH}_3^\bullet + \text{Cl}^\bullet \longrightarrow \text{CH}_3\text{Cl}$ atau $2 \text{CH}_3^\bullet \longrightarrow \text{C}_2\text{H}_6$ (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.

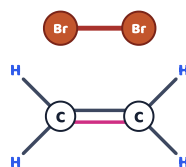
Adisi: ikatan rangkap membuka diri

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)	$\text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{H}_2 \xrightarrow{\text{Ni}} \text{CH}_3-\text{CH}_3$	hidrogenasi minyak nabati menjadi margarin
Bromin (air brom)	$\text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{Br}_2 \longrightarrow \text{CH}_2\text{Br}-\text{CH}_2\text{Br}$	uji ikatan rangkap: warna jingga hilang
Hidrogen halida	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3 + \text{HBr} \longrightarrow \text{CH}_3-\text{CHBr}-\text{CH}_3$	membuat haloalkana
Air (katalis asam, panas)	$\text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{H}^+} \text{CH}_3-\text{CH}_2\text{OH}$	membuat etanol industri



air brom

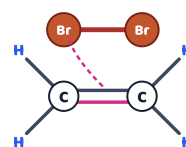


etena ($C=C$) + bromin (jingga)

Langkah 1. Air brom berwarna jingga-cokelat karena molekul Br_2 . Kita meneteskan etena (atau alkena lain) ke dalamnya.



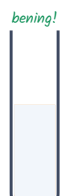
air brom



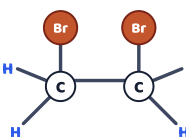
etena ($C=C$) + bromin (jingga)

ikatan π terbuka...

Langkah 2. Molekul bromin mendekati ikatan rangkap yang kaya elektron. Ikatan π , yang lebih lemah, mulai terbuka...

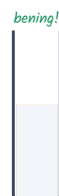


air brom

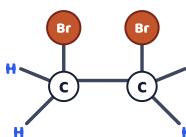


1,2-dibromoetana (tak berwarna)

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**.



air brom



1,2-dibromoetana (tak berwarna)

tetap jingga



heksana + air brom

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-bromopropena** sebagai produk utama, bukan 1-bromopropena.

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 $60-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $\pm 350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 ($\pm$ $^{\circ}\text{C}$)	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

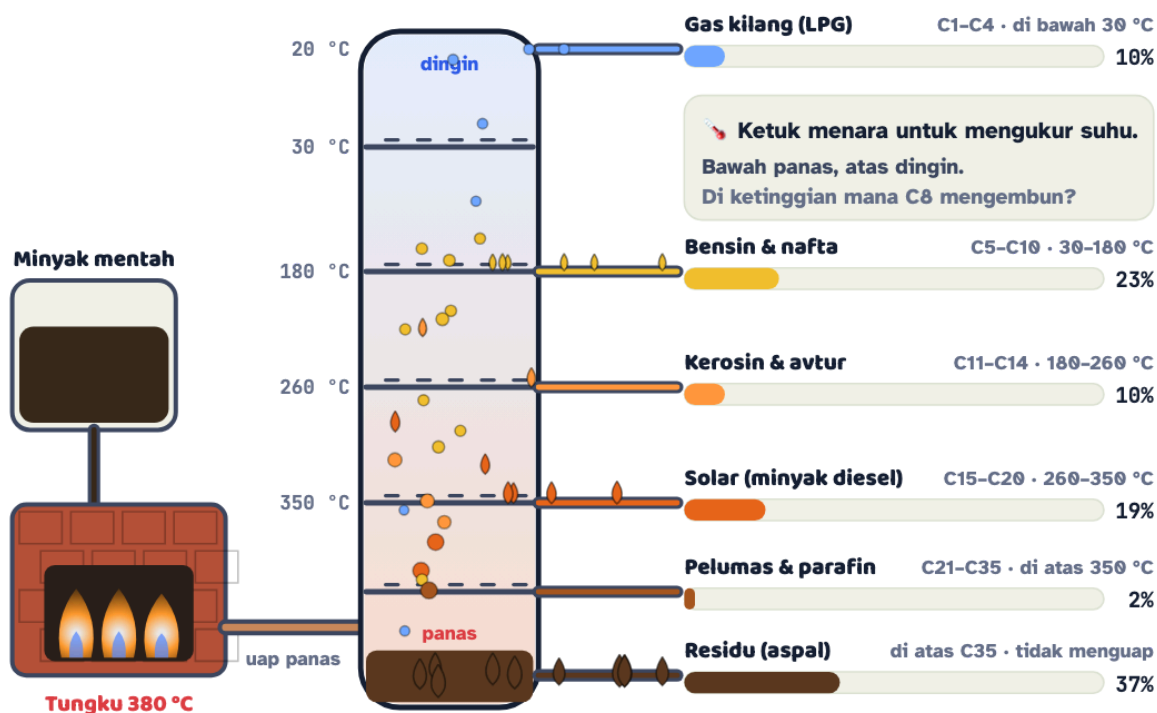
Rentang di atas adalah perkiraan; setiap kilang punya batas sendiri. Fraksi yang sangat berat tidak menguap pada $\pm 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan malah terurai bila dipanaskan lebih tinggi, sehingga residu disuling ulang pada tekanan

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

10 %

Bensin

23 %

Kerosin

10 %

Solar

19 %

Pelumas

2 %

Residu

37 %

Molekul diolah

62

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:

$C_{16}H_{34} \rightarrow C_8H_{18} + C_8H_{16}$. 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.

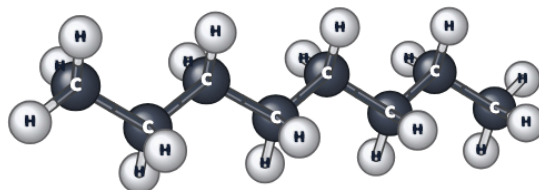


DEFINISI • BILANGAN OKTAN

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 $\approx 114,23$

[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.

$$ON \approx \frac{V_A ON_A + V_B ON_B}{V_A + V_B}$$

Oktan campuran kira-kira sama dengan rata-rata oktan kedua bensin, ditimbang menurut volumenya.



20 L oktan 90 + 10 L oktan 98 → 30 L campuran dengan oktan ≈ 92,7.

Cek satuan: $(L \times \text{oktan}) \div L = \text{oktan}$ ✓ · 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**, $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$, 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."

MITOS

"Bensin oktan 92 berisi 92% oktana."

FAKTA

Oktan mengukur ketahanan terhadap ketukan, bukan energi. Pakailah oktan sesuai anjuran pabrik mesin: lebih rendah bisa mengetuk, lebih tinggi tidak menambah tenaga.

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 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 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, $2\text{CO} + 2\text{NO} \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{N}_2$; 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, 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!



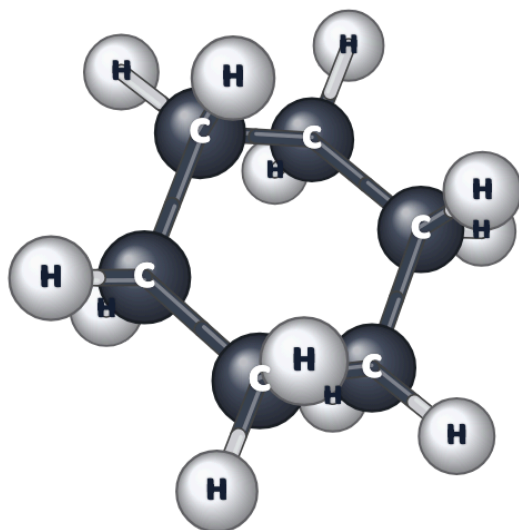
TAMU DARI MASA LALU

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 C₆H₁₂

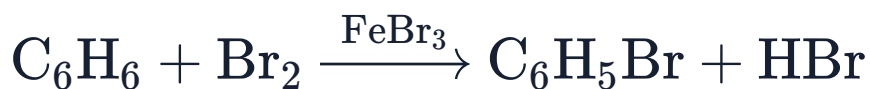
Mr ≈ 84,16

[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:



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 pengeksport 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 $\Delta H = -120$ kJ/mol. Bila benzena benar-benar punya tiga $C=C$ terpisah, hidrogenasinya akan melepas $3 \times (-120) = -360$ 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 C_{20} – C_{40} 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 $\pm -50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Biosolar

Solar yang dicampur biodiesel dari minyak sawit. Indonesia mewajibkan campuran ini untuk mengurangi impor solar dan emisi karbon.

⚡ Cek Cepat

Nama IUPAC $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—CH}(\text{CH}_3)\text{—CH}_3$ 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 kuarternar**

- 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

$$\text{C}_n\text{H}_{2n+2} \quad M_r = 12n + (2n + 2) = 14n + 2$$

Rumus umum alkana. Setiap tambahan satu karbon membawa dua hidrogen, jadi Mr naik 14 setiap kali rantai bertambah satu gugus CH₂.

$$DBE = \frac{2C + 2 - H}{2}$$

Derajat ketidakjenuhan. Bandingkan jumlah H molekulmu dengan alkana yang jumlah C-nya sama; setiap kekurangan dua H berarti satu ikatan π atau satu cincin.

$$n_{\text{O}_2} = x + \frac{y}{4}$$

Oksigen untuk pembakaran sempurna. Setiap atom C butuh satu molekul O₂ untuk menjadi CO₂, dan setiap empat atom H butuh satu molekul O₂ untuk menjadi dua H₂O.

$$ON \approx \frac{V_A ON_A + V_B ON_B}{V_A + V_B}$$

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, 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 $78\text{ }^{\circ}\text{C}$, dimetil eter pada $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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. Rahasiannya 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**.

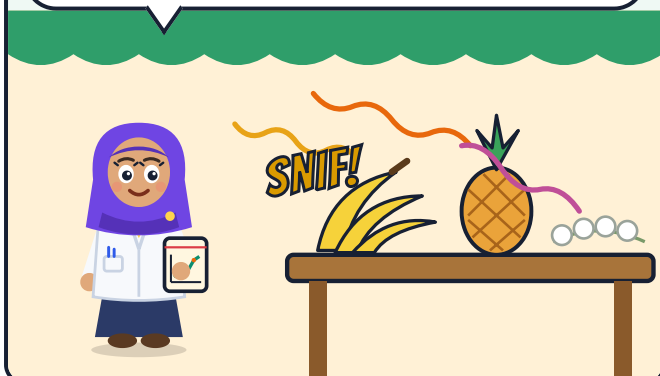
PASAR AROMA

KOMIK • 4 PANEL

Sabtu pagi, di pasar buah

LARAS

Hmm... pisang ambon, nanas, melati.
Wanginya beda-beda semua! Aku catat dulu.



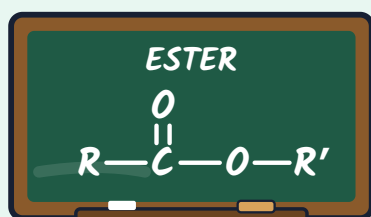
BIMA

Aku tahu! Pisang punya "molekul pisang", nanas punya "molekul nanas".
Pasti bentuknya beda total!



KAK TIRTA

Kejutan: ketiganya **ester**! Rangkanya sama, $R-COO-R'$. Beda sedikit di "ekornya", aromanya sudah lain.

TADAA!**Kimo ikut mengendus...****KIMO**

Pisang: isoamil asetat. Nanas: etil butirrat. Melati: benzil asetat. Cengkeh? Eugenol, tiga "wajah" sekaligus!

BIMA

Jadi gugus fungsi itu wajah molekul, ya...

**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 $\text{-CH}_2\text{-}$ (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 $\text{CH}_3\text{-}$ atau $\text{C}_2\text{H}_5\text{-}$). Jadi semua alkohol dapat ditulis R-OH . Inilah sembilan wajah yang paling sering kamu temui:

Alkohol (alkanol)



Eter (alkoksialkana)



Aldehida (alkanal)



Keton (alkanon)



Asam karboksilat



Ester (alkil alkanoat)



Haloalkana



Amina



Amida



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 $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{O}$	alkanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$: etanol • alkohol tapai
Eter	oksi, -O-	$\text{R-O-R}'$ $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{O}$	alkoksialkana	CH_3OCH_3 : metoksimetana • dimetil eter

Aldehida	formil, -CHO	$R-CHO$ $C_nH_{2n}O$	alkan al	HCHO: metanal · formaldehida
Keton	karbonil, -CO-	$R-CO-R'$ $C_nH_{2n}O$	alkan on	CH ₃ COCH ₃ : propanon · aseton
Asam karboksilat	karboksil, -COOH	$R-COOH$ $C_nH_{2n}O_2$	asam alkan oat	CH ₃ COOH: asam etanoat · asam asetat (cuka)
Ester	-COO-	$R-COO-R'$ $C_nH_{2n}O_2$	alkil alkan oat	CH ₃ COOC ₂ H ₅ : etil etanoat · etil asetat
Haloalkana	halo, -X	$R-X$ $C_nH_{2n+1}X$	halo alkana	C ₂ H ₅ Cl: kloroetana · etil klorida
Amina (primer)	amino, -NH ₂	$R-NH_2$ $C_nH_{2n+3}N$	alkan amina	CH ₃ NH ₂ : metanamina · metilamina
Amida	-CONH ₂	$R-CONH_2$ $C_nH_{2n+1}NO$	alkan amida	CH ₃ CONH 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 $C_nH_{2n+2}O$; aldehida dan keton sama-sama $C_nH_{2n}O$; asam karboksilat dan ester sama-sama $C_nH_{2n}O_2$. Pasangan yang rumus molekulnya sama tetapi gugus fungsinya beda disebut **isomer fungsi**.

Karena setiap anggota deret homolog bertambah satu -CH₂-, Mr-nya naik 14 secara teratur. Coba geser jumlah karbon dan "wajahnya" di bawah ini:

$$C_n H_{2n+2-2u} O_x \Rightarrow M_r = 14n + 2 - 2u + 16x$$

Setiap tambahan satu gugus $-CH_2-$ menambah Mr sebesar 14; jumlah atom O dan ikatan rangkap $C=O$ menentukan 'keluarga' molekulnya.

 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

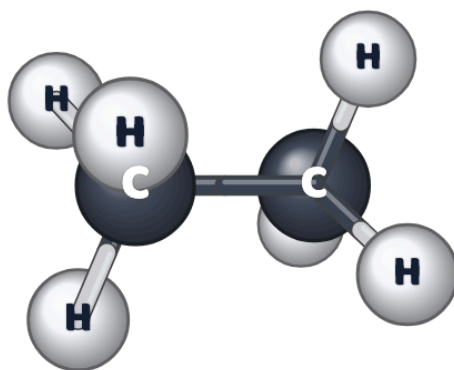
alkanol atau alkoksialkana (eter)

🔑 C_2H_6O : etanol atau dimetil eter

Rumus molekul: $C_2 H_6 O_1 \rightarrow M_r = 46$. 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](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-deret-homolog)



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etana C_2H_6

Mr $\approx 30,07$

[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 $78^\circ C$) atau dimetil eter (gas, mendidih $-24^\circ C$). 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  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: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ = 1-propanol; $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ = 2-propanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ = 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 golongan: (a) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$; (b) $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_3$; (c) $(\text{CH}_3)_3\text{COH}$; (d) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_3$.

- 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 $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$: semuanya isomer!

Eter punya atom O yang diapit dua gugus alkil, $\text{R}-\text{O}-\text{R}'$. Namanya disusun sebagai **alkoksialkana**: gugus alkil yang lebih pendek ditambah O menjadi awalan *alkoksi*. Contoh: $\text{CH}_3-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_3$ 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 ($\pm 27^\circ C$), wujud keduanya...

Sama-sama cair, karena Mr-nya sama.

Sama-sama gas, karena molekulnya kecil.

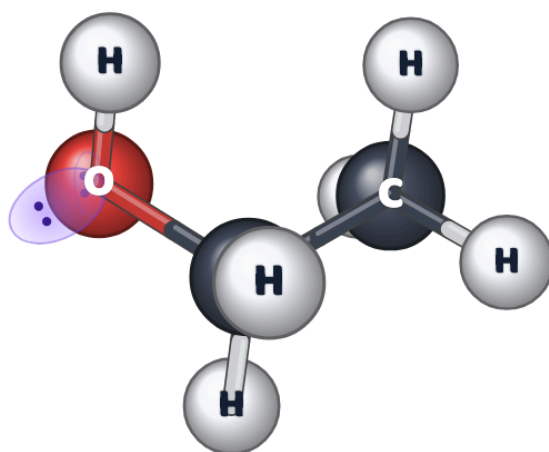
Etanol cair, dimetil eter gas.

Etanol gas, dimetil eter cair.

Jawabannya: etanol cair (mendidih $78^\circ C$), dimetil eter gas (mendidih $-24^\circ C$). Selisihnya lebih dari $100^\circ C$! 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 $\approx 46,07$

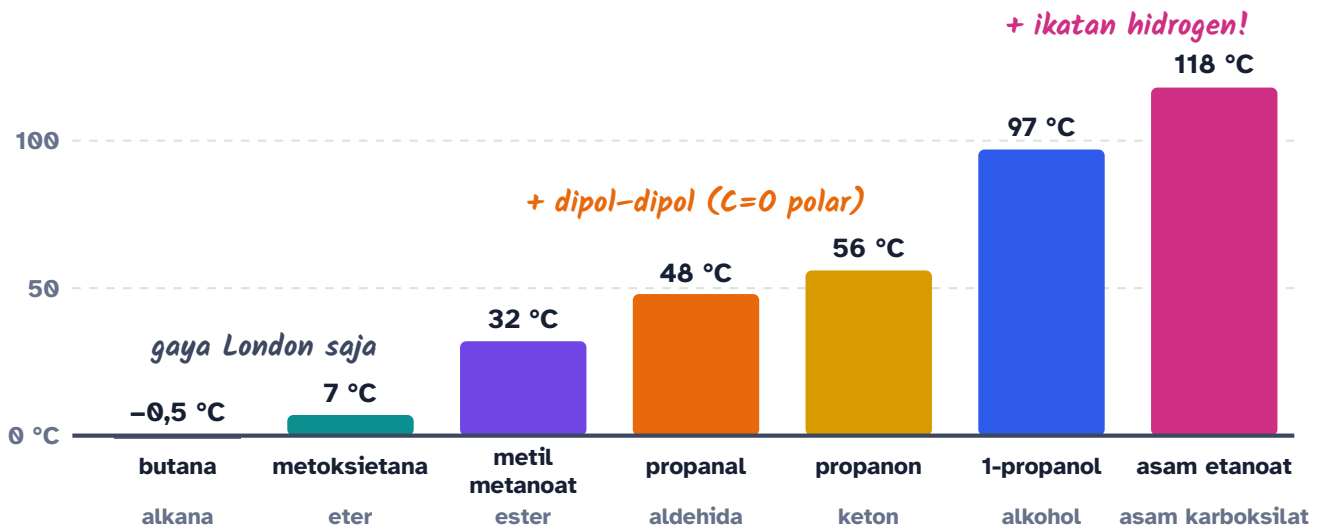
[PubChem](#) ↗

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 $\pm 7,7$ g per 100 mL air, 1-pentanol $\pm 2,2$ g, dan 1-heksanol tinggal $\pm 0,6$ 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."

MITOS

"Alkohol 96% pasti lebih ampuh membunuh kuman daripada alkohol 70%."

FAKTA

–OH alkohol terikat kovalen pada karbon, jadi tidak melepas ion OH^- . Larutannya netral; uji dengan air kubis ungu, warnanya tetap ungu.

FAKTA

Justru campuran $\pm 70\%$ lebih efektif. Air membantu alkohol merusak (mendenaturasi) protein kuman dan memperlambat penguapan, sehingga waktu kontak 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, $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$, berwarna **jingga**. Bila dipanaskan bersama alkohol primer atau sekunder, alkohol itu teroksidasi dan ion dikromat tereduksi menjadi ion Cr^{3+} yang berwarna **hijau**. Alkohol tersier tidak punya atom H pada karbon pengikat -OH, sehingga tidak teroksidasi: warnanya tetap jingga.



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:

$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{ragi}} 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$. 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**, 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.

**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 $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ (lebar karena ikatan hidrogen).
- C=O aldehida, keton, asam, ester: pita **tajam dan kuat** di sekitar $1680\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$.
- O-H asam karboksilat: pita sangat lebar di $2500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$.
- C-O alkohol, eter, ester: $1050\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$.

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**

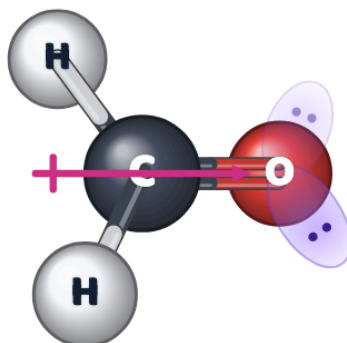
- **Alkanal**: rantai induk mengandung –CHO, dan atom C pada –CHO **selalu nomor 1** (tidak perlu ditulis). Akhiran -a diganti **-al**. $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$ = propanal; $(\text{CH}_3)_2\text{CHCHO}$ = 2-metilpropanal.
- **Alkanon**: rantai induk mengandung C=O, dinomori dari ujung terdekat dengan C=O. Akhiran **-on**. $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{CH}_3$ = 2-butanon (butanon); $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COCH}_2\text{CH}_3$ = 3-pentanon. Pada propanon dan butanon nomornya boleh dihilangkan karena letaknya pasti.

**AWAS JEBAKAN**

Satu huruf saja bisa mengubah golongan! **Propanal** ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$, aldehida), **propanol** ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, alkohol), dan **propanon** (CH_3COCH_3 , keton) adalah tiga zat berbeda. Propanal dan propanon adalah isomer fungsi ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), sedangkan propanol punya dua atom H lebih banyak ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$).

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.

polar



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Formaldehida CH_2O Mr $\approx 30,03$ [PubChem](#)

Segitiga datar. Larutannya (formalin) mengawetkan jenazah dan **DILARANG** untuk makanan.

Nyalakan panah dipol: ke mana arah tarikan elektron pada $\text{C}=\text{O}$? 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 ($\pm 37\%$) 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 dihindangi lalat) tidak selalu pasti; cara yang tepat adalah uji dengan kit formalin seperti yang dipakai petugas BPOM.

Uji Tollens dan Fehling: aldehida "tertangkap basah"

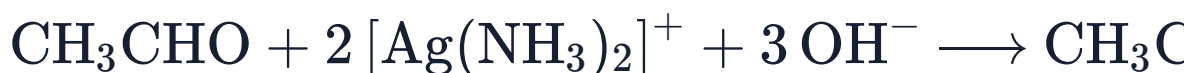
Aldehida masih punya atom H pada karbon karbonil, sehingga mudah dioksidasi menjadi asam karboksilat. Artinya aldehida adalah **reduktor**: ia memberikan elektron kepada ion logam. Keton tidak punya H itu dan

umumnya tidak bereaksi. Dua pereaksi klasik memanfaatkan perbedaan ini.



DEFINISI · PEREAKSI TOLLENS & FEHLING

Pereaksi Tollens adalah larutan ion kompleks diaminperak(I), $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$, dalam suasana basa. Aldehida mereduksi ion perak menjadi logam **Ag** yang melapisi dinding tabung sebagai **cermin perak**:



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 :

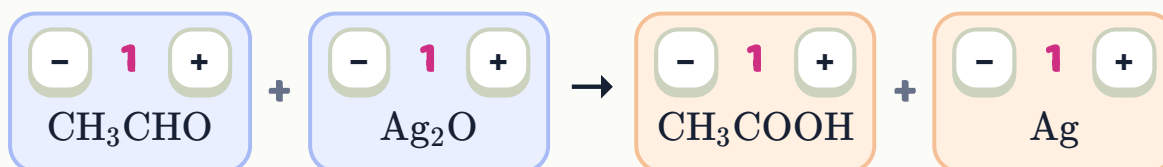


Pereaksi Benedict (ion tembaga dengan sitrat) bekerja serupa dan dipakai untuk menguji gula pereduksi seperti glukosa.

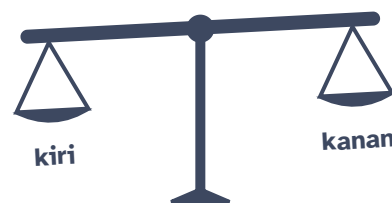


PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi uji gugus fungsi



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

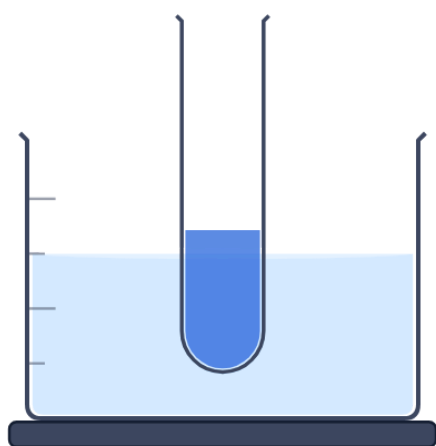
Mulai dari versi sederhana uji Tollens yang sering ditulis di buku sekolah (Ag_2O mewakili pereaksi Tollens), lalu versi ionnya, uji Fehling (Cu_2O merah bata), dan uji dikromat (jingga $\rightarrow$ hijau). Untuk persamaan ion, setarakan atom *dan* muatan. Petunjuk: hitung dulu berapa elektron yang 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



penangas air $\pm 60^\circ\text{C}$

Pereaksi: Cu^{2+} (biru) + tartrat dalam basa

Buku catatan Laras

	Tollens	Fehling	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	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?

Tiga botol tanpa label berisi zat A, B, dan C, ketiganya berumus C_3H_8O . A mendidih pada $7^\circ C$ 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 $\rightarrow$ tidak punya $-OH \rightarrow$ **metoksietana**, $CH_3OCH_2CH_3$.
- 3 B: hasil oksidasinya positif Fehling, berarti aldehida (propanal). Aldehida berasal dari alkohol **primer** $\rightarrow$ **1-propanol**.
- 4 C: hasil oksidasinya bukan aldehida, berarti keton (propanon). Keton berasal dari alkohol **sekunder** $\rightarrow$ **2-propanol**.

A = metoksietana, B = 1-propanol ($\rightarrow$ propanal), C = 2-propanol ($\rightarrow$ 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):



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:



Ini lah 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: $\text{CH}_3\text{CO}-\text{OCH}_2\text{CH}_3$. Bagian yang mengandung $\text{C}=\text{O}$ 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! $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ dan $\text{C}_2\text{H}_5\text{OOCCH}_3$ adalah zat yang sama.

Alkohol	Asam	Ester (nama IUPAC)	Rumus	Aroma
3-metil-1-butanol (isoamil)	etanoat	3-metilbutil etanoat (isoamil asetat)	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	🍌 pisang ambon
etanol	butanoat	etil butanoat (etil butirat)	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	🍍 nanas
metanol	butanoat	metil butanoat	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$	🍏 apel
1-propanol	etanoat	propil etanoat	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$	🍏 pir
1-oktanol	etanoat	oktil etanoat	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	🍊 jeruk

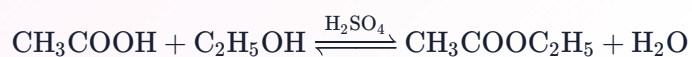
benzil alkohol	etanoat	benzil etanoat (benzil asetat)	$C_9H_{10}O_2$	 melati
metanol	2-hidroksibenzoat (salisilat)	metil salisilat	$C_8H_8O_3$	 minyak gosok (gandapura)

Esterifikasi: alkohol dan asam bergandengan



HUKUM • REAKSI ESTERIFIKASI

Asam karboksilat + alkohol $\rightleftharpoons$ ester + air, dengan katalis asam sulfat pekat dan pemanasan:



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.

katalis H_2SO_4 pekat, dipanaskan



O^* = oksigen-18, penanda isotop

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.

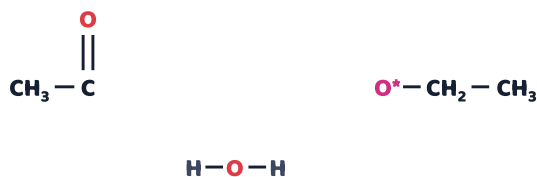
katalis H_2SO_4 pekat, dipanaskan



O^* = oksigen-18, penanda isotop

Langkah 2. Yang akan lepas: gugus $-\text{OH}$ dari asam dan atom H dari gugus $-\text{OH}$ alkohol, bukan sebaliknya!

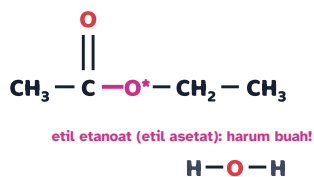
katalis H_2SO_4 pekat, dipanaskan



O^* = oksigen-18, penanda isotop air, H_2O

Langkah 3. $-\text{OH}$ dan H bergabung menjadi air, H_2O . Buktinya: atom O^* tidak pernah ditemukan di dalam air.

katalis H_2SO_4 pekat, dipanaskan

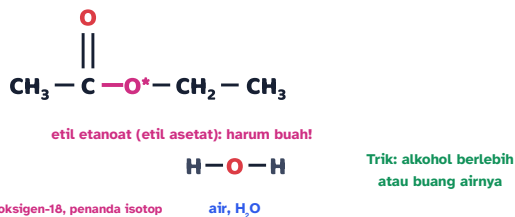


O^* = oksigen-18, penanda isotop air, H_2O

Langkah 4. Atom O^* dari etanol tersambung ke atom C karbonil. Terbentuk ester **etil etanoat** yang beraroma buah, dan O^* ikut di dalamnya.

katalis H_2SO_4 pekat, dipanaskan

asam + alkohol $\rightleftharpoons$ ester + air ($K \approx 4$)



Langkah 5. Reaksinya bolak-balik dengan $K \approx 4$. Dari 1 mol asam dan 1 mol alkohol hanya $\pm 2/3$ mol ester yang terbentuk. Supaya rendemen naik: pakai alkohol berlebih atau singkirkan airnya (asas Le Chatelier, Bab 22).

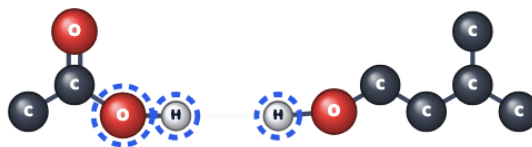


asam karboksilat + alkohol $\rightleftharpoons$ ester + air

Katalis H_2SO_4 pekat menyala • dipanaskan



Aroma:
panaskan dulu, lalu
cium!



asam etanoat + 3-metil-1-butanol $\rightleftharpoons$ 3-metilbutil etanoat + air

rendemen

0% (setimbang 67%)

Ester

3-metilbutil etanoat

Rumus

$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$

Mr

130

Aroma

? (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.

Esens pisang dibuat dari 3-metil-1-butanol, $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, 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: $\text{CH}_3\text{CO}-$ dari asam + $-\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$ dari alkohol (alkohol kehilangan H, asam kehilangan $-\text{OH}$).
- 2 Rumus struktur: $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$.
- 3 Nama: alkil dari alkohol = 3-metilbutil; dari asam = etanoat → **3-metilbutil etanoat** (isoamil asetat).
- 4 Rumus molekul: $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2 + \text{C}_5\text{H}_{12}\text{O} - \text{H}_2\text{O} = \text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$; $\text{Mr} = 7(12) + 14(1) + 2(16) = 130$.

3-metilbutil etanoat, $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$, 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):

$$\% \text{ rendemen} = \frac{\frac{m_{\text{nyata}}}{\frac{m_{\text{asam}}}{M_{r,\text{asam}}}} \times M_{r,\text{ester}}}{1} \times 100\%$$

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

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 = $0,25 \text{ mol} \times 88 \text{ g/mol} = 22 \text{ g}$.
- 3 Rendemen = $\frac{14,3}{22} \times 100\% = 65\%$.

Rendemen 65%, wajar untuk reaksi setimbang. Sebagian ester juga hilang saat dicuci dan dipisahkan.



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) 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 H_2O lepas; (5) H^+ dilepas kembali, jadi katalis tidak habis.

Pada akhir 1930-an, Irving Roberts dan Harold Urey memakai alkohol yang atom O-nya isotop ^{18}O . Ternyata ^{18}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

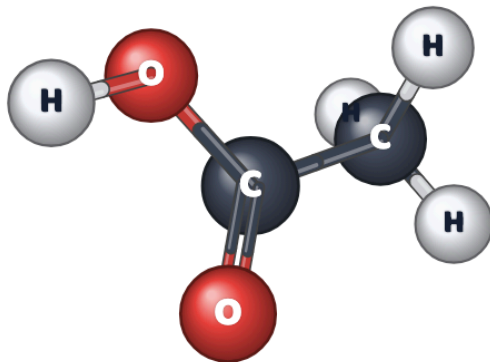
66,7
%

1 : 1 dan $K = 4 \rightarrow$ tepat $2/3 \approx 66,7\%$

Ester saat setimbang: $x = 0,667$ mol dari 1 mol asam dan 1 mol alkohol.

Cek satuan: $\text{mol} \div \text{mol} \times 100\% = \% \checkmark$

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



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam asetat $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ Mr $\approx 60,05$ PubChem ↗

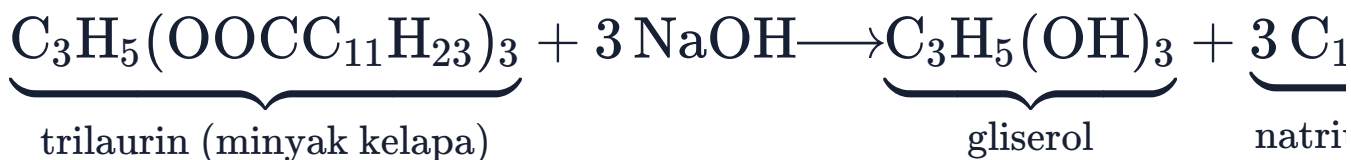
Asam pada cuka dapur (sekitar 4–25%).

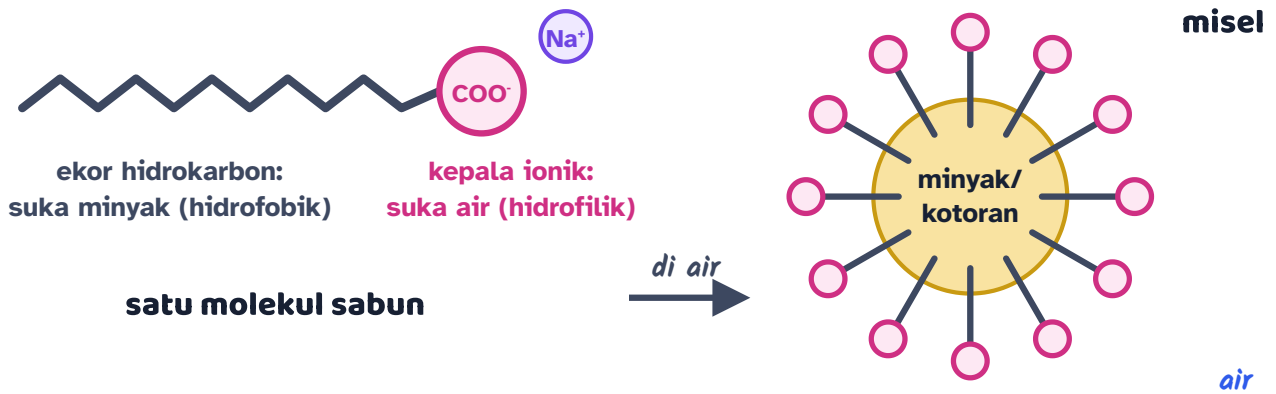
Temukan gugus $-\text{COO}-$ pada setiap ester. Bandingkan isoamil asetat (pisang) dengan etil butirrat (nanas): keduanya ester, tetapi "ekor"-nya berbeda. Lalu lihat gliserol dan asam palmitat: tiga asam lemak yang bergabung dengan satu gliserol membentuk lemak, ester raksasa yang hampir tidak berbau.

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 $-\text{OH}$) dan tiga asam lemak. Minyak kelapa kaya akan trilaurin:



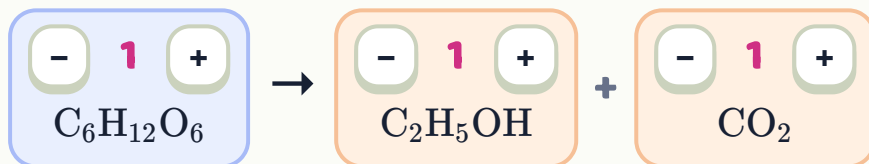


Sabun bekerja karena molekulnya "berwajah dua". Ekor hidrokarbon menyelam ke dalam minyak, kepala ionik tetap di air. Tetes minyak terbungkus menjadi **misel** yang bisa dibilas air.

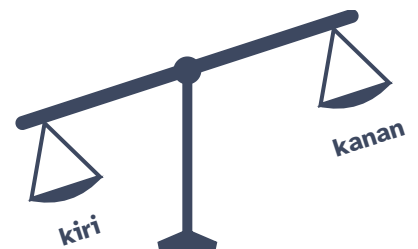


PENYETARA REAKSI

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 tape, 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."

MITOS

"Aroma pisang di permen pasti dari buah pisang asli."

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.

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, $R-X$, dengan $X = F$, **Cl**, **Br**, atau I. Namanya: **haloalkana** dengan nomor letak halogen, misalnya $CH_3CHBrCH_2CH_3 = 2\text{-bromobutana}$ dan $CHCl_3 = \text{triklorometana}$ (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**, C_2H_5Cl : mendidih pada $12^\circ C$. Disemprotkan ke kulit, ia menguap cepat dan mendinginkan: dipakai sebagai semprotan pereda nyeri cedera olahraga.
- **CFC** (kloro-fluoro-karbon), misalnya 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).

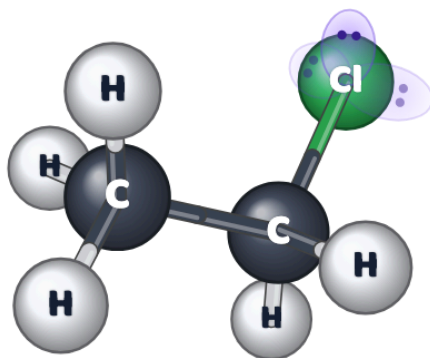
Amina adalah turunan amonia, NH_3 , yang atom H-nya diganti gugus alkil: amina primer $R-NH_2$, sekunder R_2NH , tersier R_3N . Nama IUPAC: alkan**amina** ($CH_3NH_2 = \text{metanamina}$); nama umum: alkil**amina** (metilamina).

Amina kecil berbau amis: bau ikan berasal dari trimetilamina, $(\text{CH}_3)_3\text{N}$. Atom **N** punya pasangan elektron bebas yang dapat menerima H^+ , jadi amina bersifat **basa lemah**:



Amida punya gugus $-\text{CONH}_2$: gugus karbonil yang tersambung ke atom N. Namanya alkan**amida**, misalnya CH_3CONH_2 = etanamida (asetamida). Contoh terkenal: **urea**, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, pupuk nitrogen utama petani Indonesia; **parasetamol**, obat penurun demam; dan **ikatan peptida** $-\text{CO}-\text{NH}-$ 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 $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ **Mr $\approx 64,51$** [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 ($\text{O}=\text{C}-\text{N}$). Ukur sudut di sekitar atom N amida. Lebih dekat ke $109,5^\circ$ (piramida) atau ke 120° (datar)?

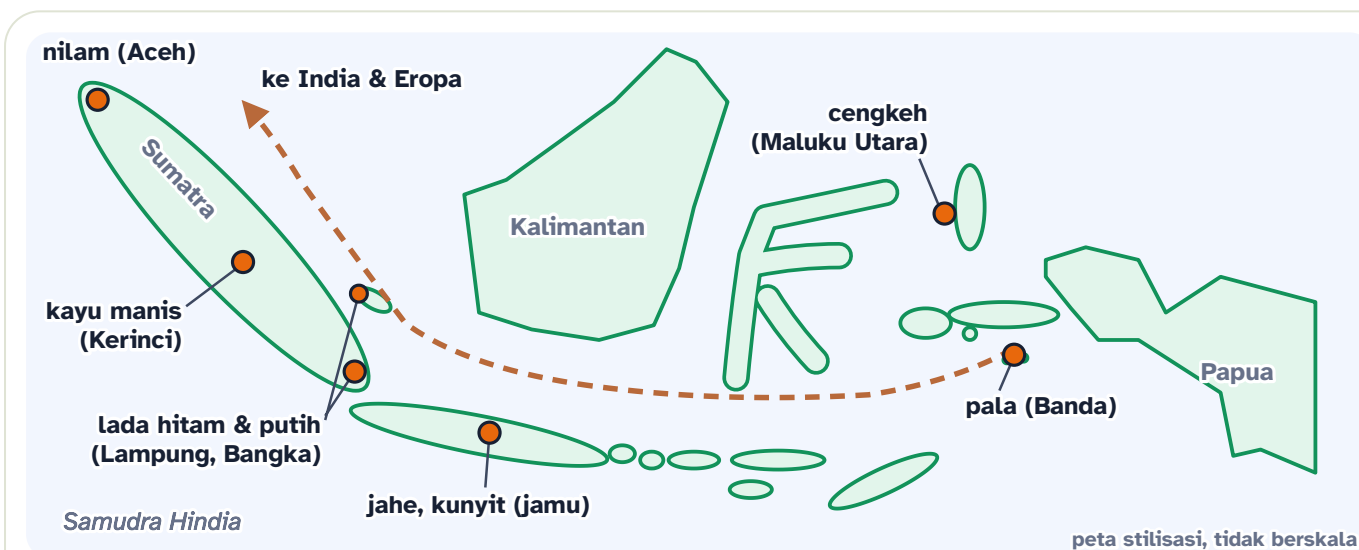
**MENGAPA AMINA BASA, TETAPI AMIDA TIDAK?**

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 $O=C-N \leftrightarrow ^-O-C=N^+$). 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.



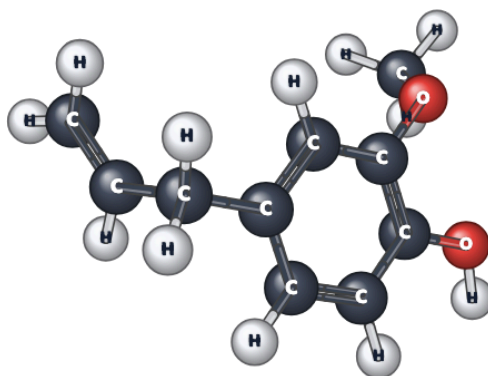
Jalur rempah: cengkeh dan pala dari Maluku dibawa melalui Laut Jawa dan Selat Malaka ke India, Timur Tengah, dan Eropa. Setiap rempah membawa molekul aroma khasnya.

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 $\approx$ 164,2 PubChem ↗

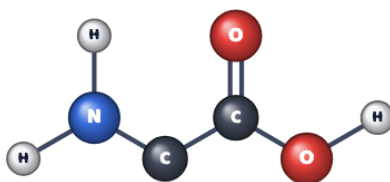
Aroma cengkeh (rempah Maluku); antiseptik di kedokteran gigi dan bahan kretek.

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: asam karboksilat (-COOH)****Cari gugus asam karboksilat (-COOH). Ketuk salah satu atomnya pada gambar.**

Cari gugus

asam karboksilat (-COOH)

Skor

0 benar / 0 ketukan

Ditemukan

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 $\pm 70\text{--}90\%$ 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, $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$ (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 $-\text{OH}$. 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 $\pm 60\text{--}80\%$. Gugus $-\text{OH}$ -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.

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$Mr = 12n + 2n + 32 = 14n + 32$. Contoh: etil etanoat, $n = 4 \rightarrow 88$.

RINGKASAN KILAT Bab 33 dalam 3 menit

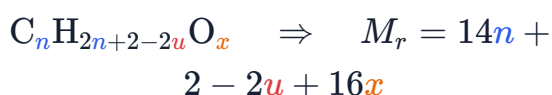
✓ Kamu sekarang bisa...

- 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



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.

$$\% \text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{\frac{m_{\text{asam}}}{M_{r,\text{asam}}} \times M_{r,\text{ester}}} \times 100\%$$

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.

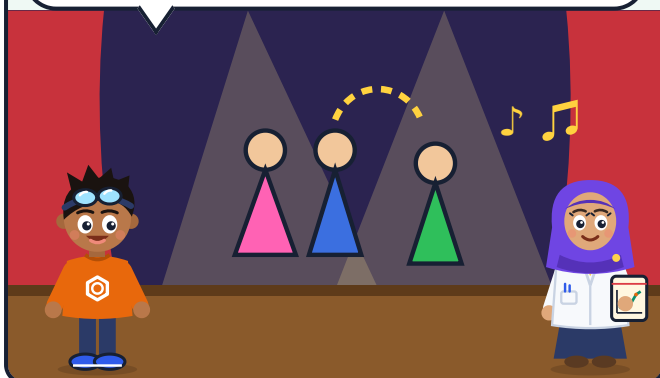
PESTA DANCE MOLEKUL

KOMIK · 4 PANEL

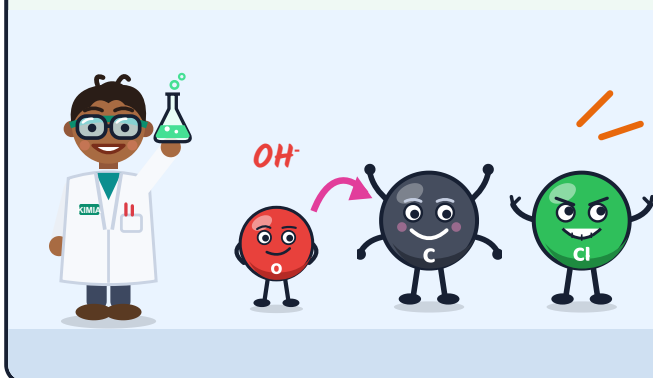
Pentas seni sekolah, malam Minggu

BIMA

Lihat, Laras! Penari baju hijau masuk, penari baju biru keluar. Mereka bertukar pasangan di tengah lagu!

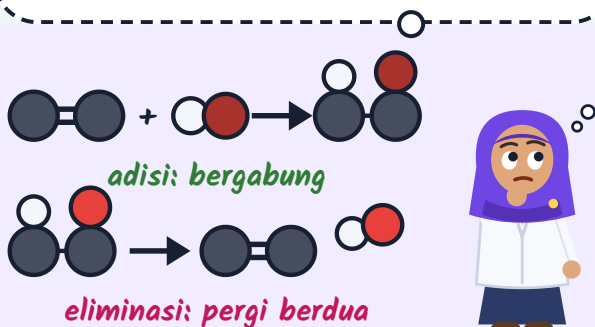
**KAK TIRTA**

Itu reaksi **substitusi**! Seperti karbon yang melepas klorin karena didatangi OH^- dari arah belakang.



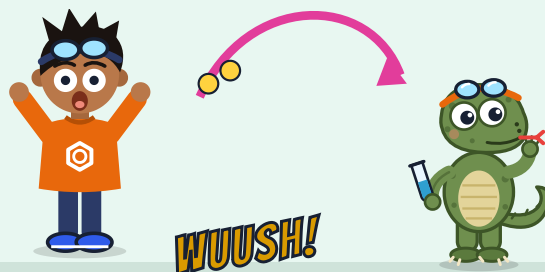
LARAS

Kalau penari baru bergabung tanpa ada yang pergi, itu **adisi**. Kalau dua penari keluar bersama... **eliminasi**?



KIMO

Dan setiap gerakan dansa dipimpin oleh **elektron**. Kimiawan mencatat koreografinya dengan **panah lengkung**!



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	$\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 \xrightarrow{\text{UV}} \text{CH}_3\text{Cl} + \text{HCl}$	pembuatan haloalkana, pelarut
Adisi	ikatan rangkap "dibuka", dua molekul menyatu	$\text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{H}_3\text{PO}_4} \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	etanol industri, margarin
Eliminasi	molekul kecil lepas, ikatan rangkap terbentuk	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} \xrightarrow{\text{H}_2\text{SO}_4} \text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O} (170^\circ\text{C})$	etena dari bioetanol
Oksidasi-reduksi	bertambah O atau berkurang H (oksidasi); sebaliknya reduksi	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} \longrightarrow \text{CH}_3\text{CHO} \longrightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$	tapai yang makin asam, uji napas
Kondensasi (kebalikannya: hidrolisis)	dua molekul bergabung sambil melepas molekul kecil (biasanya air)	$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}$	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

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

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)

% 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: $(\text{g/mol}) \div (\text{g/mol}) \times 100\%$

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

CONTOH Dua jalan menuju etanol

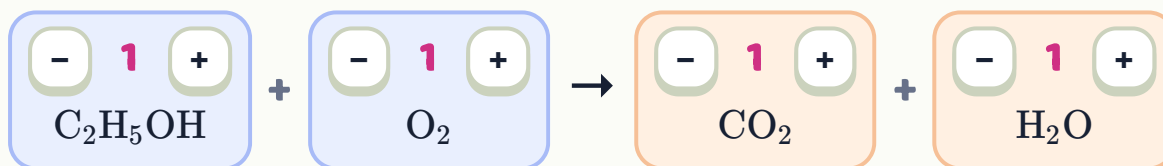
Etanol untuk industri bisa dibuat dari (a) hidrasi etena: $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, atau (b) substitusi bromoetana: $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br} + \text{NaOH} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{NaBr}$. Hitung ekonomi atom keduanya. (Ar H = 1, C = 12, O = 16, Na = 23, Br = 80)

1 Mr etanol = $2(12) + 6(1) + 16 = 46$.

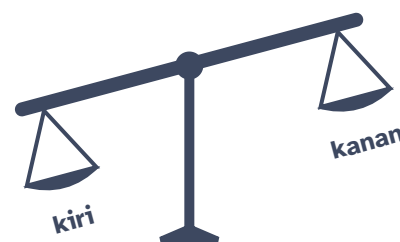
2 (a) Pereaksi: etena 28 + air 18 = 46. EA = $46/46 \times 100\% = 100\%$.

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).

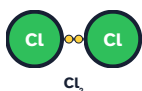
Bahasa sederhana • Ikatan kovalen itu seperti dua anak yang memegang satu tali berdua. Saat talinya putus, bisa terjadi dua hal: talinya putus di tengah sehingga masing-masing sebagian separuh, atau salah satu anak merebut seluruh tali. Kimiawan menyebutnya pemutusan homolitik dan heterolitik.



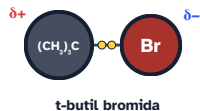
DEFINISI • DUA CARA MEMUTUS IKATAN

- **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: $\text{Cl}^\bullet$). Biasanya dipicu sinar UV atau panas.
- **Pemutusan heterolitik**: kedua elektron ikatan **diambil satu atom** (biasanya yang lebih elektronegatif). Hasilnya sepasang ion, misalnya karbokation R_3C^+ dan anion Br^- . Biasanya terjadi di pelarut polar.

HOMOLITIK • elektron dibagi rata

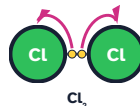


HETEROLITIK • diambil satu pihak

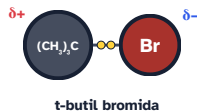


Langkah 1. Setiap ikatan kovalen adalah sepasang elektron (titik kuning) yang dipakai bersama. Ada dua cara memutusnya. (Pasangan elektron bebas lain sengaja tidak digambar.)

HOMOLITIK • elektron dibagi rata



HETEROLITIK • diambil satu pihak

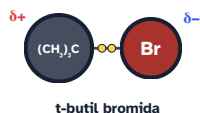


Langkah 2. Homolitik: panah berkait tunggal (seperti kail pancing) berarti gerak **satu** elektron. Dua kail: satu elektron ke tiap atom Cl.

HOMOLITIK • elektron dibagi rata

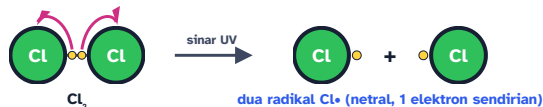


HETEROLITIK • diambil satu pihak

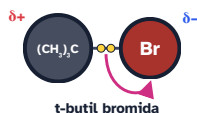


Langkah 3. Hasilnya dua **radikal** $\text{Cl}^\bullet$: atom netral dengan satu elektron tak berpasangan, sangat reaktif. Pemicunya sinar UV, karena ikatan Cl-Cl lemah ($\pm 242 \text{ kJ/mol}$).

HOMOLITIK • elektron dibagi rata



HETEROLITIK • diambil satu pihak



Langkah 4. Heterolitik: panah berkepala penuh berarti gerak **sepasang** elektron. Kedua elektron ikatan ditarik oleh Br yang lebih elektronegatif.

HOMOLITIK • elektron dibagi rata



HETEROLITIK • diambil satu pihak



Langkah 5. Hasilnya sepasang ion: **karbokation** $(\text{CH}_3)_3\text{C}^+$ 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^- , H_2O , NH_3 , dan ikatan π alkena.
- **Elektrofil** ("pencinta elektron", miskin elektron) adalah spesi yang **menerima pasangan elektron**. Contoh: H^+ , karbokation, NO_2^+ , atom C bermuatan δ^+ pada C-Br, dan ujung δ^+ molekul 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 ($\curvearrowright$) = sepasang elektron; kepala separuh atau "kail" ($\rightarrow$) = 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 $+$, $\delta+$, 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, campuran metana dan klorin lalu sinari dengan cahaya ultraviolet, dan reaksi berlangsung cepat sekali. Kuncinya adalah **radikal bebas**.

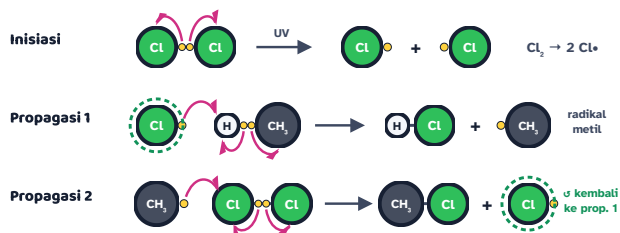
Mekanisme ini disebut **substitusi radikal bebas**. Seperti lingkaran gosip di kampung, cukup satu "pemicu" untuk membuat kabar menjalar dari rumah ke rumah. Ikuti tiga tahapnya: **inisiasi**, **propagasi**, dan **terminasi**.



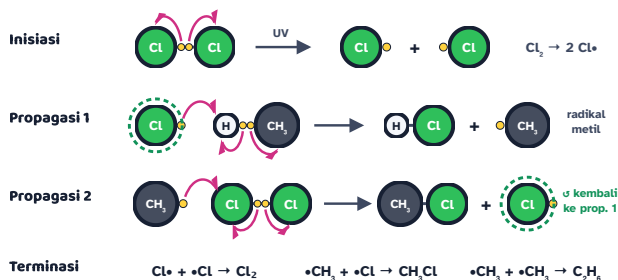
Langkah 1. Inisiasi. Sinar UV memutus ikatan Cl-Cl secara homolitik: $\text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{Cl}^\bullet$. Mengapa Cl-Cl dan bukan C-H? Ikatan Cl-Cl ($\pm 242 \text{ kJ/mol}$) jauh lebih lemah daripada C-H ($\pm 413 \text{ kJ/mol}$).



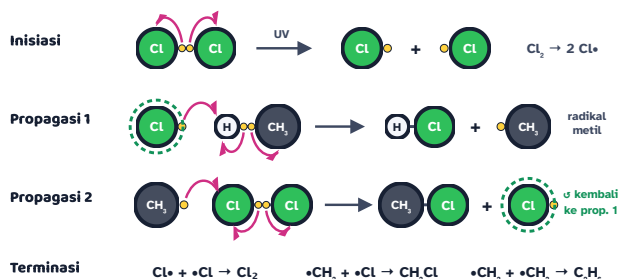
Langkah 2. Propagasi 1. Radikal $\text{Cl}^\bullet$ merebut satu atom H dari metana: $\text{CH}_4 + \text{Cl}^\bullet \rightarrow \text{HCl} + \text{CH}_3^\bullet$. Tiga panah kail: satu elektron dari $\text{Cl}^\bullet$, dan dua elektron ikatan C-H berpisah.



Langkah 3. Propagasi 2. Radikal metil merebut satu atom Cl dari Cl_2 : $\text{CH}_3^\bullet + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}^\bullet$. Radikal $\text{Cl}^\bullet$ 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.



Total: $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{HCl}$ - satu $\text{Cl}^\bullet$ bisa memutar ribuan siklus

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 $\text{Cl}^\bullet$ 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 $\text{Cl}^\bullet$ yang dilepas CFC (bekas pendingin kulkas dan AC lama) merusak ozon dengan pola yang sama: satu radikal $\text{Cl}^\bullet$ 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°

% produk 2° 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](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-selektivitas-radikal)

MITOS

"Alkana tidak bisa bereaksi sama sekali."

MITOS

"Radikal bebas = ion, karena sama-sama reaktif."

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.

FAKTA

Radikal bebas

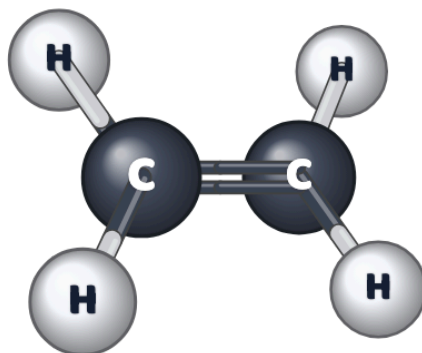
netral

; 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 elektrofili, 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 $\approx 28,05$

[PubChem ↗](#)

Segitiga datar di tiap karbon (120°). Hormon pematang buah dan bahan baku plastik polietilena.

Etena datar dengan sudut $\pm 120^\circ$ 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 ($\pm 1,34 \text{ \AA}$) dan C-C ($\pm 1,54 \text{ \AA}$).

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 $\text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{Br}_2 \longrightarrow \text{CH}_2\text{BrCH}_2\text{Br}$ (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

ruang gelap



Minyak goreng sawit

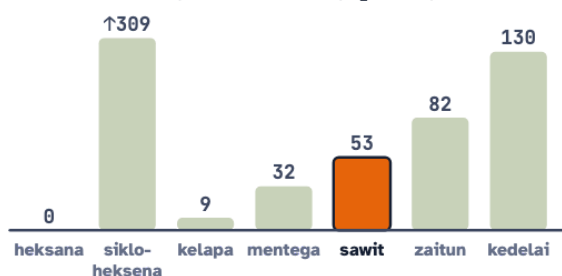
setiap tetes: $\text{C}=\text{C} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{CBr}-\text{CBr}$

Nasib setiap tetes



○ warna hilang ● jingga bertahan

Bilangan iodin khas ($\text{g I}_2 / 100 \text{ g}$)



Tetes ditambahkan

0

Tetes yang warnanya hilang

0

Bilangan iodin khas

$\pm 53 \text{ g I}_2 / 100 \text{ g}$

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, $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$. Atom Br akan menempel di karbon mana?

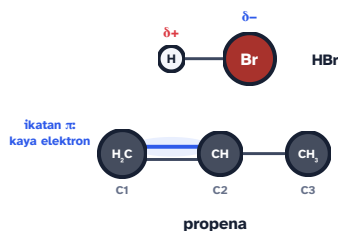
Di karbon ujung (C1), karena ujung molekul paling mudah dijangkau.

Di karbon tengah (C2), menghasilkan 2-bromopropana sebagai produk utama.

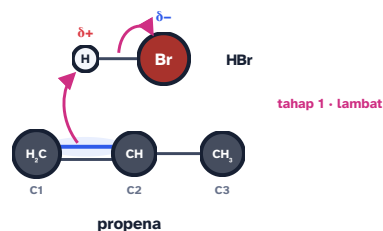
Sama banyak di C1 dan C2, karena kedua karbon sama-sama berikatan rangkap.

Br menempel di C3, karena gugus metil paling kaya elektron.

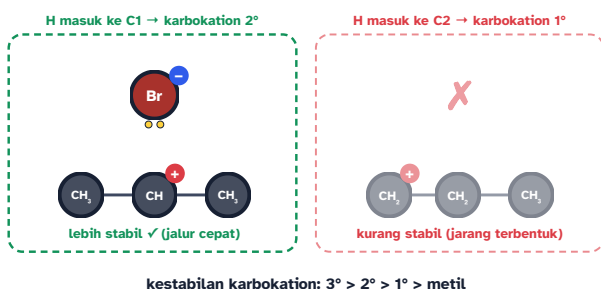
Jawabannya: di C2. H masuk lebih dulu sebagai elektrofil. Bila H masuk ke C1, muatan positif tertinggal di C2 (karbokation sekunder) yang lebih stabil daripada karbokation primer. Jalur yang lebih stabil jauh lebih cepat, sehingga Br^- menempel di C2. Lihat animasinya di bawah.



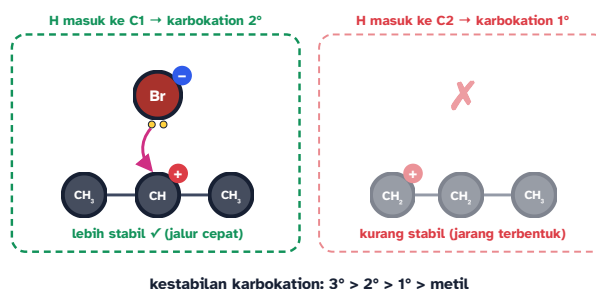
Langkah 1. Propena punya ikatan π (biru) yang kaya elektron, jadi berperan sebagai nukleofil. Molekul HBr polar: atom H bermuatan $\delta+$ adalah elektrofil.



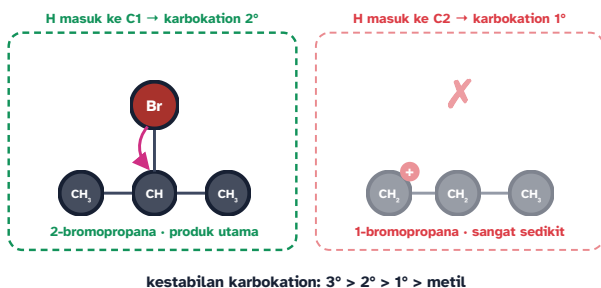
Langkah 2. Tahap 1 (lambat): pasangan elektron π menyerang H (panah 1). Bersamaan, pasangan elektron ikatan H-Br pindah seluruhnya ke Br (panah 2). Terbentuk karbokation dan Br^- .



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: $\text{CH}_2=\text{CHCH}_3 + \text{HBr} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHBrCH}_3$. H masuk ke karbon yang sudah punya lebih banyak H. Inilah **aturan Markovnikov**.



ATURAN MARKOVNIKOV (DAN ALASANNYA)

Pada adisi HX atau 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**.

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, $(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2$, dan jelaskan alasannya.

- 1 Dua kemungkinan: H masuk ke CH_2 (ujung) atau ke C yang mengikat dua CH_3 .
- 2 H ke $\text{CH}_2 \rightarrow$ muatan + di C yang mengikat tiga gugus alkil: karbokation **tersier** $(\text{CH}_3)_3\text{C}^+$.
- 3 H ke C tengah $\rightarrow$ karbokation primer $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2^+$, jauh kurang stabil.
- 4 Jalur tersier jauh lebih cepat; Br^- menyerang karbokation tersier.

Produk utama: 2-bromo-2-metilpropana, $(\text{CH}_3)_3\text{CBr}$ (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 ($\pm 150^\circ\text{C}$), alkena menjadi alkana: **hidrogenasi**. Dengan **uap air** dan katalis asam fosfat ($\pm 300^\circ\text{C}$, 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 $\text{C}=\text{C}$. 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

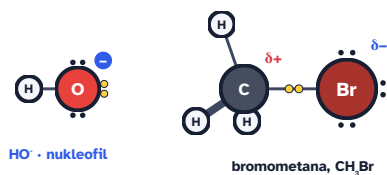
Substitusi nukleofilik: SN_2 dan SN_1 (serta saingannya, eliminasi)

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.

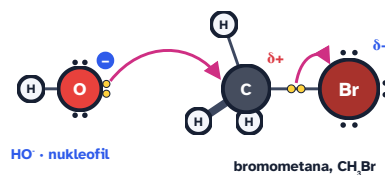
Bahasa sederhana • Gaya pertama: penari baru datang dari belakang dan **langsung** menggantikan penari lama dalam satu gerakan (SN_2). Gaya kedua: penari lama **pergi dulu**, pasangannya berdiri sendirian sebentar, baru penari baru datang (SN_1).

SN_2 : satu gerakan, serangan dari belakang

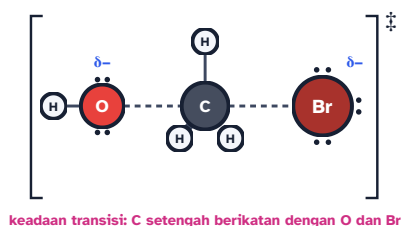
Pada **SN_2** , nukleofil menyerang karbon dari arah **berlawanan** dengan halogen. Ikatan baru terbentuk bersamaan dengan putusnya ikatan lama, dalam **satu tahap**. Tiga atom lain pada karbon terbalik seperti payung yang tertiu angin.



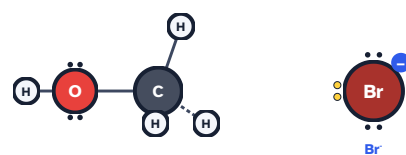
Langkah 1. Nukleofil OH⁻ mendekati bromometana dari **belakang**, berlawanan dengan Br. Sisi depan dihalangi awan elektron atom Br yang besar dan bermuatan δ⁻. (Ikatan tebal = mengarah ke kita; garis putus = menjauhi kita.)



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.



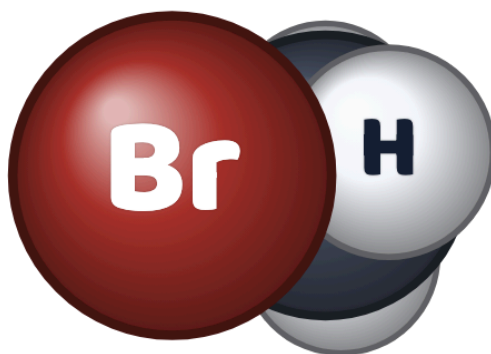
payung terbalik: inversi Walden
laju = k [CH₃Br][OH⁻] · orde 2

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[CH₃Br][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 S_N2 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 $\approx 94,94$

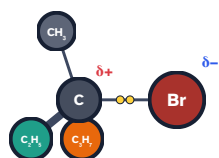
[PubChem ↗](#)

Haloalkana primer; contoh klasik reaksi $\text{S}_\text{N}2$ (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?

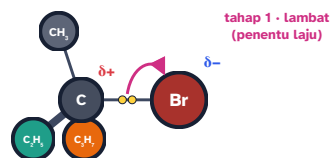
$\text{S}_\text{N}1$: tunggu karbokation terbentuk dulu

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 **$\text{S}_\text{N}1$** .



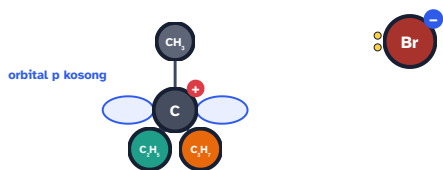
3-bromo-3-metilheksana (haloalkana tersier)

Langkah 1. Substrat tersier, 3-bromo-3-metilheksana, dalam air (pelarut polar protik). Karbon pusatnya mengikat empat gugus berbeda, jadi molekul ini **kiral**.



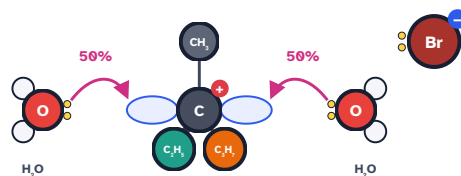
3-bromo-3-metilheksana (haloalkana tersier)

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.



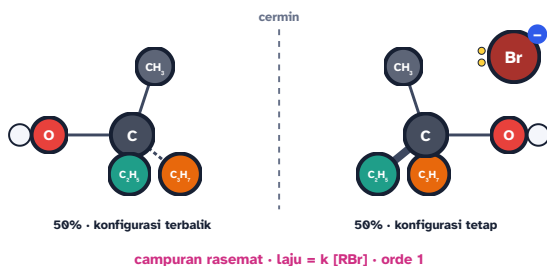
karbokation tersier: datar (120°), orbital p kosong

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 $\text{R}-\text{OH}_2^+$ yang terbentuk lalu melepas H^+ ke molekul air lain.)

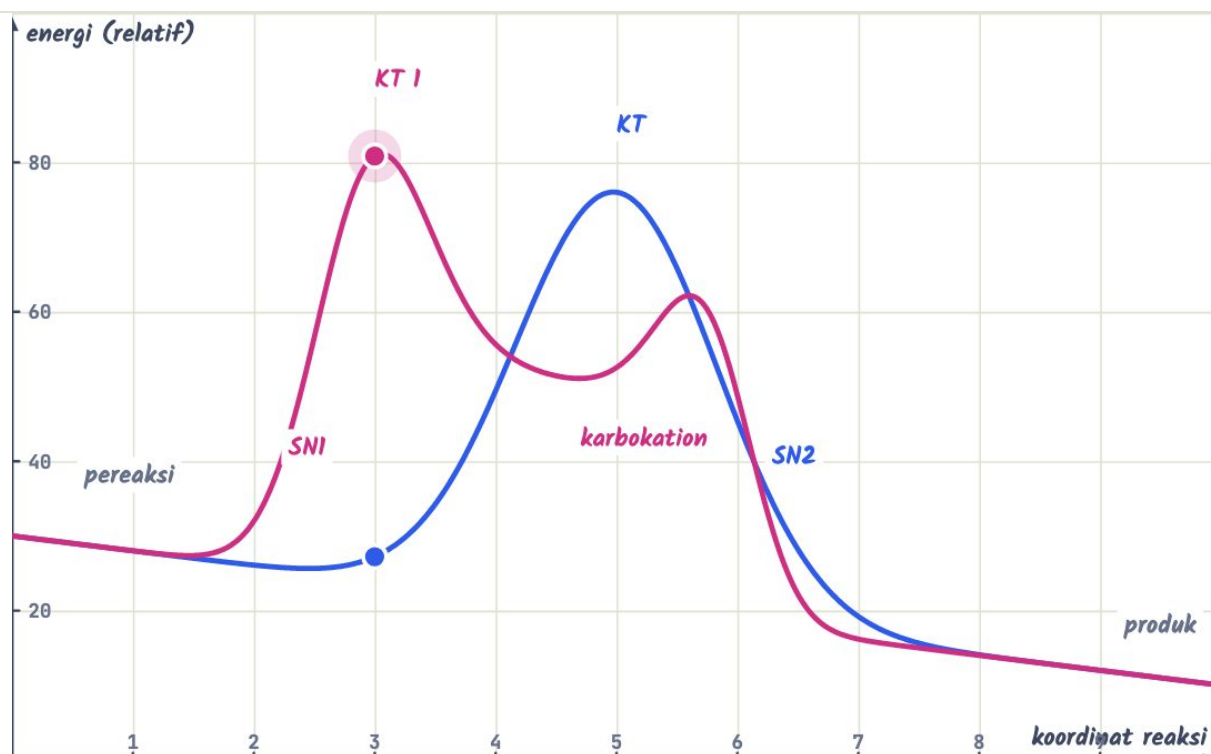


campuran rasemat - laju = $k [\text{RBr}]$ - orde 1

Langkah 5. Hasilnya dua alkohol yang saling bayangan cermin (enantiomer), 50 : 50 : **campuran rasemat**. Nukleofil tidak ikut tahap lambat, jadi laju = $k[\text{RBr}]$: orde 1. Itulah angka "1" pada $\text{S}_{\text{N}}1$.

$$E = f(\text{koordinat reaksi})$$

posisi 3 : $E_{\text{SN1}} \approx 80,85$, $E_{\text{SN2}} \approx 27,22$



SN1: puncak tertinggi = keadaan transisi tahap lambat (C-Br putus)

energi jalur SN1
81

energi jalur SN2
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

$$r = k [\text{RX}] [\text{Nu}]^n$$

Laju sebanding dengan konsentrasi haloalkana. Nukleofil hanya ikut menentukan laju bila ia terlibat di tahap paling lambat: $n = 1$ untuk SN_2 , $n = 0$ untuk SN_1 .

k Tetapan laju

$[\text{RX}]$ Konsentrasi haloalkana mol/L

$[\text{Nu}]$ Konsentrasi nukleofil mol/L

n Orde terhadap nukleofil ($0 = \text{SN}_1$, $1 = \text{SN}_2$)

r Laju reaksi $\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$

LAJU REAKSI

2×10^{-4}

$\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$

SN2: RX dan Nu bertumbukan dalam satu tahap

Dengan $n = 1$: menggandakan $[\text{Nu}]$ membuat laju $\times 2$, menggandakan $[\text{RX}]$ membuat laju $\times 2$.

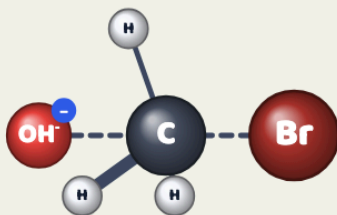
Cek satuan: $\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$ (satuan k menyesuaikan orde reaksi)

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

LAB MINI Arena SN1 vs SN2

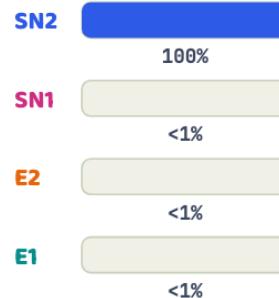
LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-34

bromometana



keadaan transisi ‡

Peluang jalur



reaksi berlangsung...

OH⁻ + bromometana dalam aseton

Jalur pemenang

? (tekan ▶ Jalankan)

Pembagian produk

—

Laju

—

Produk utama

—

Ciri

—

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 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 = $k[\text{RX}][\text{B}^-]$) dan **E1** (dua tahap lewat karbokation, laju = $k[\text{RX}]$).



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).

2-Bromobutana, $\text{CH}_3\text{CHBrCH}_2\text{CH}_3$, 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 $\rightarrow$ ikatan rangkap C1=C2: but-1-ena, $\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{CH}_3$ (ikatan rangkap mengikat 1 gugus alkil).
- 3 H dari C3 direbut $\rightarrow$ ikatan rangkap C2=C3: but-2-ena, $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCH}_3$ (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 ($\pm 20\%$).



LANJUT • IB & OLIMPIADE

PELARUT YANG "MEMELUK" NUKLEOFIL

Mengapa $\text{S}_{\text{N}}2$ 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, $\text{S}_{\text{N}}1$ butuh pelarut protik untuk menstabilkan karbokation dan anion yang lahir di tahap lambat.

Stereokimia $\text{S}_{\text{N}}2$ 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 $\text{E}2$, 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, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}^+$.

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 $\text{C}=\text{O}$. Jadi kuncinya: **berapa atom H yang menempel pada karbon pembawa OH?**

Alkohol primer

C pembawa OH punya 2 H



asam etanoat (asam karboksilat)



hijau

Alkohol sekunder

C pembawa OH punya 1 H



berhenti di keton



hijau

Alkohol tersier

C pembawa OH tanpa H



X

tidak bereaksi

tidak ada H untuk dilepas



jingga

Tangga oksidasi alkohol dengan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$ encer, dipanaskan. Warna jingga ion dikromat, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, berubah menjadi hijau ion Cr^{3+} hanya bila alkohol teroksidasi. [O] = oksigen dari oksidator.



ATURAN • OKSIDASI ALKOHOL

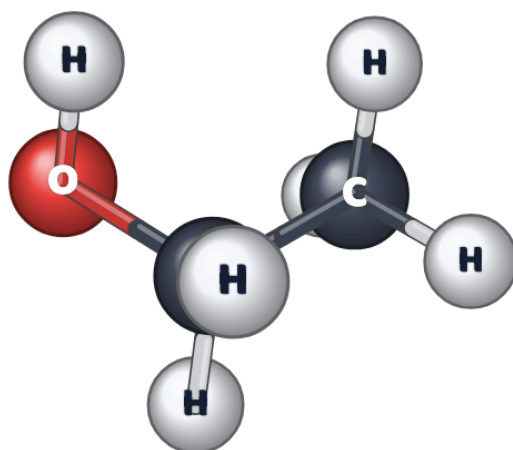
- **Alkohol primer** → **aldehida** → **asam karboksilat**. Untuk berhenti di aldehida, aldehida (titik didih rendah) segera **didistilasi** keluar. Untuk sampai ke asam, campuran dipanaskan dengan **refluks** dan oksidator berlebih.
- **Alkohol sekunder** → **keton**, lalu berhenti.
- **Alkohol tersier** tidak teroksidasi (warna jingga tetap), karena karbon pembawa OH tidak punya H.

Persamaan ion lengkap untuk etanol menjadi asam etanoat:



MOLEKUL 3D

Naik tangga oksidasi



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$

Mr $\approx 46,07$

[PubChem ↗](#)

Alkohol pada tapai dan hand sanitizer; juga campuran bensin (bioetanol).

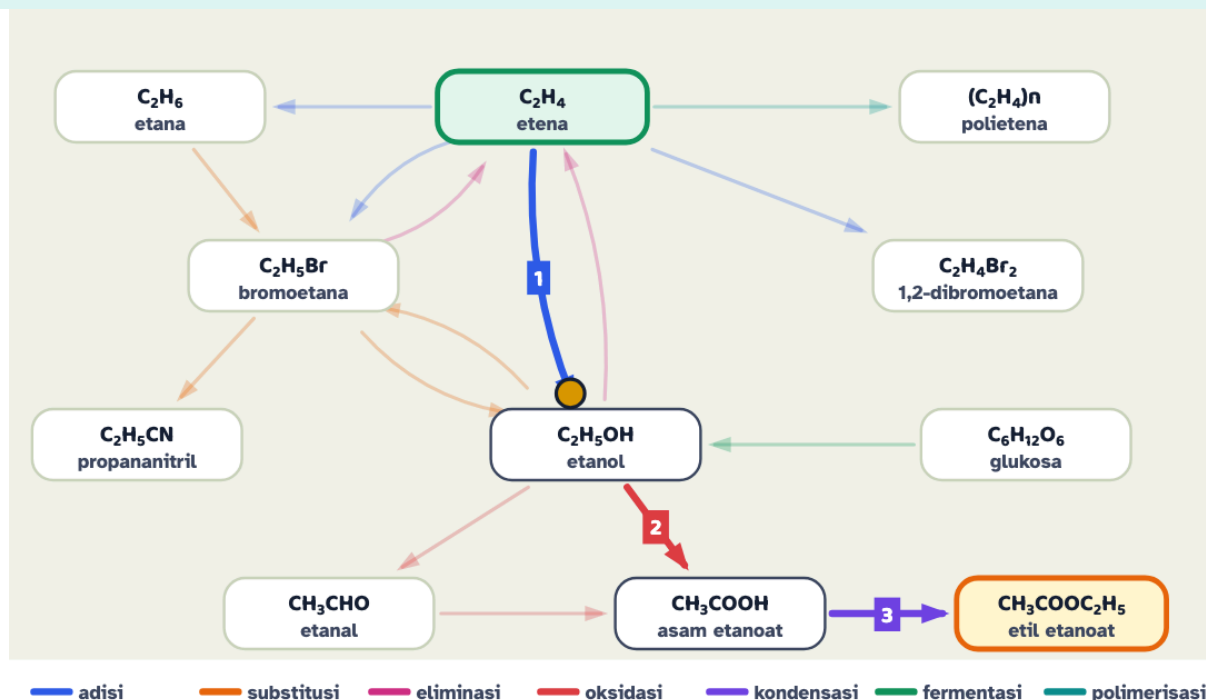
Urutkan etanol → asetaldehida (etanal) → asam asetat. Hitung atom H pada karbon yang mengikat O di setiap tahap: 2, lalu 1, lalu 0. Sudut di sekitar C=O sekitar 120° (datar), berbeda dengan C-OH pada alkohol yang tetrahedral ($\pm 109,5^\circ$). Bandingkan juga 2-propanol dengan aseton.

Dari propena, $\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$, 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, $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$.
- 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 + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_2\text{SO}_4$, 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 $\xrightarrow{\text{H}_2\text{O}, \text{H}_3\text{PO}_4}$ 2-propanol $\xrightarrow{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}^+}$ 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.



1. etena → etanol:

uap H_2O , H_3PO_4 , 300°C , 60 atm (adisi)

2. etanol → asam etanoat:

 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}^+$ berlebih, refluks (oksidasi)

3. asam etanoat → etil etanoat:

+ etanol, H_2SO_4 pekat, panas (kondensasi)

Jumlah tahap

3

Jenis reaksi di rute

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 etena. 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*.

**BENZENA: KAYA ELEKTRON, TETAPI MENOLAK ADISI**

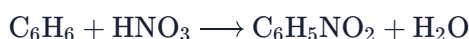
Benzena punya enam elektron π , tetapi **tidak** memudahkan air brom. Elektron π -nya tersebar merata di seluruh cincin (aromatik), memberi kestabilan ekstra sekitar 150 kJ/mol. Adisi akan merusak cincin itu, jadi benzena memilih **substitusi elektrofilik aromatik**: satu H diganti, cincin aromatik tetap utuh.

Contoh nitrasi (campuran HNO_3 pekat dan H_2SO_4 pekat, di bawah $\pm 55^\circ\text{C}$):

1. Pembentukan elektrofil (ion nitronium):



2. Elektron π cincin menyerang NO_2^+ , membentuk karbokation bercincin (ion arenium) yang muatannya tersebar di tiga karbon. Tahap ini lambat karena aromatisitas hilang sementara.
3. HSO_4^- merebut H^+ dari karbon yang mengikat NO_2 ; pasangan elektron C-H kembali ke cincin, aromatisitas pulih. Total:



Pola yang sama berlaku untuk brominasi (Br_2 + katalis 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 H_2 , katalis nikel) memadatkan minyak nabati. Makin sedikit ikatan $\text{C}=\text{C}$, makin tinggi titik lelehnya.

**Pembersih tangan**

Etanol dari fermentasi tetes tebu atau 2-propanol dari hidrasi propena (Markovnikov), dipakai pada kadar $\pm 60\text{--}80\%$ 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."

MITOS

"Oksidasi zat organik selalu berarti dibakar."

FAKTA

Justru sebaliknya. Oksidasi alkohol butuh atom H pada karbon pembawa OH. Alkohol tersier tidak punya H itu, sehingga dikromat tetap jingga.

FAKTA

Pembakaran hanyalah oksidasi paling "kasar" sampai CO_2 dan air. Oksidasi lembut (dikromat, enzim di hati) hanya mengubah satu gugus, misalnya etanol $\rightarrow$ etanal $\rightarrow$ asam asetat.

Cek Cepat

Reaksi $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Br} + \text{OH}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{Br}^-$ 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 ($\pm 50^\circ C$), alas koran, sarung tangan plastik.

1. Tuang 1 sendok teh setiap sampel ke gelas berbeda: minyak sawit, minyak kelapa, mentega (lelehkan dulu dengan merendam gelasnyanya 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 iodine 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 iodine? 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

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

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.

$$r = k [\text{RX}] [\text{Nu}]^n$$

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

Sore hari di teras rumah, Palembang

BIMA

Lihat, karet gelang ini bisa ditarik berkali-kali lipat panjangnya, lalu balik lagi! Kok bisa, ya?



TOENG!

LARAS

Di dasar botol ini ada segitiga bernomor 1 dan tulisan PET. Kode apa ini? Aku catat dulu.

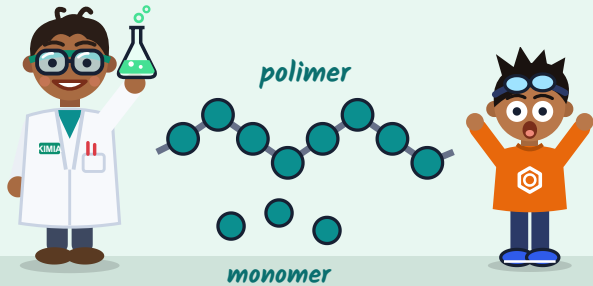


KAK TIRTA

Karet dan plastik sama-sama **polimer**: molekul raksasa dari ribuan molekul kecil yang bergandengan, seperti gerbong kereta yang tak habis-habis!

BIMA

Ribuan gerbong dalam satu molekul?!

**Kimo pulang dari kebun karet****KIMO**

Getah karet ini polimer alam! Indonesia penghasil karet alam terbesar kedua di dunia, setelah Thailand.

BIMA

Kalau karet dari pohon... plastik dari mana, ya?

**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

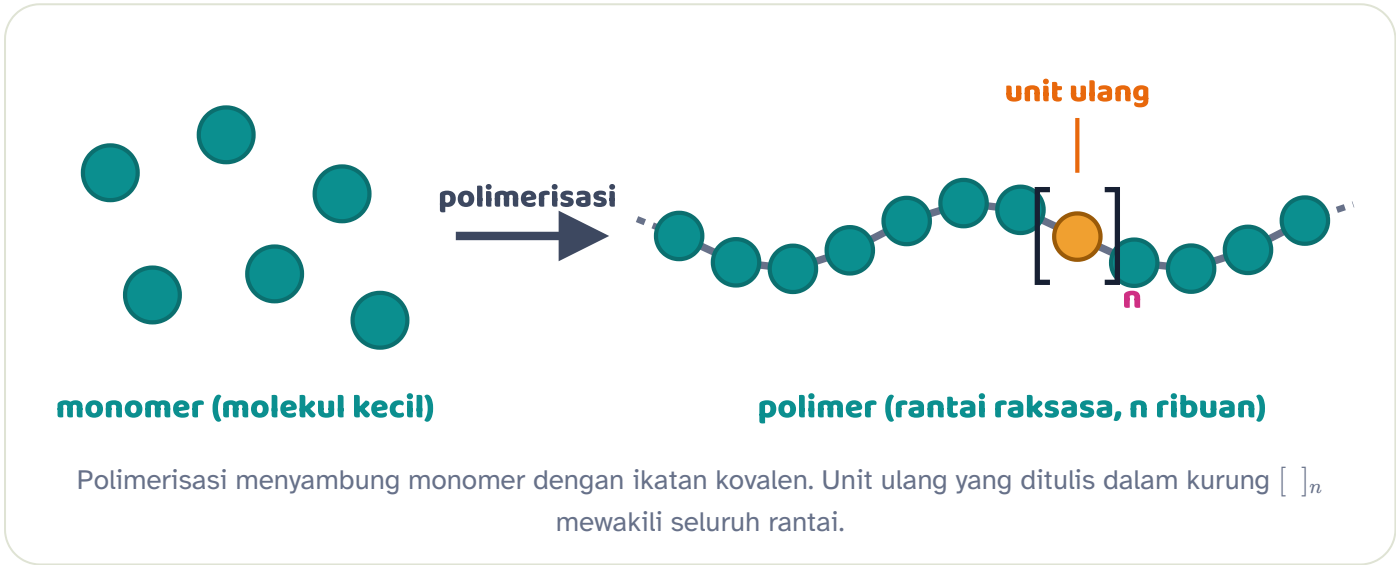
Ambil seutas kalung manik-manik. Setiap manik kecil dan sederhana, tetapi ratusan manik yang dironce menjadi kalung yang panjang, lentur, dan kuat. Kimiawan menyebut maniknya **monomer** dan kalungnya **polimer** (bahasa Yunani: *poly* = banyak, *meros* = bagian).

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**.



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 $\pm 0,5$ 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**

$\bar{M}_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i}$ menghitung setiap rantai sama penting. **Rata-rata massa** $\bar{M}_w = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i}$ memberi bobot lebih pada rantai yang berat. Perbandingannya, **dispersitas** $\bar{D} = \bar{M}_w / \bar{M}_n \geq 1$, 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 $\bar{D} = 1,75$. Protein alami memiliki $\bar{D} = 1$ (semua rantai identik), sedangkan plastik pabrik umumnya $\bar{D} = 2-10$.

35.2

Polimerisasi adisi: ikatan rangkap yang "membuka tangan"

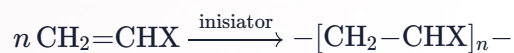
Etena, $\text{CH}_2=\text{CH}_2$, memiliki ikatan rangkap $\text{C}=\text{C}$. Di Bab 11 kamu belajar bahwa ikatan rangkap terdiri atas satu ikatan σ yang kuat dan satu ikatan π yang lebih lemah. Ikatan π inilah yang bisa "dibuka", sehingga setiap atom karbon (**C**) mendapat satu tangan bebas untuk 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 genggamannya, lalu tangan yang bebas dipakai untuk menggandeng tetangga baru di kiri dan kanan. Begitu terus, ribuan kali, sampai terbentuk barisan panjang yang bergandengan tangan.



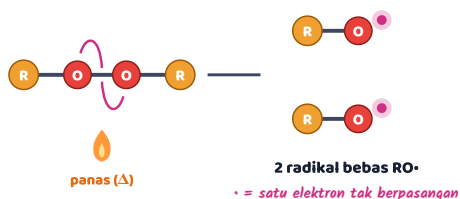
ATURAN • POLIMERISASI ADISI

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.



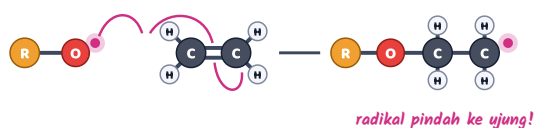
Agar monomer mau "membuka tangan", reaksi perlu dipicu oleh **inisiator**, misalnya peroksida yang menghasilkan **radikal bebas** (spesi dengan satu elektron tak berpasangan). Ikuti tahap-tahapnya dengan panah berkepala setengah, yang menunjukkan gerak *satu* elektron.

1 • Inisiasi: Inisiator dipanaskan



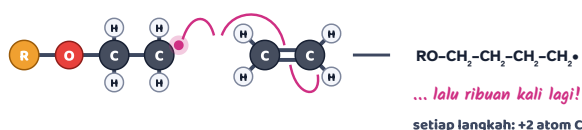
Langkah 1. Inisiator, misalnya peroksida $R-O-O-R$, dipanaskan. Ikatan $O-O$ yang lemah putus secara **homolitik**: setiap O membawa satu elektron. Terbentuk dua radikal bebas $RO^\bullet$. Panah berkepala setengah (seperti kail) = gerak satu elektron.

2 • Inisiasi: radikal menyerang C=C



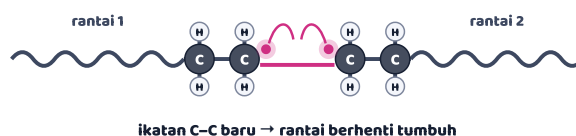
Langkah 2. Radikal $RO^\bullet$ menyerang ikatan rangkap etena. Satu elektron π berpasangan dengan elektron radikal membentuk ikatan $O-C$; elektron π lainnya pindah ke karbon ujung. Radikal kini berada di ujung rantai!

3 • Propagasi: rantai tumbuh



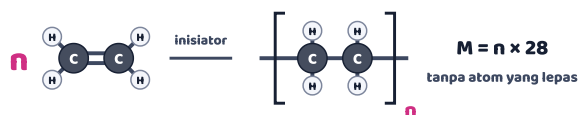
Langkah 3. Propagasi: radikal di ujung rantai menyerang etena berikutnya, lalu berikutnya lagi. Setiap langkah menambah 2 atom C, dan ini terjadi ribuan kali dalam sekejap.

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



Setiap monomer: 1 ikatan π putus, 1 ikatan σ baru terbentuk (eksoterm!)

Langkah 5. Hasilnya $n CH_2=CH_2 \rightarrow -[CH_2-CH_2]_n-$. 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): $C=C \pm 614 \text{ kJ/mol}$ dan $C-C \pm 348 \text{ kJ/mol}$. 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:

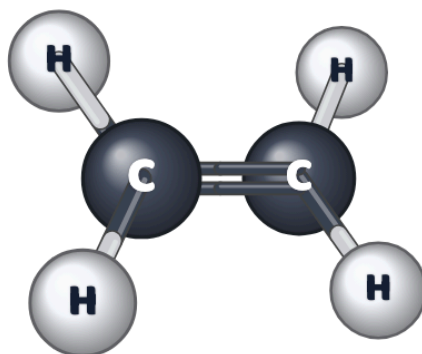
Polimer	Monomer	Unit ulang	Sifat & kegunaan	Kode
Polietilena (PE)	etena $\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$-\text{[CH}_2-\text{CH}_2]-$	lentur, tahan air: kantong, botol sampo, ember	2, 4
Polipropilena (PP)	propena $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$	$-\text{[CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)]-$	kuat, tahan panas $\pm 100^\circ\text{C}$: wadah makanan, tali rafia, karung beras	5
Polivinil klorida (PVC)	kloroetena (vinil klorida) $\text{CH}_2=\text{CHCl}$	$-\text{[CH}_2-\text{CHCl]}-$	kaku, tahan cuaca (lentur bila diberi pelentur): pipa, selang, kabel	3
Polistirena (PS)	stirena $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$	$-\text{[CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]-$	bening dan getas; bila dibusakan menjadi gabus putih yang ringan	6

PTFE	tetrafluoroetena $\text{CF}_2=\text{CF}_2$	$-\text{[CF}_2-\text{CF}_2]-$	sangat licin, tahan panas dan bahan kimia: lapisan wajan antilengket, pita seal pipa	7
Karet alam	isoprena $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$	$-\text{[CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}-\text{CH}_2]-$	elastis: ban, karet gelang, sarung tangan	-
Poliakrilonitril (PAN)	akrilonitril $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$	$-\text{[CH}_2-\text{CH}(\text{CN})]-$	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 $\approx 28,05$

[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 $\pm 120^\circ$ (datar). Bandingkan dengan oktana (potongan pendek rantai polietilena): sudut $C-C-C \pm 109,5^\circ$ dan rantainya zig-zag. Isoprena punya **dua** ikatan $C=C$; mana yang tersisa di karet?

$$M = n \times M_{\text{monomer}}$$

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 $\times$ (g/mol per unit) = g/mol ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-MASSA-POLIMER-ADISI](https://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: $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)- \rightarrow \text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ (propena). Arah sebaliknya: tulis monomer, ubah $\text{C}=\text{C}$ menjadi $\text{C}-\text{C}$, dan tambahkan ikatan terbuka di kedua ujung.

CONTOH Monomer di balik pipa air

Pipa air abu-abu terbuat dari PVC dengan unit ulang $-\text{[CH}_2-\text{CHCl]}-$. 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: $\text{CH}_2=\text{CHCl}$.
- 2 Namanya kloroetena, lebih dikenal sebagai vinil klorida. Rumus molekulnya $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$.
- 3 $M_r = 2(12) + 3(1) + 35,5 = 62,5$.

Monomer PVC adalah vinil klorida, $\text{CH}_2=\text{CHCl}$, $M_r = 62,5$. 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 $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ menambah panjang 0,254 nm.

- 1 (a) M_r unit ulang = $M_r \text{ C}_2\text{H}_4 = 28$. 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 $\pm 1,9 \mu\text{m}$, 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.

$n = M_r \text{ polimer} \div M_r \text{ monomer}$. Contoh: $56.000 \div 28 = 2.000$.



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 $-\text{[CH}_2=\text{CH}_2\text{]}-$ adalah kesalahan klasik: ikatan rangkap itulah yang dipakai untuk bergandengan. Pengecualiannya karet alam: monomer isoprena memiliki **dua** ikatan $\text{C}=\text{C}$, 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 $-\text{CH}_3$ 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 $\pm 165^\circ\text{C}$. 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 ($\pm 1.000\text{--}3.000\text{ atm}$) menghasilkan rantai bercabang: **LDPE** (massa jenis $\pm 0,92\text{ g/cm}^3$). Katalis Ziegler-Natta pada tekanan rendah menghasilkan rantai lurus: **HDPE** ($\pm 0,95\text{ g/cm}^3$) 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 $\rightarrow$ ester + air. Bila asamnya punya dua gugus $-\text{COOH}$ dan alkoholnya punya dua gugus $-\text{OH}$, reaksi itu bisa terus berulang di kedua ujung!

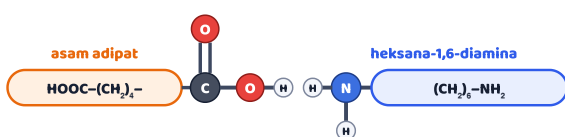
Bahasa sederhana · Bayangkan anak-anak yang bergandengan tangan di lapangan. Setiap kali dua anak berjabat tangan, mereka harus menyerahkan satu "tiket" kecil kepada panitia. Tiket itu adalah molekul air. Semakin panjang barisan, semakin banyak tiket yang terkumpul.



ATURAN • POLIMERISASI KONDENSASI

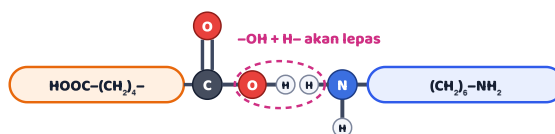
1. Setiap monomer memiliki **dua gugus fungsi** yang reaktif, misalnya -COOH , -OH , atau -NH_2 .
2. Setiap ikatan baru melepaskan **satu molekul kecil**, biasanya H_2O (kadang HCl atau CH_3OH).
3. Gugus -COOH dengan -NH_2 membentuk ikatan **amida** -CO-NH- (poliamida); -COOH dengan -OH membentuk ikatan **ester** -CO-O- (poliester).
4. Untuk n molekul A dan n molekul B terbentuk $2n - 1$ ikatan, sehingga terlepas $(2n - 1)$ molekul air.

Dua monomer, masing-masing bertangan dua



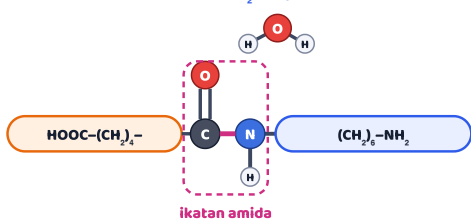
Langkah 1. Dua monomer, masing-masing bertangan dua: **asam adipat** (dua gugus -COOH) dan **heksana-1,6-diamina** (dua gugus -NH_2). Tidak ada ikatan $\text{C}=\text{C}$ di rantainya.

$\text{-OH} + \text{H-}$ akan lepas



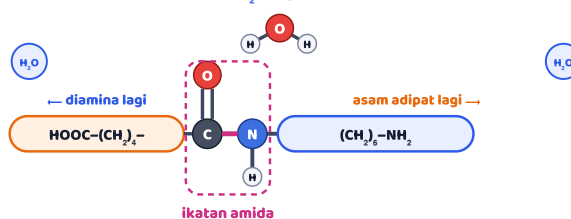
Langkah 2. Ujung -COOH mendekati ujung -NH_2 . Gugus -OH dari asam dan satu atom H dari amina akan dilepas.

H_2O lepas!



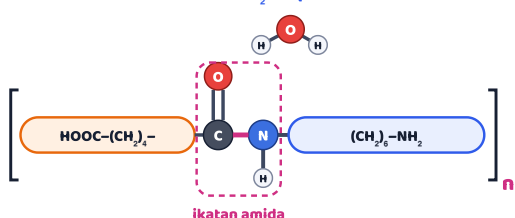
Langkah 3. -OH dan -H bergabung menjadi satu molekul **air** yang pergi. C dan N kini terikat langsung: terbentuk **ikatan amida** -CO-NH- .

H_2O lepas!



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.

H_2O lepas!



unit ulang nilon-6,6: $\text{-[CO-(CH}_2\text{)}_4\text{-CO-NH-(CH}_2\text{)}_6\text{-NH]-}$ (Mr 226)

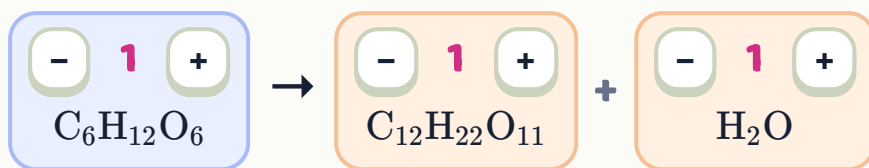
Langkah 5. Hasilnya **nilon-6,6**: $n \text{HOOC(CH}_2\text{)}_4\text{COOH} + n \text{H}_2\text{N(CH}_2\text{)}_6\text{NH}_2 \longrightarrow \text{-[CO(CH}_2\text{)}_4\text{CO-NH(CH}_2\text{)}_6\text{NH]}_n\text{-} + (2n - 1) \text{H}_2\text{O}$. Angka "6,6": enam C dari diamina dan enam C dari diasam.

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 ▶

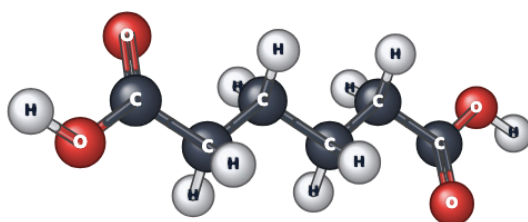
Persamaan 1 dari 4 null

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 ₂ O	botol minum, kain poliester
PLA	asam laktat	ester	H ₂ O	gelas dan sedotan bioplastik, benang jahit operasi
Protein	asam amino (20 jenis)	peptida (amida)	H ₂ O	sutra, rambut, otot, enzim
Pati & selulosa	glukosa	glikosida (C- O-C)	H ₂ O	nasi, singkong, kapas, kertas
Bakelit	fenol + formaldehida	jembatan -CH ₂ -	H ₂ O	stopkontak, pegangan panci

MOLEKUL 3D Monomer bertangan dua dan ikatan peptida



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Asam adipat (asam heksanadioat) C₆H₁₀O₄ 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 -NH₂ (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.

$$M = n(M_A + M_B) - (2n - 1) \times 18$$

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

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 $\pm 13,7\%$ 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). Tambah 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).

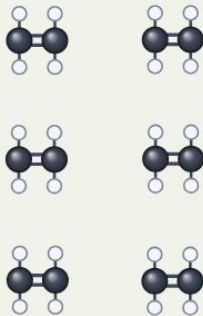
Kini kamu bisa merangkai polimer sendiri. Pilih monomer, lalu perhatikan perbedaan dua cara bergandengan: pada adisi rantai tumbuh tanpa sisa, pada kondensasi setiap sambungan "membayar" satu molekul air.

Polietilena (PE)

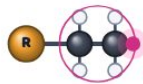
ADISI • ikatan C=C terbuka, tanpa sisa



wadah etena



C hitam • H putih • O merah • N biru



Jenis

adisi: C=C terbuka, tanpa sisa

Monomer tersambung

1

Mr rantai

28 g/mol

H₂O terlepas

0

Ikatan penghubung

C-C (ikatan tunggal)

Kegunaan

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.

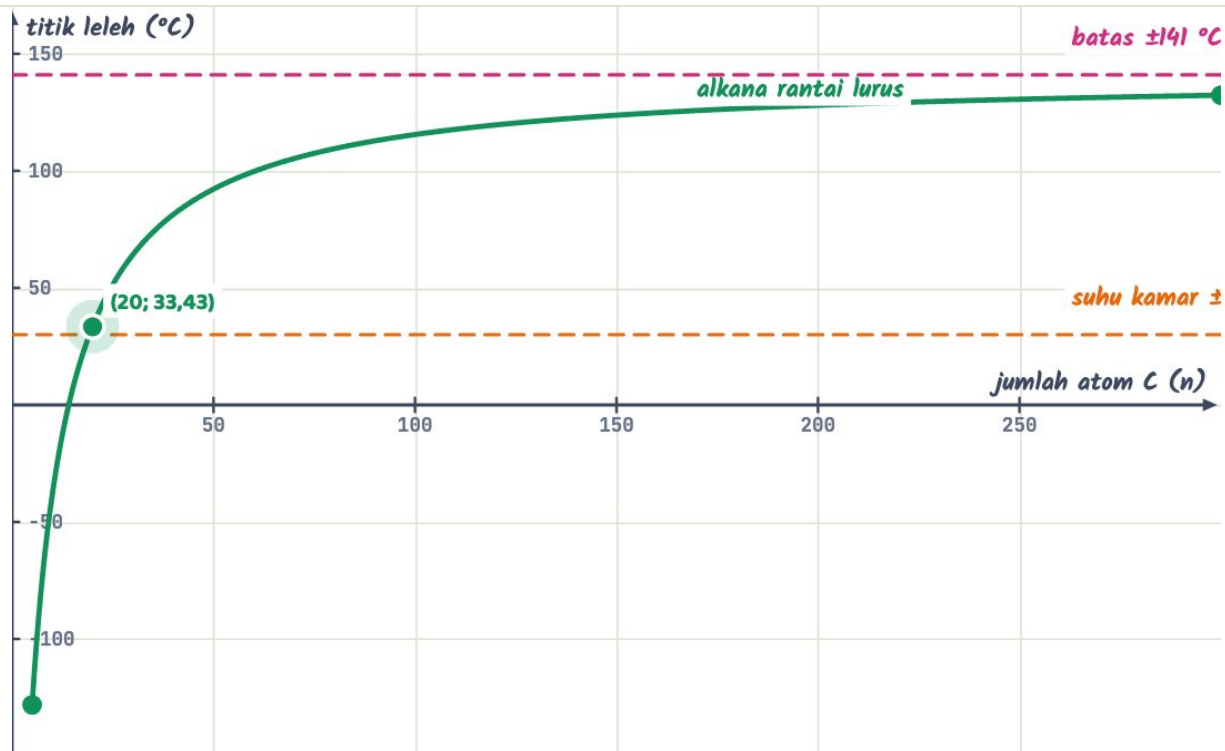
Karet terasa keras seperti plastik.

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.

$$T_m \approx 414,3 \cdot \frac{n - 1,5}{n + 5} \text{ K}$$

$$n = 20 \text{ atom C: } T_m \approx 33,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$



lilin parafin: padat lunak

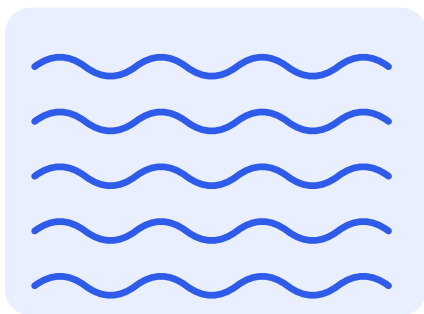
titik leleh
33 °C

Mr rantai
282

Seret titik hijau. Kurva empiris ini (persamaan Broadhurst) cocok dengan data alkana: oktana $-57 \text{ } ^\circ\text{C}$, eikosana ($n = 20$) $\pm 37 \text{ } ^\circ\text{C}$, triakontana ($n = 30$) $\pm 66 \text{ } ^\circ\text{C}$. Mengapa kurvanya mendatar dan tidak pernah melewati $\pm 141 \text{ } ^\circ\text{C}$?

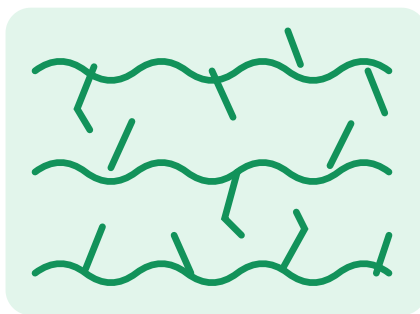
Bentuk rantai juga penting. Rantai lurus dapat tersusun rapat dan sejajar seperti batang korek api dalam kotaknya, membentuk daerah **kristal** yang kuat. Cabang samping menghalangi kerapatan itu. Ikatan silang mengunci rantai menjadi satu jaringan raksasa.

Rantai lurus



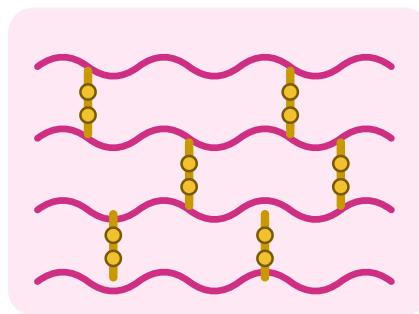
HDPE: rapat, teratur
kuat, kaku, buram

Rantai bercabang



LDPE: cabang merenggangkan
lentur, lunak, lebih bening

Ikatan silang



karet tervulkanisasi, termoset
tidak meleleh; elastis/keras

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 ($\pm 1-3\%$) menghasilkan karet elastis untuk ban dan karet gelang; banyak belerang ($\pm 30-40\%$) menghasilkan **ebonit** yang keras, dulu dipakai untuk sisir dan corong peniup klarinet.



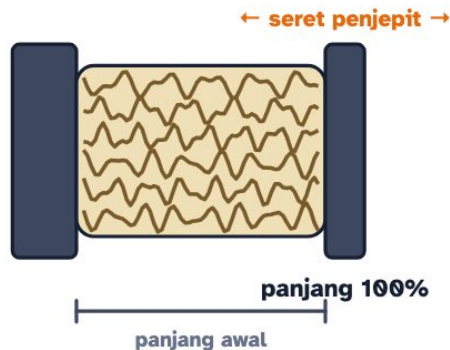
TAMU DARI MASA LALU

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.

karet mentah (belum divulkanisasi)

belerang 0 bagian per 100 karet • suhu ruang

gaya tarik



— rantai poliisoprena

| jembatan belerang -S-S- (0)

Jenis karet

karet mentah (belum divulkanisasi)

Panjang

100 % panjang awal

Kembali ke semula?

—

Gaya tarik (relatif)

0

Contoh benda

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** ($\pm 58^{\circ}\text{C}$, 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
	PET polietilena tereftalat	botol air minum, botol minuman, botol minyak goreng	mudah dan laris dipungut	serat poliester (kain, isian bantal), botol baru
	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

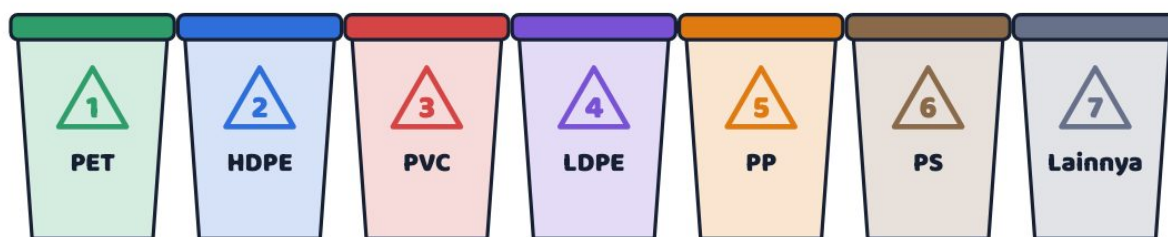
LAB MINI Pemilah Plastik: kode 1 sampai 7

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-35



Gelas air minum kemasan

Seret ke tong berkode yang tepat ↓ (atau ketuk tongnya)



Benar pada percobaan pertama

0

Salah tong

0

Barang tersisa

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.

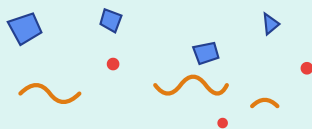
sinar UV + ombak + gesekan pasir memecah rantai dan kepingan

Makroplastik



> 5 mm: botol, kantong

Mikroplastik



1 μm - 5 mm: keping, serat

Nanoplastik



< 1 μm : tak tampak

→ termakan plankton, ikan, dan kerang, lalu masuk ke rantai makanan kita

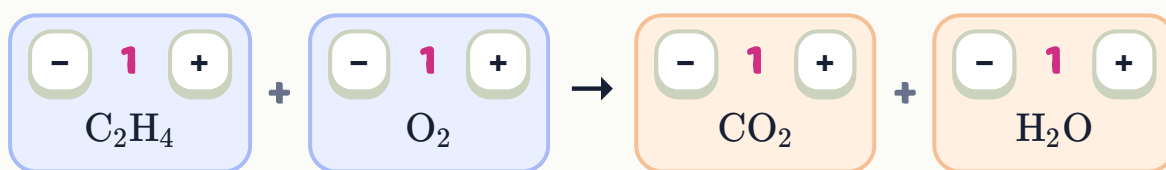
Plastik tidak "hilang", melainkan pecah menjadi kepingan yang makin kecil. Batas mikroplastik adalah 5 mm.

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.

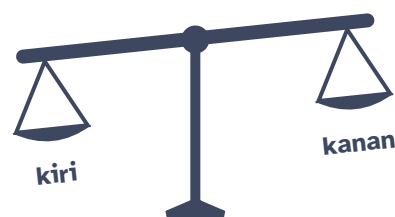


PENYETARA REAKSI

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."

MITOS

"Plastik biodegradable pasti terurai dalam beberapa hari di mana saja."

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.

FAKTA

PLA butuh kompos industri ($\pm 58\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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."

MITOS

"Membakar sampah plastik membuatnya hilang tanpa sisa."

FAKTA

Pati, selulosa, protein, DNA, sutra, dan karet alam adalah polimer alam yang dibuat makhluk hidup jauh sebelum pabrik plastik pertama berdiri.

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 $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ (M_r 62,5).
- 3 Polimer adisi: unit ulang = monomer, yaitu $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ (vinil klorida). Polimernya PVC.
- 4 $n = 75.000/62,5 = 1.200$.
- 5 Saat dibakar, klorin keluar sebagai gas HCl: $2 \text{C}_2\text{H}_3\text{Cl} + 5 \text{O}_2 \longrightarrow 4 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{HCl}$, 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 ($\pm 200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$) agar rantainya membentuk cincin, lalu dipanaskan di atas $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 --COO^- dengan ion 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, $\text{--[CH=CH]}_n\text{--}$, 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

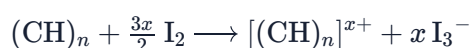
Butiran gel superabsorben (misalnya dari popok bekas atau mainan bola air yang bisa membesar) tidak boleh ditelan atau dimasukkan ke hidung dan telinga. Di dalam tubuh butiran itu terus mengembang dan dapat menyumbat saluran. Jauhkan dari jangkauan adik yang masih kecil.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

DOPING: POLIMER YANG DIOKSIDASI

"Doping" pada poliasetilena sebenarnya reaksi redoks (Bab 29). Iodin mengoksidasi rantai dan berubah menjadi ion triiodida:



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 menyeter 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.

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 pekerjaanya 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

Pagi hari, warung nasi uduk dekat sekolah

BIMA

Nasi uduk, tempe goreng, telur balado! Ini sarapan, Kak, bukan pelajaran kimia.

NASI UDUK



LARAS

Justru ini kimia semua, Bim! Nasi itu pati, tempe kaya protein, minyak gorengnya lemak. Semuanya molekul raksasa dari C, H, O, dan N.

- nasi → karbohidrat
- tempe → protein
- minyak → lemak



KAK TIRTA

Setiap suap adalah reaksi kimia yang menunggu. Begitu kamu mengunyah, enzim di ludahmu langsung memotong rantai pati!



Kimo ikut sarapan...

KIMO

Coba kunyah nasi putih tawar satu-dua menit tanpa ditelan. Lama-lama terasa manis, lho!

BIMA

Jadi mulutku... laboratorium?



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 $C_n(H_2O)_m$. Glukosa, $C_6H_{12}O_6$, bisa ditulis $C_6(H_2O)_6$. Namun hati-hati: tidak ada molekul air yang menempel di dalamnya. Atom H dan O tersebar sebagai gugus $-OH$ dan gugus karbonil $C=O$.

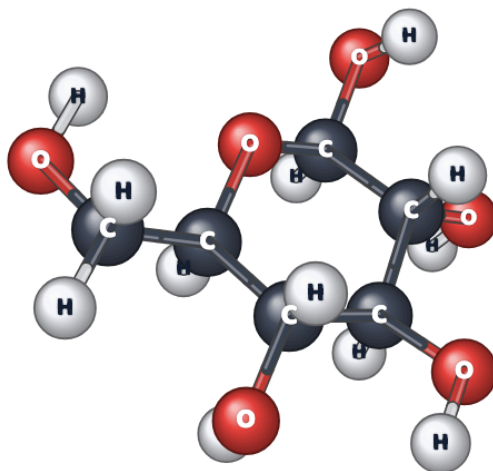
Bahasa sederhana • Bayangkan manik-manik. Satu manik adalah **gula sederhana**, misalnya glukosa. Dua manik yang disambung adalah gula pasir. Ribuan manik yang dirangkai menjadi kalung panjang adalah **pati** di dalam nasi dan singkong. Kalung yang dirangkai dengan cara berbeda menjadi **serat** yang membuat batang tanaman kokoh.

DEFINISI • KARBOHIDRAT

Karbohidrat adalah senyawa polihidroksi aldehida atau polihidroksi keton (banyak gugus $-OH$ 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	$C_6H_{12}O_6$ (aldosa)	darah, madu, buah	+ merah bata
	Fruktosa	$C_6H_{12}O_6$ (ketosa)	madu, buah, nira	+
	Galaktosa	$C_6H_{12}O_6$ (aldosa)	bagian dari laktosa	+
Disakarida $C_{12}H_{22}O_{11}$	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 $\alpha(1\rightarrow4)$ dan $\alpha(1\rightarrow6)$	nasi, singkong, sagu, jagung	– (uji iodin: biru-hitam)
	Glikogen	α -glukosa, sangat bercabang	hati dan otot	–
	Selulosa	β -glukosa, ikatan $\beta(1\rightarrow4)$	serat sayur, kapas, kertas	–



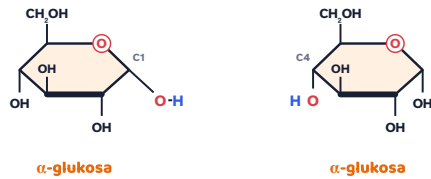
Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Glukosa (β-D-glukosa) $C_6H_{12}O_6$ Mr ≈ 180,16 PubChem ↗

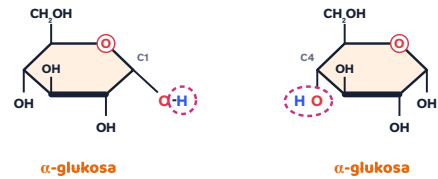
Gula darah; bahan bakar utama sel. Bentuk cincin enam.

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 ($\pm 1,43$ Å).

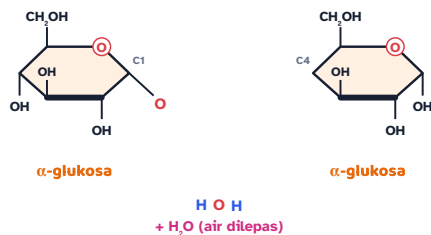
Glukosa di dalam air sebagian besar berbentuk **cincin**. Saat cincin menutup, gugus –OH pada atom karbon nomor 1 (C1) bisa mengarah ke bawah bidang cincin (**α-glukosa**) atau ke atas (**β-glukosa**). Perbedaan kecil ini menentukan nasib makanan: **pati** tersusun dari α-glukosa sehingga rantainya melingkar seperti per dan mudah dicerna, sedangkan **selulosa** tersusun dari β-glukosa sehingga rantainya lurus, saling mengunci dengan ikatan hidrogen, dan tidak bisa dicerna manusia.



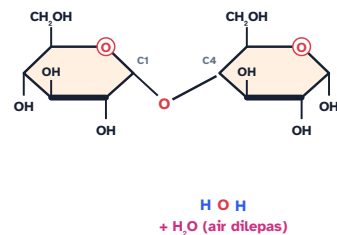
Langkah 1. Dua molekul α -glukosa (proyeksi Haworth; atom C cincin tidak ditulis). Perhatikan gugus $-\text{OH}$ pada C1 molekul kiri dan pada C4 molekul kanan.



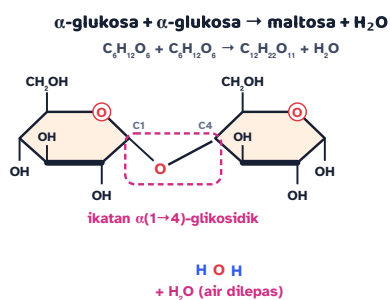
Langkah 2. Atom H dari $-\text{OH}$ di C1 glukosa pertama dan gugus $-\text{OH}$ di C4 glukosa kedua akan dilepas.



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** $\text{C}-\text{O}-\text{C}$.



Langkah 5. Hasilnya maltosa, $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$. 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:

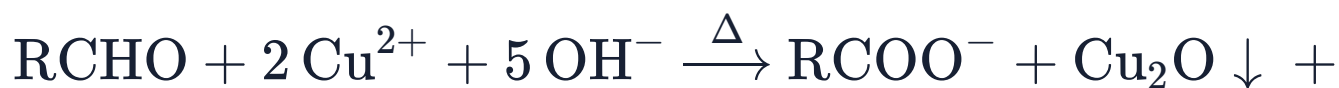


Glukosa inilah yang dibawa darah ke seluruh sel sebagai bahan bakar. Kelebihannya disimpan di hati dan otot sebagai **glikogen**, "pati hewan" yang lebih bercabang.

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**:



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.

**ANOMER DAN MUTAROTASI**

Bentuk rantai terbuka glukosa punya gugus aldehida di C1. Gugus —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 $\pm 36\%$ α , $\pm 64\%$ 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 NH_2 , gugus karboksil COOH , satu atom H, dan satu gugus samping **R** yang berbeda-beda.

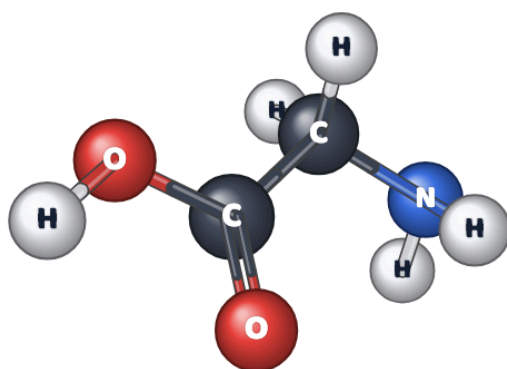


Bahasa sederhana • Bayangkan kamu punya manik-manik dari 20 warna berbeda. Dengan merangkai ratusan manik dalam urutan tertentu, kamu bisa membuat kalung yang tak terhitung jenisnya. Begitulah tubuhmu membuat puluhan ribu jenis protein hanya dari 20 jenis asam amino.

**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** —CO—NH— sambil melepas satu molekul air.

MOLEKUL 3D Empat asam amino, satu kerangka



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

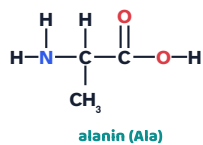
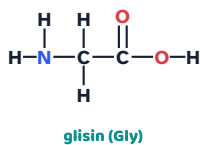
Glisin $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$

Mr $\approx 75,07$

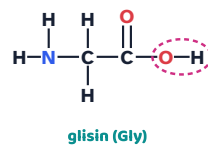
[PubChem ↗](#)

Asam amino paling sederhana; tidak kiral.

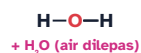
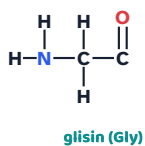
Temukan kerangka yang sama pada keempat molekul: $\text{N}-\text{C}-\alpha-\text{C}(=\text{O})-\text{O}$. Lalu bandingkan gugus R-nya: glisin hanya punya H, alanin CH_3 , sistein CH_2SH (atom S kuning!), triptofan sebuah cincin ganda besar. Glisin adalah satu-satunya yang tidak kiral. Mengapa?



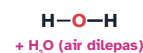
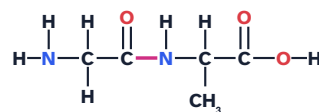
Langkah 1. Dua asam amino: glisin ($R = \text{H}$) dan alanin ($R = \text{CH}_3$). Masing-masing punya gugus amina (N biru) dan gugus karboksil.



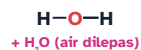
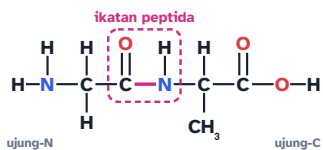
Langkah 2. Gugus $-\text{OH}$ dari karboksil glisin dan satu atom H dari gugus amina alanin akan dilepas.



Langkah 3. $-\text{OH}$ 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 $-\text{CO}-\text{NH}-$ 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.

$$M_r = n \bar{M} - (n - 1) \times 18$$

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 (M_r nyata ± 5.800)

51 asam amino $\rightarrow$ **50** ikatan peptida dan **50** molekul air dilepas. $M_r \approx$ **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

Glutation adalah tripeptida antioksidan di dalam sel, tersusun dari asam glutamat (M_r 147), sistein (M_r 121), dan glisin (M_r 75). Hitung M_r glutation.

1 Tiga asam amino membentuk $3 - 1 = 2$ ikatan peptida, jadi 2 molekul air dilepas.

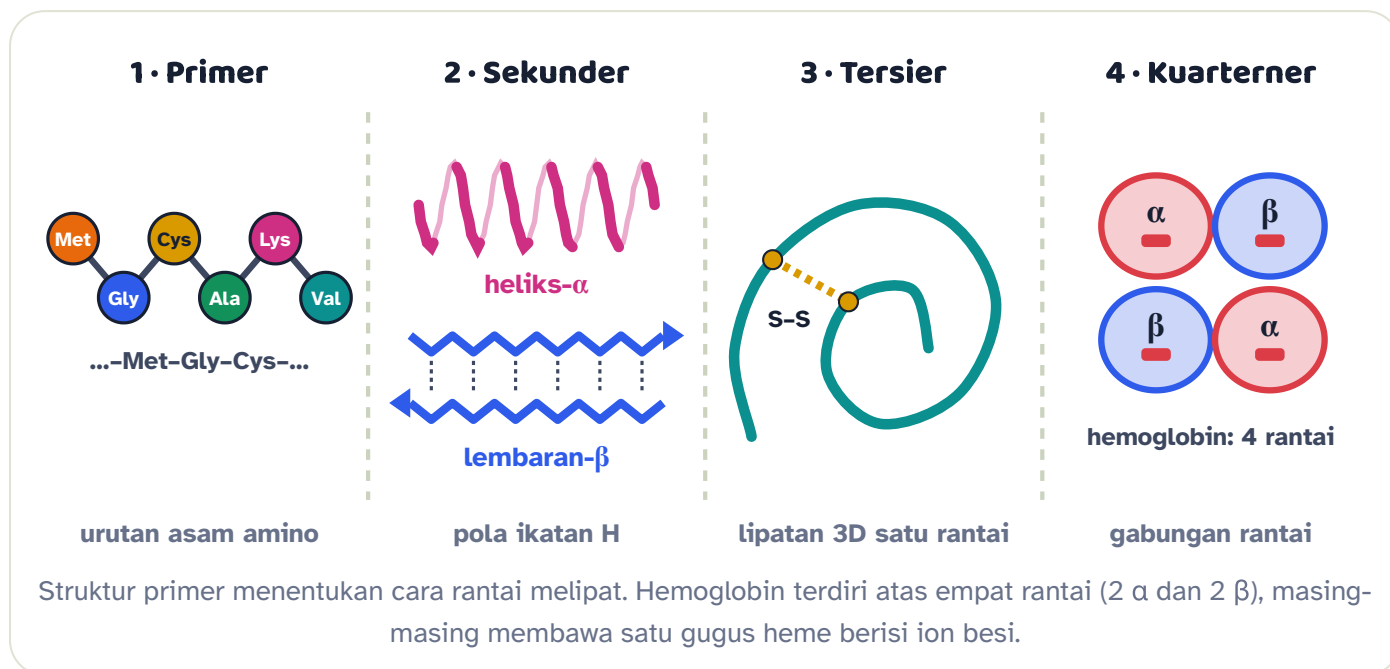
2 Jumlah massa asam amino: $147 + 121 + 75 = 343$.

3 Kurangi air: $343 - 2 \times 18 = 307$.

M_r glutation = 307. Cek: rumus molekulnya $C_{10}H_{17}N_3O_6S$, 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**.



Tingkat	Apa itu?	Dijaga oleh
Primer	urutan asam amino dalam rantai	ikatan peptida (kovalen)
Sekunder	heliks-α dan lembaran-β	ikatan hidrogen antara C=O dan N-H tulang punggung
Tersier	lipatan 3D seluruh rantai	interaksi gugus R: ikatan hidrogen, ikatan ion, jembatan disulfida 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 CuSO_4 , berwarna biru muda. Ion 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 lipatnya, 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 coklat 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 coklat 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."

MITOS

"Protein hanya ada di daging."

FAKTA

Memasak hanya mendenaturasi protein; ikatan peptidanya tetap utuh, jadi jumlah proteinnya sama. Protein telur matang justru lebih mudah dipotong enzim pencernaan.

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 $\text{H}_2\text{N}-\text{CHR}-\text{COOH}$, melainkan **ion zwiter** $\text{H}_3\text{N}^+-\text{CHR}-\text{COO}^-$: 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 $\text{H}_3\text{N}^+-\text{CHR}-\text{COOH}$; pada pH tinggi, anion $\text{H}_2\text{N}-\text{CHR}-\text{COO}^-$. pH saat muatan bersihnya nol disebut **titik isoelektrik** (pI). Untuk glisin, $\text{pI} = \frac{1}{2}(\text{p}K_{a1} + \text{p}K_{a2}) = \frac{1}{2}(2,34 + 9,60) = 5,97$. 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 $\pm 1,33$ 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:



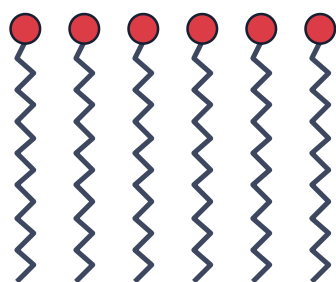
Gugus R adalah rantai hidrokarbon panjang (umumnya 12–22 atom C). Bentuk rantai inilah yang membedakan mentega yang padat dari minyak goreng yang cair.



DEFINISI • ASAM LEMAK JENUH, TAK JENUH, DAN TRANS

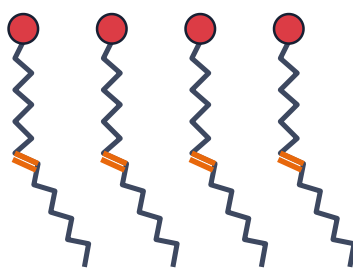
- **Asam lemak jenuh**: semua ikatan C–C tunggal; rantainya lurus dan bisa tersusun rapat. Contoh: asam palmitat (16 C), asam stearat (18 C), asam laurat (12 C).
- **Asam lemak tak jenuh**: punya satu atau lebih ikatan rangkap C=C. Di alam, ikatan rangkapnya hampir selalu berbentuk **cis** sehingga rantai **bengkok** $\pm 30^\circ$. 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.

Jenuh • lurus, rapat



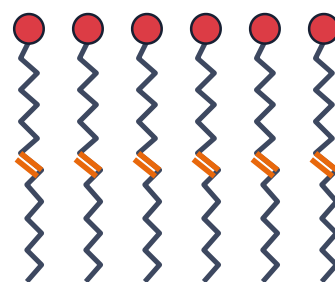
padat pada suhu kamar

Tak jenuh cis • bengkok, renggang



cair pada suhu kamar

Trans • hampir lurus, rapat



padat; buruk bagi jantung



gugus –COOH (kepala polar)

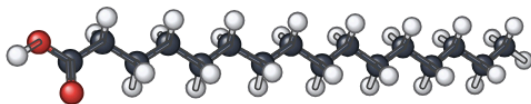


ikatan rangkap C=C

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 $\approx$ 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 $\pm 27^\circ\text{C}$
Minyak kelapa	$\pm 90\%$ (terutama laurat)	$\pm 7\%$	$\pm 2\%$	cair, membeku di bawah $\pm 24^\circ\text{C}$
Minyak sawit	$\pm 50\%$ (terutama palmitat)	$\pm 40\%$ (oleat)	$\pm 10\%$	cair-semipadat
Mentega	$\pm 65\%$	$\pm 28\%$	$\pm 4\%$	padat lunak
Minyak kedelai	$\pm 15\%$	$\pm 23\%$	$\pm 58\%$	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 $-\text{OH}$). 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)

$$E = 4m_K + 4m_P + 9m_L$$

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 $\approx$ 578 kkal = 2.418,352 kJ. Lemak menyumbang 34,256% energinya.

Cek satuan: g $\times$ (kkal/g) = kkal ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENERGI-MAKANAN](https://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:



Ujung $-\text{COO}^-$ 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."

MITOS

"Minyak goreng berlabel 'nonkolesterol' lebih sehat daripada minyak nabati lain."

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.

FAKTA

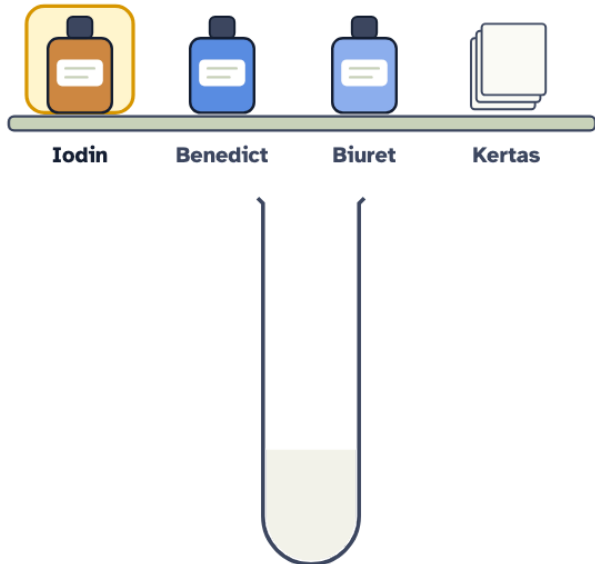
Kolesterol hanya dibuat oleh hewan. Semua minyak dari tumbuhan (sawit, kelapa, kedelai) memang tidak mengandung kolesterol, jadi label itu tidak membedakan apa-apa.

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

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?

**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 $\pm 110^\circ\text{C}$ selama sehari. Di usumu, pekerjaan yang sama selesai dalam beberapa jam pada 37°C dan pH hampir netral.

Rahasiannya adalah **enzim**.

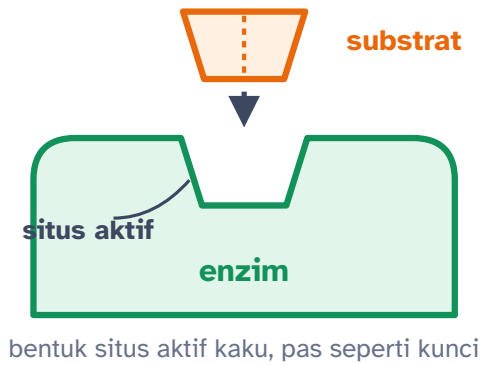
Bahasa sederhana • Enzim seperti tukang potong yang sangat cekatan dan sangat pemilih. Setiap enzim hanya mau memotong satu jenis "barang". Amilase hanya memotong pati, laktase hanya memotong gula susu. Enzim tidak ikut habis: setelah selesai memotong, ia siap bekerja lagi, ribuan kali per detik.

**DEFINISI • ENZIM**

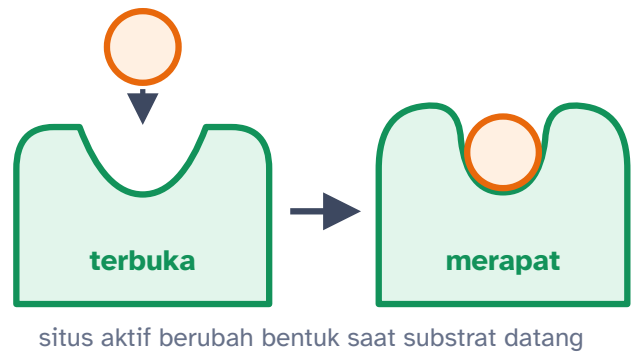
Enzim adalah katalis biologis, hampir selalu berupa protein, yang mempercepat reaksi di makhluk hidup dengan menurunkan energi aktivasi (Bab 21) tanpa ikut habis bereaksi. Zat yang diubah enzim disebut **substrat**. Substrat terikat pada bagian kecil enzim yang bentuknya khas, yaitu **situs aktif**, membentuk kompleks enzim-substrat:



Model gembok–kunci (1894)



Model *induced fit* (1958)



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	$2\text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	±7	±37 °C



TRIK KAK TIRTA

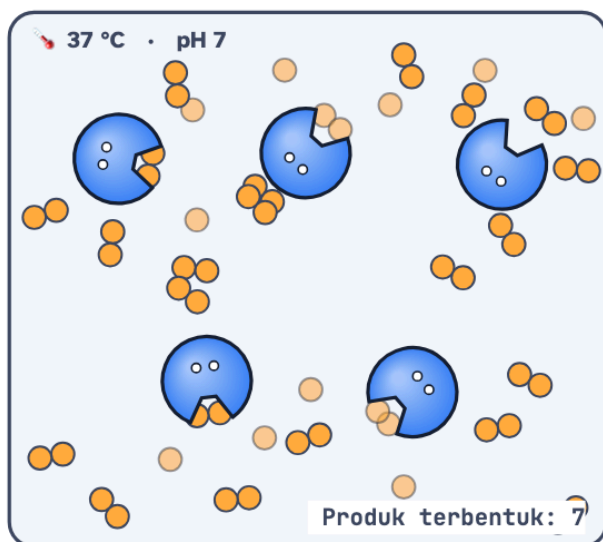
Nama enzim hampir selalu berakhiran **-ase** dan menyebut substratnya: **amilase** memecah **amilum**, **lipase** memecah **lipid**, **laktase** memecah **laktosa**, **protease** memecah **protein**. Kalau ketemu nama aneh seperti "ure-ase", tebak saja: pemecah urea. Biasanya benar!

LAB MINI

Enzim di Dapur: cari suhu dan pH terbaiknya

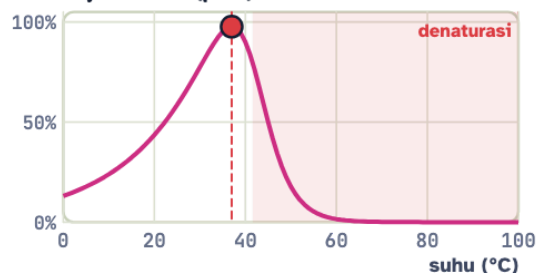
LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-36

Perbesaran partikel di dalam gelas reaksi

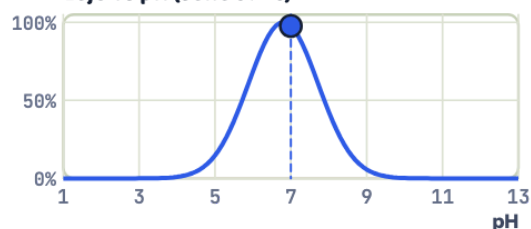


Kurva = laju awal enzim segar • ■ = titik catatanmu

Laju vs suhu (pH 7)



Laju vs pH (suhu 37 °C)



Laju sekarang: 98% • enzim utuh 100%

Laju relatif

98 %

Enzim utuh

100 %

Keadaan

mendekati optimum 👍

Optimum enzim ini

37 °C • pH 6,8

Produk terbentuk

6

Pilih enzim, lalu geser suhu dan pH (atau ketuk langsung grafikanya). 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 lipatanannya 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.

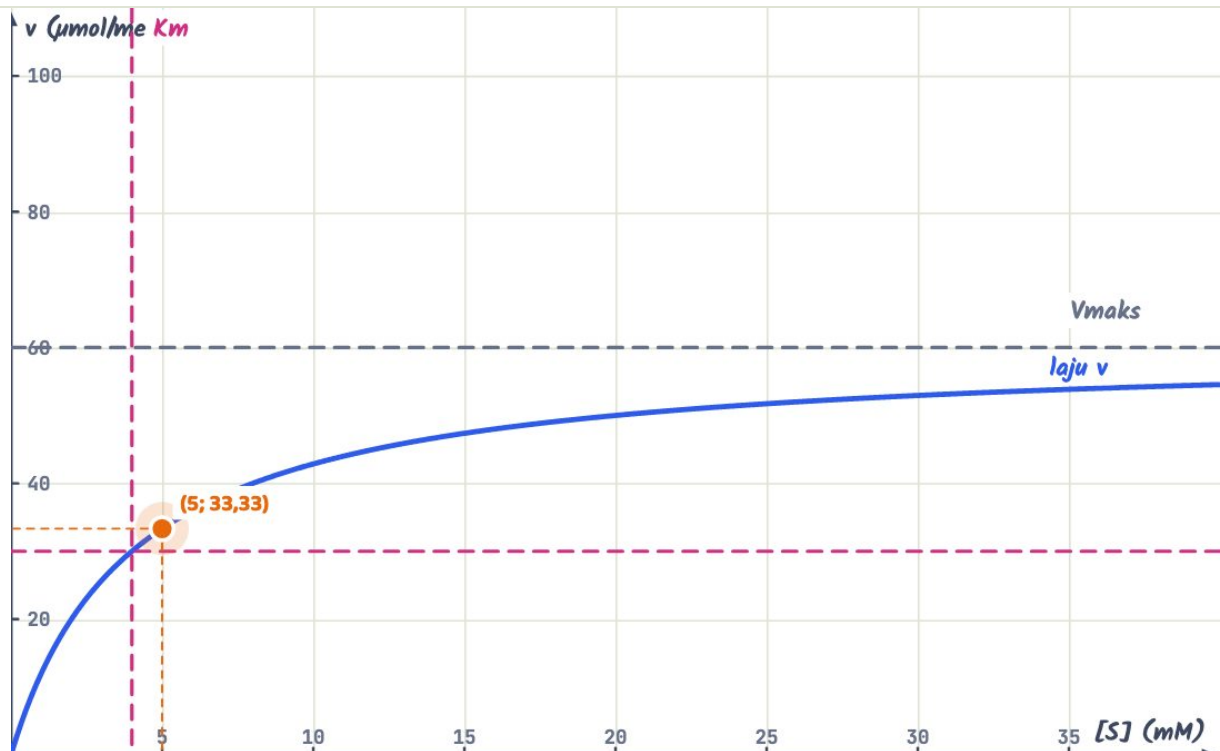
- 1 Laju berbanding terbalik dengan waktu: 20 °C → 4,2; 30 °C → 8,3; 37 °C → 16,7; 45 °C → 11,1 (satuan $s^{-1} \times 10^{-3}$).
- 2 Laju tertinggi pada 37 °C, jadi suhu optimum ± 37 °C (antara 30 dan 45 °C).
- 3 Pada 60 °C pati tidak pernah habis: amilase sudah terdenaturasi sehingga lajunya praktis 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.

$$v = \frac{V_{\max} [S]}{K_M + [S]}$$

$$[S] = 5 \text{ mM: } v = 33,33 \text{ } \mu\text{mol/menit} = 55,56\% \text{ dari } V_{\max}$$



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 $V_{\max}$. Perkecil K_m : enzim yang lebih "lengket" pada substratnya cepat jenuh.



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 $\pm 65^\circ\text{C}$), 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 $E + S \rightleftharpoons ES \rightarrow E + P$ dengan anggapan keadaan tunak ($[ES]$ tetap), laju awal adalah

$$v = \frac{V_{\max}[S]}{K_M + [S]} \quad V_{\max} = k_{\text{cat}}[E]_0$$

K_M adalah konsentrasi substrat saat $v = \frac{1}{2}V_{\max}$; 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 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

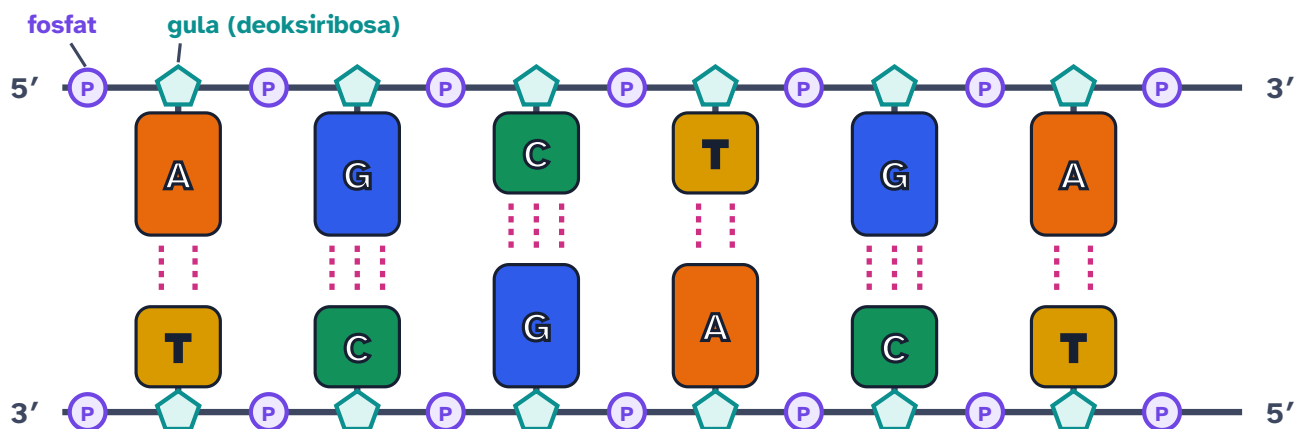
Resep untuk membuat semua proteinmu tersimpan dalam molekul raksasa bernama **DNA** (asam deoksiribonukleat). Jika DNA dari satu sel tubuhmu direntangkan, panjangnya sekitar 2 meter, padahal semuanya dilipat di dalam inti sel yang ukurannya hanya beberapa mikrometer!

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.



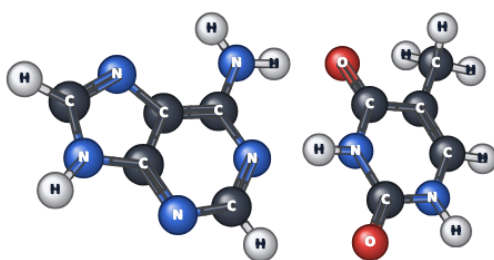
ATURAN · PASANGAN BASA KOMPLEMENTER (WATSON-CRICK)

A berpasangan dengan **T** melalui **dua** ikatan hidrogen; **G** berpasangan dengan **C** melalui **tiga** ikatan hidrogen. Akibatnya, dalam DNA beruntai ganda berlaku **aturan Chargaff**:

$$\%A = \%T \quad \%G = \%C \quad \%A + \%G = 50\%$$

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 $\pm 2,9 \text{ \AA}$: 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 = $30\% \times 200 = 60$, 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 $-\text{OH}$ 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

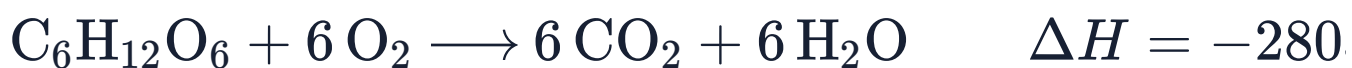
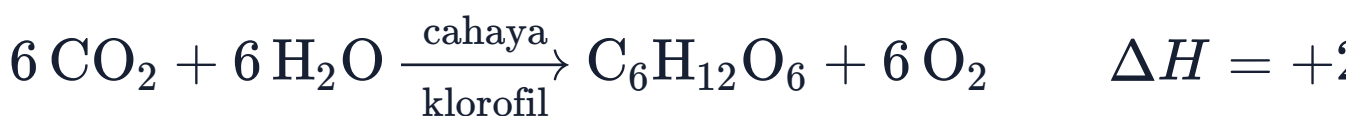
MENCAIRKAN DNA DAN MESIN FOTOKOPI GEN

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 $\pm 95^\circ\text{C}$ agar untainya terpisah, didinginkan $\pm 55^\circ\text{C}$ agar primer menempel, lalu $\pm 72^\circ\text{C}$ 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

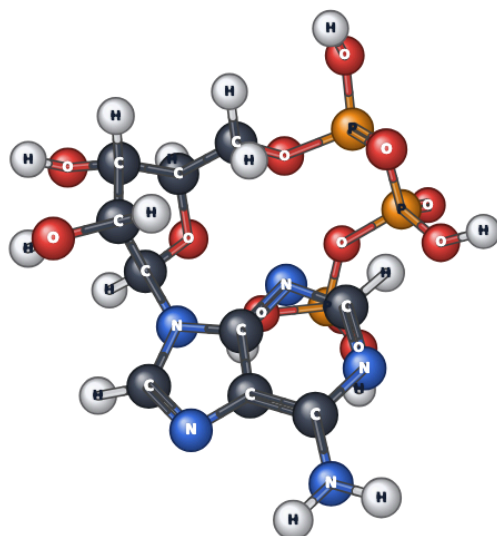
Semua energi di piringmu berasal dari Matahari. Tumbuhan menangkapnya lewat **fotosintesis**, lalu sel-selmu melepaskannya kembali lewat **respirasi**. Kedua reaksi ini saling berkebalikan:



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 $\approx 507,18$ PubChem ↗

'Mata uang energi' sel; energi dilepas saat ikatan fosfat terakhir dihidrolisis.

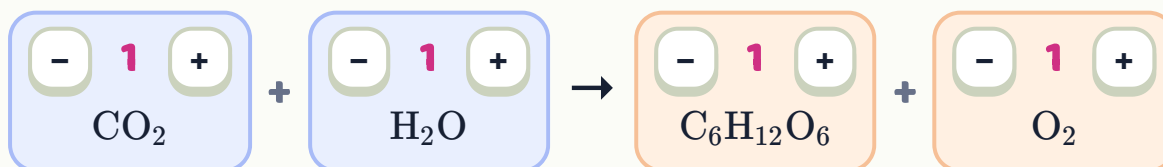
Temukan tiga bagian ATP: basa adenin (cincin ganda dengan banyak N), gula ribosa (cincin lima), dan rantai tiga gugus fosfat (atom P jingga). Ikatan fosfat terakhirlah yang "dipatahkan" untuk melepaskan energi.

Tanpa oksigen, sel ragi dan beberapa bakteri tetap bisa memperoleh sedikit energi lewat **fermentasi**. Glukosa hanya dipecah sebagian, menghasilkan etanol atau asam laktat:

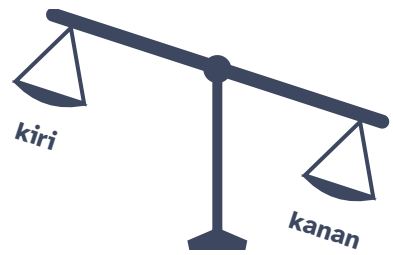


PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi kehidupan



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 <i>Rhizopus</i>	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 <i>Aspergillus</i> , 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 CO₂ (88 g).

RUMUS HIDUP

Etanol dan CO₂ 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 (**$\pm 58,302$ mL**) dan **44 g** CO₂ (**± 24 L** gas pada suhu kamar).

Cek satuan: $\text{g} \div (\text{g/mol}) \times (\text{mol/mol}) \times (\text{g/mol}) = \text{g}$ ✓

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

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 CO₂ (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 $\rightarrow 0,30 \times 46 = 13,8$ g.

3 CO₂: $0,30$ mol $\rightarrow 0,30 \times 24 = 7,2$ L.

13,8 g etanol dan 7,2 L CO₂. Gas inilah yang membuat wadah tapai yang ditutup rapat mengembung, dan sisa glukosa membuat tapai tetap manis.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

PEMBUKUAN ENERGI SEL: RESPIRASI LAWAN FERMENTASI

Hidrolisis ATP pada kondisi standar biokimia melepas $\Delta G^{\circ'} \approx -30,5$ kJ/mol:



Respirasi aerob satu mol glukosa ($\Delta G^{\circ} \approx -2870$ kJ/mol) menghasilkan ± 30 –32 mol ATP.

Efisiensinya $\pm \frac{32 \times 30,5}{2870} \approx 34\%$, 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 CO₂ 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 CO₂ (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 ($\pm 40^\circ\text{C}$, 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 tumpah. 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, tape, 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 CO₂ 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

Karyawanisata ke Museum Sangiran, Sragen

BIMA

Tengkorak ini umurnya lebih dari sejuta tahun? Siapa yang menghitung ulang tahunnya?!



?!

**KIMO**

Atom-atomnya sendiri yang menghitung! Karbon-14 di tulang meluruh separuh setiap ± 5.730 tahun. Itu jam atom!

LARAS

Jam yang berdetak tanpa baterai...



karbon-14 • 5.730 th



KAK TIRTA

Tapi setelah ± 50.000 tahun, karbon-14 tinggal kurang dari 0,3%. Untuk fosil sejuta tahun, jam karbon sudah "kehabisan baterai"!

TIK... TOK...



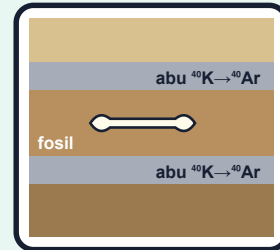
C-14 < 0,3%

**LARAS**

Jadi untuk Sangiran dipakai jam lain yang jauh lebih lambat?

KIMO

Betul! Kalium-40 di abu gunung api pelan-pelan berubah menjadi argon-40. Waktu paruhnya 1,25 miliar tahun!

**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_ZX , 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

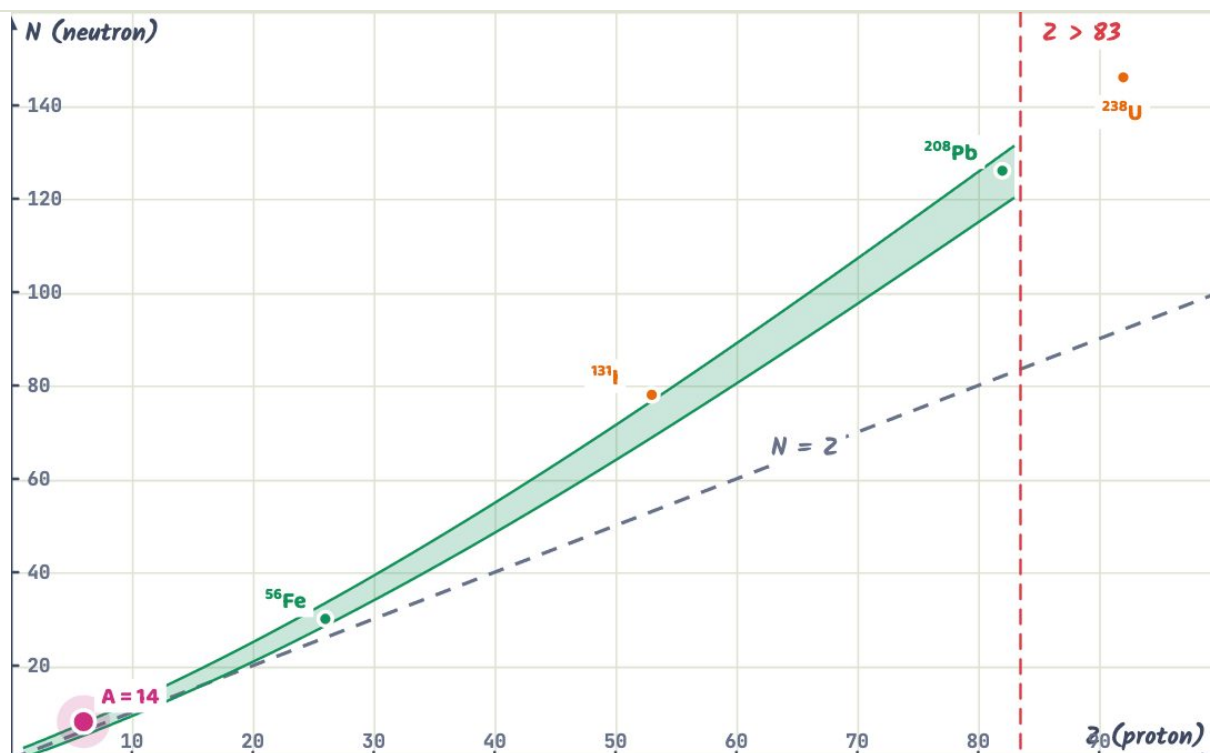
1. Untuk inti ringan ($Z \leq 20$), inti stabil mempunyai $N \approx Z$, jadi **rasio $n/p \approx 1$** . Contoh: $^{12}_6\text{C}$, $^{16}_8\text{O}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$.
2. Makin berat inti, makin banyak neutron "ekstra" yang dibutuhkan untuk mengimbangi tolakan proton. Rasio n/p naik sampai $\pm 1,5$ pada $^{208}_{82}\text{Pb}$ (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	^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{56}Fe , ^{208}Pb
genap	ganjil	± 53	^{13}C , ^{17}O , ^{119}Sn
ganjil	genap	± 48	^{19}F , ^{23}Na , ^{127}I
ganjil	ganjil	hanya 4	^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}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.

$$\frac{n}{p} = \frac{N}{Z}$$

$${}^{14}_6\text{X} : \frac{n}{p} = \frac{8}{6} = 1,33$$



karbon-14: kelebihan 2 neutron → β^- menjadi nitrogen-14

nomor massa A

14

rasio n/p

1,33

pusat pita (N)

6,4

ramalan kasar

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.

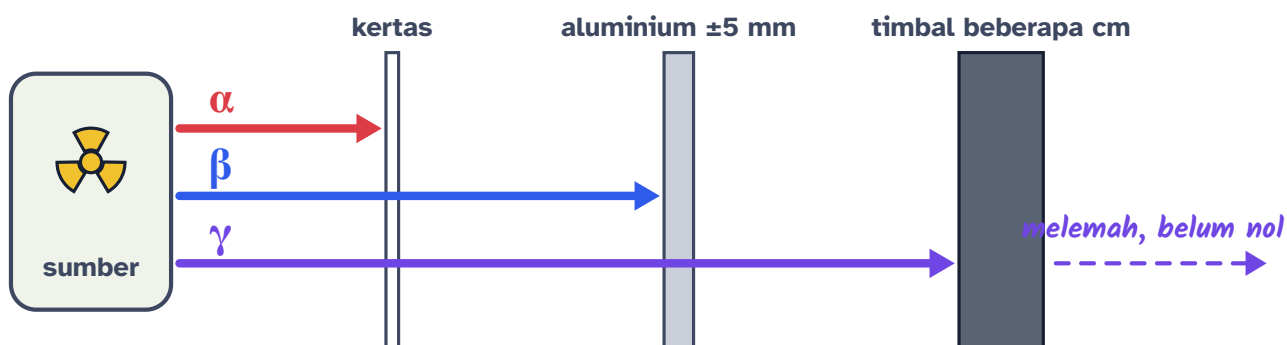
Warnai menurut

Kategori



1
H

Alfa	${}^4_2\alpha$ atau ${}^4_2\text{He}$	inti helium (2 p + 2 n)	+2	± 4	kecil: ± 5 cm di udara, terhenti selembar kertas atau kulit mati	sangat besar
Beta minus	${}^0_{-1}\beta$ atau ${}^0_{-1}\text{e}$	elektron berkecepatan tinggi dari inti	-1	$\pm 0,00055$	sedang: terhenti aluminium beberapa milimeter	sedang
Positron (beta plus)	${}^0_{+1}\beta$ atau ${}^0_{+1}\text{e}$	"kembaran" elektron yang bermuatan positif	+1	$\pm 0,00055$	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	${}^1_0\text{n}$	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 • KEKALKAN PADA REAKSI INTI

Pada setiap persamaan inti:

$$\sum A_{\text{kiri}} = \sum A_{\text{kanan}} \quad \text{dan} \quad \sum Z_{\text{kiri}} = \sum Z_{\text{kanan}}$$

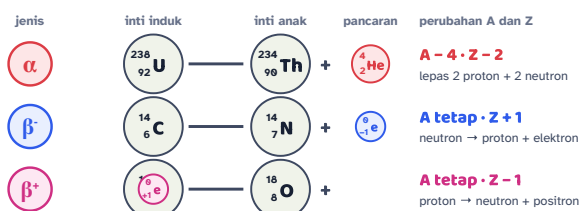
Jumlah nukleon (nomor massa) dan jumlah muatan (nomor atom) tidak berubah. Partikel ditulis dengan notasi yang sama: elektron ${}^0_{-1}\text{e}$, positron ${}^0_{+1}\text{e}$, neutron ${}^1_0\text{n}$, proton ${}^1_1\text{p}$, alfa ${}^4_2\text{He}$.



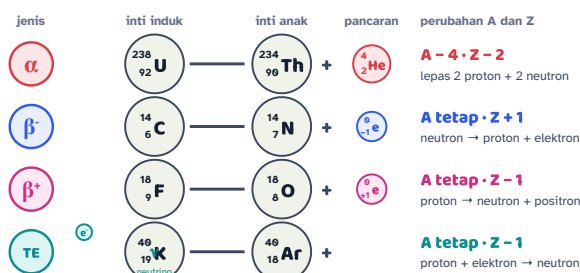
Langkah 1. Alfa: inti yang terlalu berat membuang "paket" 2 proton + 2 neutron. ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$. Cek: $238 = 234 + 4$ dan $92 = 90 + 2$.



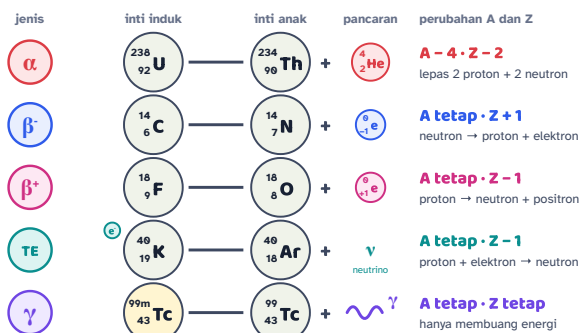
Langkah 2. Beta minus: inti yang kelebihan neutron mengubah satu neutron menjadi proton. Elektronnya dilempar keluar (bersama antineutrino). ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$



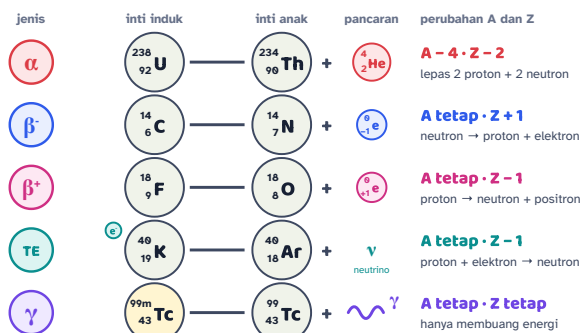
Langkah 3. Positron (β^+): inti yang kekurangan neutron mengubah satu proton menjadi neutron dan melempar positron. ${}^{18}_9\text{F} \rightarrow {}^{18}_8\text{O} + {}^0_{+1}\text{e}$. Fluorin-18 inilah "lampu" pada pemindaian PET di rumah sakit.



Langkah 4. Tangkap elektron (TE): cara lain untuk inti yang kekurangan neutron. Inti menelan satu elektron dari kulit terdalamnya. ${}^{40}_{19}\text{K} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar}$. Inilah jam argon untuk menanggapi 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: ${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$.



Selalu setara: jumlah A kiri = kanan, jumlah Z kiri = kanan

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: ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e}$ (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.

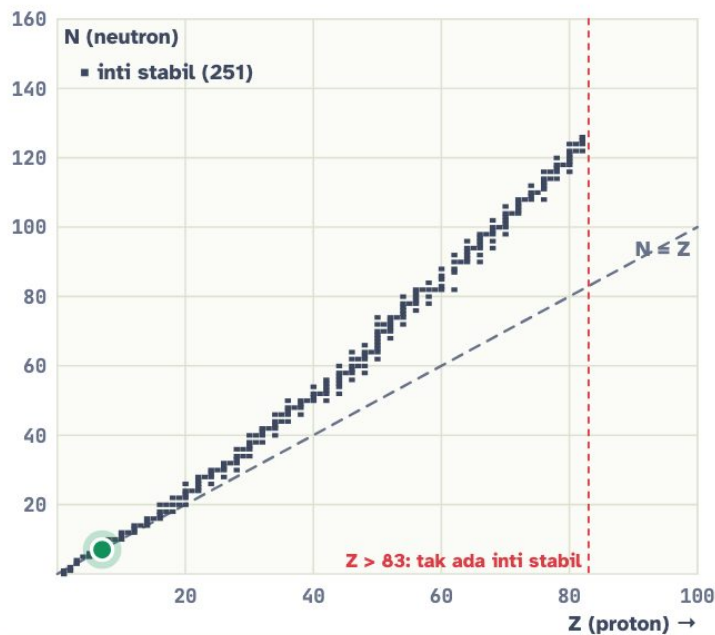
CONTOH Melengkapi persamaan inti

Radium-226 meluruh dengan memancarkan partikel alfa. Tentukan inti hasilnya.

- 1 Tulis kerangkanya: ${}_{88}^{226}\text{Ra} \longrightarrow {}_Z^AX + {}_2^4\text{He}$.
- 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.

${}_{88}^{226}\text{Ra} \longrightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$. **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!

 $^{14}_7\text{N}$

Nitrogen-14

 $Z = 7 \cdot N = 7 \cdot A = 14$ $n/p = 1$

N stabil untuk Z ini: 7-8

STABIL ✓

Akhir rantai peluruhan.

Rantai: 1 langkah • $\alpha \times 0 \cdot \beta^- \times 1 \cdot \beta^+ / \text{TE}$
 $\times 0 \cdot \gamma \times 0$  β^-

Inti

N-14

Keadaan

stabil

Tebakanmu

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?

Deret torium dimulai dari ${}^{232}_{90}\text{Th}$ dan berakhir pada ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Berapa partikel α dan β^- yang dipancarkan?

- 1 Hanya α yang mengubah nomor massa. Penurunan $A = 232 - 208 = 24$, jadi jumlah $\alpha = 24 \div 4 = 6$.
- 2 Enam α menurunkan Z sebanyak $6 \times 2 = 12$, dari 90 menjadi 78.
- 3 Padahal Z akhir 82. Kekurangan $82 - 78 = 4$ harus ditutup oleh β^- (masing-masing $Z + 1$), jadi jumlah $\beta^- = 4$.

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: ${}^{238}\text{U}$ punya $n/p = 146/92 = 1,587$, sedangkan ${}^{234}\text{Th}$ 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 $\alpha, \beta^-, \beta^-, \alpha, \dots$ 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: ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} + \bar{\nu}$.

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 $(\frac{1}{2})^n$ bagian:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Waktu paruh setiap radioisotop **tetap**: tidak dipengaruhi suhu, tekanan, maupun bentuk senyawanya.

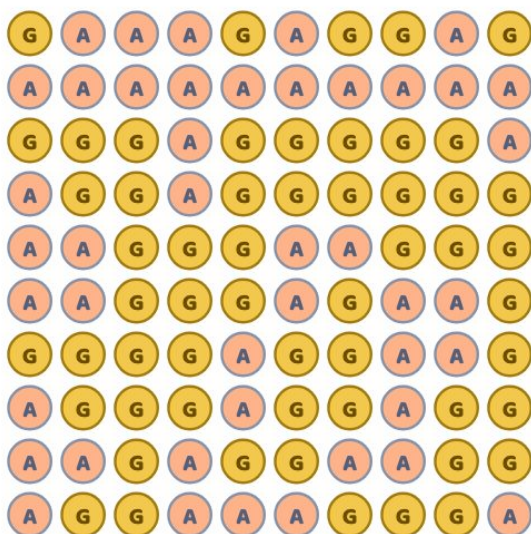
LAB MINI

Peluruhan Koin & Dadu: ribuan inti sekaligus

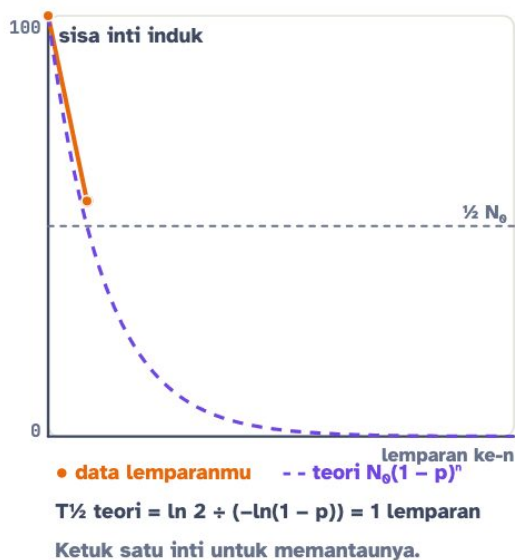
LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-37

Lemparan ke-1

koin: meluruh bila muncul ANGKA



● inti induk (belum meluruh) ● inti anak (sudah meluruh)



Lemparan ke-
1

Inti induk tersisa
56

Meluruh di lemparan ini
44

$T_{1/2}$ terukur
belum separuh

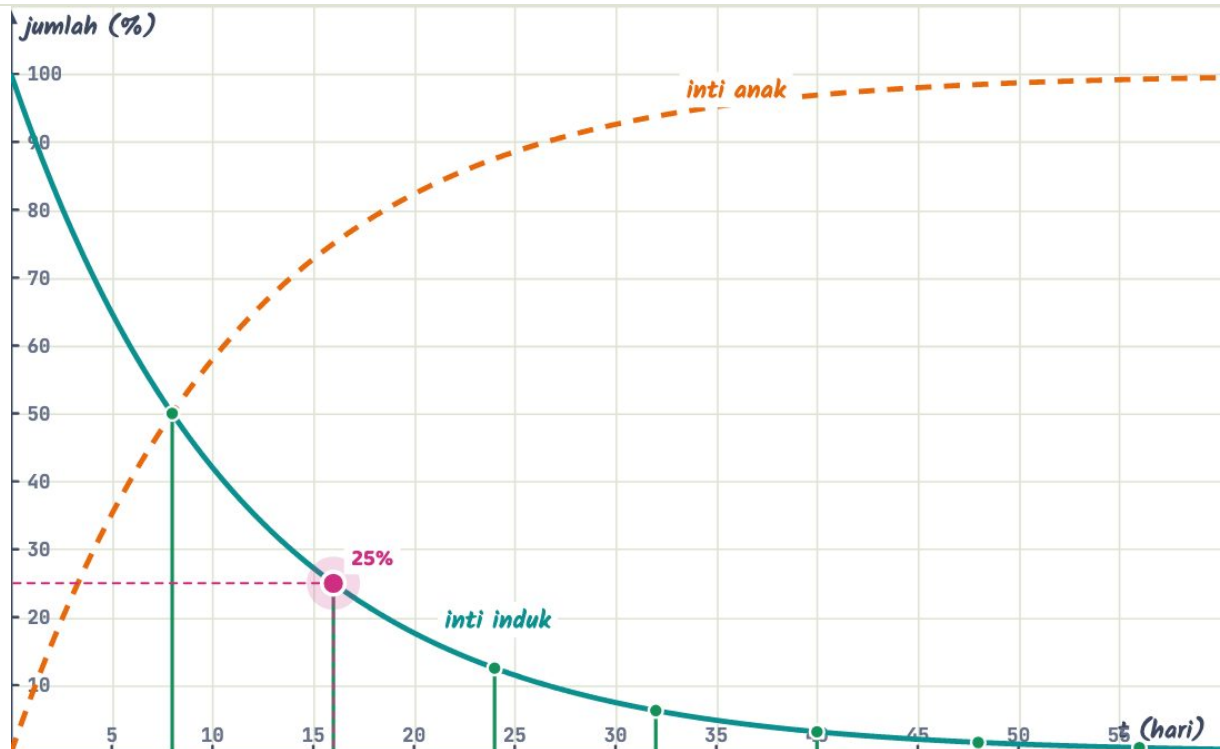
$T_{1/2}$ teori
1 lemparan

Inti pilihanmu
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"?

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = 8 \text{ hari}, t = 16 \text{ hari} : \frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 25\%$$



≈ iodin-131 (8,0 hari)

2 waktu paruh: tinggal ¼, bukan nol!

sisa inti induk
25 %

banyaknya waktu paruh
2

tetapan peluruhan λ
0,0866 per hari

Seret titik magenta di sepanjang kurva. Batang hijau menandai setiap kelipatan waktu paruh: tingginya selalu separuh batang sebelumnya. Lalu geser $T_{1/2}$: kurva memanjang atau memendek, tetapi bentuknya tetap sama. Kurva oranye adalah inti anak: jumlah keduanya selalu 100%.

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/T_{1/2}}$$

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!

$\approx$ iodin-131

Setelah **16** hari (2 kali waktu paruh) tersisa **25** mg, yaitu **25%** dari semula. Yang sudah meluruh: **75** mg.

Cek satuan: mg $\times$ (tanpa satuan) = mg; t dan $T_{1/2}$ 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 $\frac{1}{2}$, setelah dua waktu paruh tersisa $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$, setelah tiga waktu paruh $\frac{1}{8}$. 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: $80 \rightarrow 40 \rightarrow 20 \rightarrow 10$ 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: $t \div T_{1/2}$. 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 $\pm 0,1\%$. 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:



Karbon-14 bergabung dengan oksigen menjadi 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

$$t = T_{1/2} \times \frac{\ln(100\% / p)}{\ln 2}$$

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 $\times$ (tanpa satuan) = tahun ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-INTI-UMUR-C14](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-inti-umur-c14)

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 Logaritman: $n = \frac{\ln(1/0,35)}{\ln 2} = \frac{1,050}{0,693} = 1,515$.

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 $\rightarrow$ anak	Waktu paruh	Jangkauan umur	Bahan yang diukur
tritium	${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$	12,3 tahun	sampai ± 100 tahun	air tanah, anggur, es
radiokarbon	${}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N}$	5.730 tahun	± 100 sampai ± 50.000 tahun	sisia organik: arang, kayu, tulang, kain, biji
deret uranium	${}^{234}\text{U} \rightarrow {}^{230}\text{Th}$	245.500 tahun	sampai ± 500.000 tahun	kerak kapur gua, karang, gigi
kalium–argon (dan argon–argon)	${}^{40}\text{K} \rightarrow {}^{40}\text{Ar}$	1,25 miliar tahun	puluhan ribu sampai miliaran tahun	batuan dan abu gunung api
uranium–timbal	${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb}$	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.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \implies N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

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!

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \frac{m}{M} \times N_A$$

Makin banyak inti dan makin pendek waktu paruhnya, makin sering terdengar 'klik' peluruhan setiap detik.

m Massa radioisotop g

M Massa molar ($\approx$ nomor massa) g/mol

$T_{1/2}$ Waktu paruh tahun

A Aktivitas Bq

AKTIVITAS
 $3,658 \times 10^{10}$
 Bq

≈ 1 curie: aktivitas 1 gram radium-226

Setiap detik terjadi $3,658 \times 10^{10}$ peluruhan, setara **0,989 Ci** (curie).

Cek satuan: $(1/s) \times (g \div g/mol) \times (1/mol) = 1/s = \text{Bq}$ ✓

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

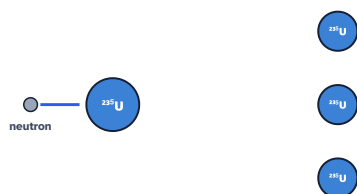
Pada akhir 1938, kimiawan **Otto Hahn** dan **Fritz Strassmann** di Berlin menembaki uranium dengan neutron. Mereka mengharapkan unsur yang lebih berat, tetapi analisis kimia yang teliti justru menemukan **barium**, unsur yang massanya kira-kira separuh uranium. Fisikawan **Lise Meitner**, yang saat 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:



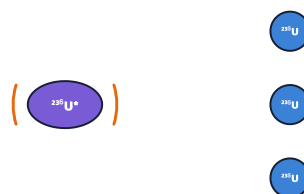
Cek neraca: nomor massa $1 + 235 = 141 + 92 + 3(1) = 236$ ✓, nomor atom $92 = 56 + 36$ ✓. Neutron-neutron baru dapat membelah inti uranium-235 lain, yang menghasilkan neutron lebih banyak lagi. Inilah **reaksi berantai**.

Generasi 0: satu neutron lambat mendekati ${}^{235}\text{U}$



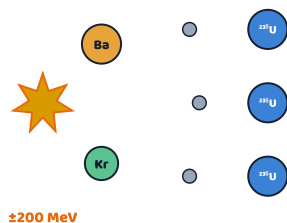
Langkah 1. Sebuah neutron **lambat** mendekati inti uranium-235. Neutron tidak bermuatan, jadi ia tidak ditolak inti.

Inti menyerap neutron $\rightarrow {}^{236}\text{U}^*$ yang bergetar hebat



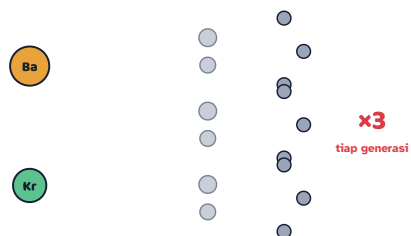
Langkah 2. Inti menyerap neutron dan menjadi ${}^{236}_{92}\text{U}$ yang tereksitasi. Inti bergetar dan memanjang seperti tetes air yang hampir putus.

Terbelah! 2 inti sedang + 3 neutron + ± 200 MeV



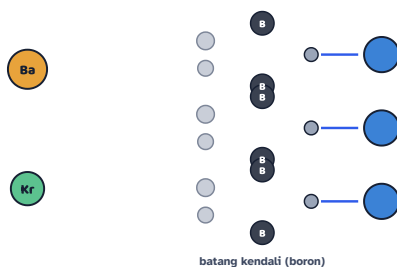
Langkah 3. Inti terbelah menjadi barium-141 dan krypton-92, melepaskan 3 neutron dan ± 200 MeV energi, kira-kira 50 juta kali energi pembakaran satu atom karbon.

Generasi 2: 9 neutron $\rightarrow$ lalu 27, 81, 243... (superkritis)



Langkah 4. Jika setiap fisi memicu 3 fisi baru, jumlah neutron menjadi $1 \rightarrow 3 \rightarrow 9 \rightarrow 27 \rightarrow \dots$ Dalam sepersejuta detik jumlahnya meledak. Keadaan ini disebut **superkritis** ($k > 1$).

Batang kendali menyerap kelebihan neutron: tetap 3 (kritis)



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:

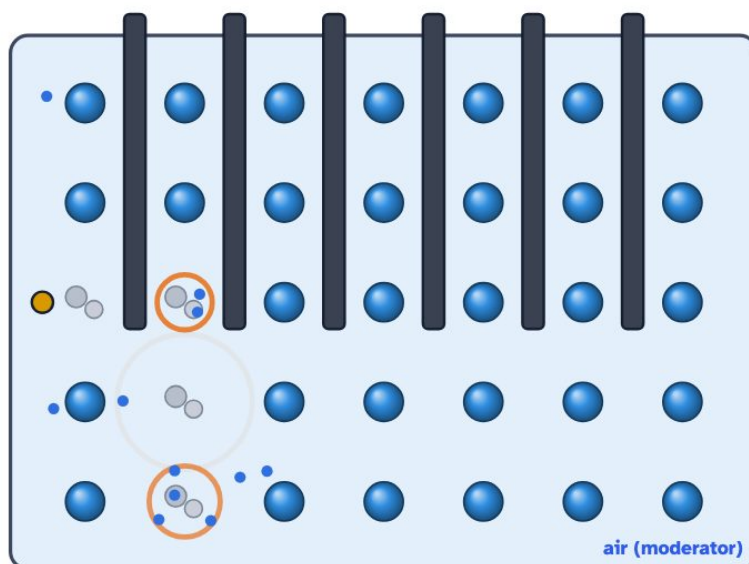
- **Bahan bakar:** uranium yang diperkaya sampai $\pm 3\text{--}5\%$ U-235 (uranium alam hanya 0,72% U-235).
- **Moderator:** air atau grafit yang memperlambat neutron, sebab neutron lambat jauh lebih mudah ditangkap U-235.
- **Batang kendali:** boron, kadmium, atau hafnium yang menyerap neutron. Dimasukkan 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

Teras reaktor (penampang)

batang kendali (B_4C) masuk 55%



• U-235 • hasil fisi • neutron • sumber neutron



SUPERKRITIS

$k > 1$: populasi neutron melonjak

$k \approx 1,23 \cdot \text{fisi: } 6$

Neutron bebas

11

Faktor perbanyakan k

1,23

Fisi total

6

Energi dilepas

$1,92 \times 10^{-10} \text{ J}$

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 membuatnya **kritis** ($k \approx 1$). 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 $^{\circ}\text{C}$, hidrogen terus-menerus diubah menjadi helium. Hasil bersih rangkaiannya:



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 $^{\circ}\text{C}$:



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.

$$E = \Delta m \times 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

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** = **$2,82 \times 10^{-12}$ J**. Untuk 1 mol reaksi: **$1,699 \times 10^9$ 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](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-inti-defek-massa)

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). ($1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$, $N_A = 6,022 \times 10^{23}$)

- 1 Jumlah inti: $n = 1,00/235 = 4,26 \times 10^{-3} \text{ mol}$, jadi $N = 4,26 \times 10^{-3} \times 6,022 \times 10^{23} = 2,56 \times 10^{21}$ inti.
- 2 Energi per fisi: $200 \times 1,602 \times 10^{-13} = 3,20 \times 10^{-11} \text{ J}$.
- 3 Energi total: $2,56 \times 10^{21} \times 3,20 \times 10^{-11} = 8,2 \times 10^{10} \text{ J} = 82 \text{ GJ}$.
- 4 Batu bara yang setara: $8,2 \times 10^{10} \div (30 \times 10^6 \text{ J/kg}) \approx 2.700 \text{ kg}$.

Satu gram U-235, seukuran kacang hijau, setara dengan $\pm 2,7$ 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."

MITOS

"Fusi dan fisi sama-sama memecah atom."

FAKTA

Bahan bakar PLTN hanya diperkaya $\pm 3\text{--}5\%$ 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.

FAKTA

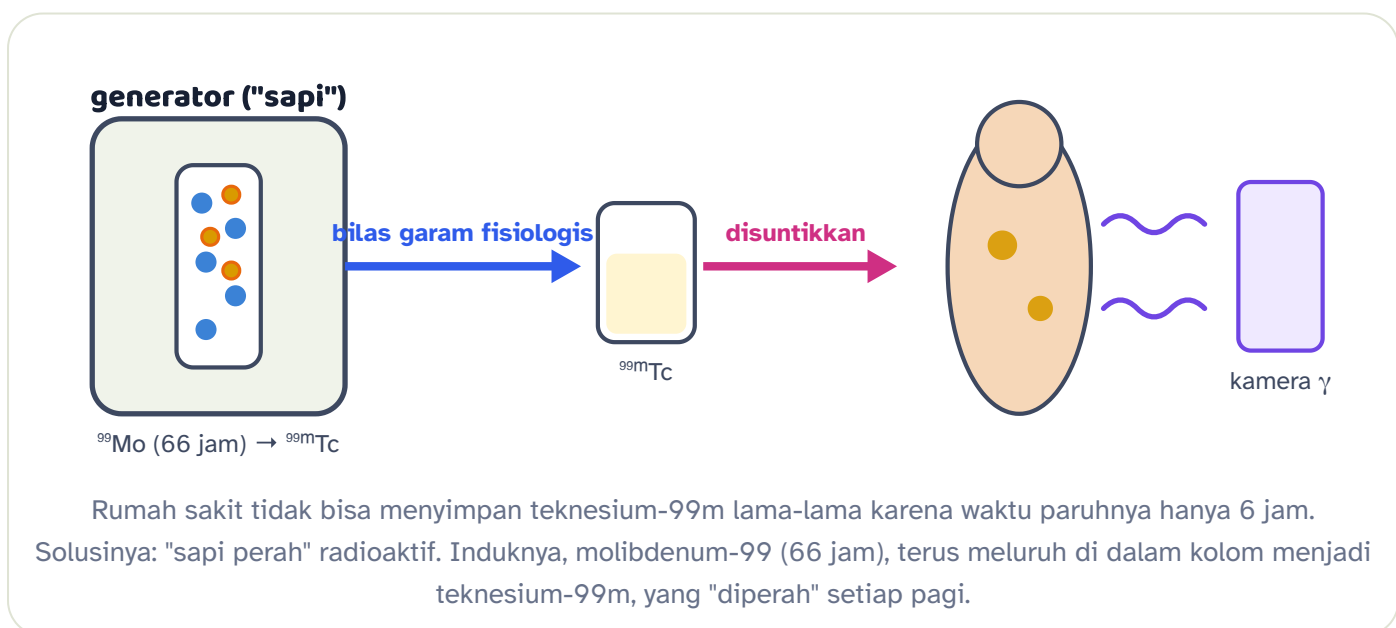
Fisi memecah inti berat (uranium) menjadi dua inti sedang. Fusi justru menyatukan inti ringan (hidrogen) menjadi inti lebih berat. Keduanya melepas energi karena hasilnya lebih "kokoh" daripada pereaksinya.

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





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 menanggapi 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 μ Sv = 0,001 mSv).

Sumber atau keadaan	Dosis efektif (perkiraan)
makan satu buah pisang (kalium-40)	$\pm 0,1 \mu\text{Sv}$
foto rontgen dada	$\pm 0,02\text{--}0,1 \text{ mSv}$
penerbangan Jakarta–Jeddah (± 9 jam)	$\pm 0,03\text{--}0,05 \text{ mSv}$
batas tambahan dosis untuk masyarakat umum dari kegiatan nuklir	1 mSv per tahun
radiasi alam rata-rata dunia	$\pm 2,4 \text{ mSv per tahun}$ (umumnya 1–3 mSv)
CT scan perut	$\pm 8 \text{ mSv}$
batas dosis pekerja radiasi	20 mSv per tahun (rata-rata 5 tahun)
gejala sakit radiasi akut (sekaligus, seluruh tubuh)	di atas $\pm 1.000 \text{ mSv}$ (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.

$$D_2 = D_1 \times \left(\frac{1 \text{ m}}{r} \right)^2$$

Menjauh dua kali lipat dari sumber titik membuat laju dosis tinggal seperempatnya.

D_1 Laju dosis pada jarak 1 m $\mu\text{Sv}/\text{jam}$

r Jarak baru m

D_2 Laju dosis baru $\mu\text{Sv}/\text{jam}$

LAJU DOSIS BARU

10

$\mu\text{Sv}/\text{jam}$

2x lebih jauh $\rightarrow$ $\frac{1}{4}$ dosis

Pada jarak 2 m laju dosis menjadi **10** $\mu\text{Sv}/\text{jam}$, yaitu **25%** dari laju dosis pada 1 m.

Cek satuan: $(\mu\text{Sv}/\text{jam}) \times (\text{m}/\text{m})^2 = \mu\text{Sv}/\text{jam} \checkmark$

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.



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."

MITOS

"Radiasi selalu buatan manusia."

FAKTA

Setelah dua waktu paruh masih tersisa $\frac{1}{4}$, setelah tiga waktu paruh $\frac{1}{8}$. Setiap waktu paruh hanya mengurangi separuh dari yang masih ada.

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 ${}^4\text{He}$ 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 menceraikan-beraikan inti, atau yang dilepas saat inti terbentuk. Dibagi 4 nukleon, energi ikat per nukleonnya $7,07$ MeV.

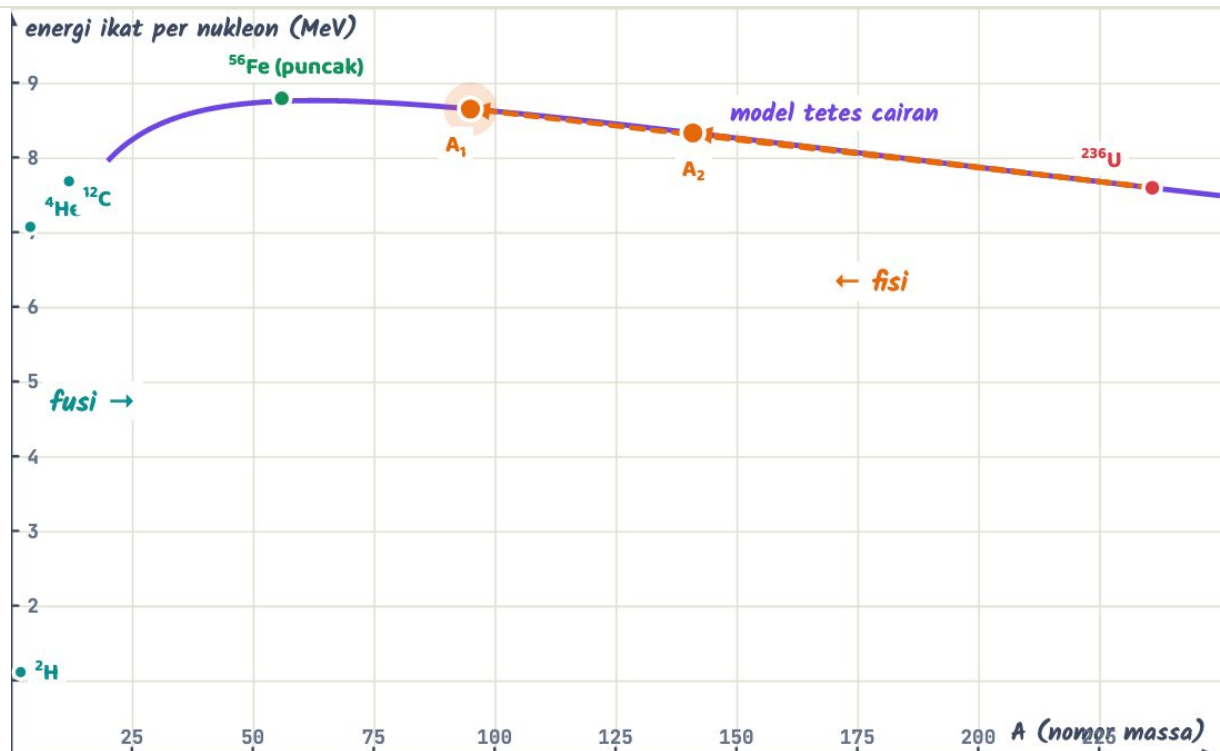
Kalau energi ikat per nukleon digambar terhadap nomor massa, kurvanya naik tajam, memuncak di sekitar **besi-56 dan nikel-62** ($\pm 8,8$ MeV), lalu turun perlahan sampai uranium ($\pm 7,6$ MeV). Inti di puncak paling kokoh. Akibatnya:

- **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.

$$E_{\text{lepas}} = A_1 b_1 + A_2 b_2 - 236 b_U$$

$$A_1 = 95, A_2 = 141 : E_{\text{lepas}} \approx 203,89 \text{ MeV}$$



mirip pecahan nyata, misalnya Kr-92 + Ba-141: $\pm 200 \text{ MeV}$

pecahan 1 (A_1)

95

pecahan 2 (A_2)

141

energi dilepas

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 ${}^2\text{H}$, ${}^4\text{He}$, dan ${}^{12}\text{C}$ diambil dari data nyata.

 **Cek Cepat**

Inti ${}^{40}_{19}\text{K}$ yang menangkap sebuah elektron dari kulit K berubah menjadi ...

${}^{40}_{20}\text{Ca}$

${}^{40}_{18}\text{Ar}$

${}^{36}_{17}\text{Cl}$

${}^{41}_{19}\text{K}$

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 ditanggal 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, pensel 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

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Sisa zat radioaktif setelah waktu t . Setiap lewat satu waktu paruh, yang tersisa tinggal separuh dari jumlah sebelumnya.

$$t = T_{1/2} \times \frac{\ln(100\% / p)}{\ln 2}$$

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: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Di Bab 38 kita menyelidiki kimia udara, air, dan cara membuat kimia lebih "hijau".

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 , $\text{PM}_{2.5}$, 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
- 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

Pagi berkabut asap, halaman sekolah

BIMA

Wah, mataharianya bulat merah kayak kuning telur asin! Keren!

LARAS

Keren apanya, Bim. Itu tanda udaranya penuh asap!

LARAS

Aplikasi ISPU: 185, kategori **Tidak Sehat**. Pencemar utamanya $\text{PM}_{2.5}$.

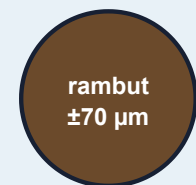
BIMA

PM? Pagi-Malam?



KAK TIRTA

PM_{2,5} artinya partikel berdiameter 2,5 mikrometer atau kurang, ± 30 kali lebih tipis daripada rambutmu. Ia bisa menyusup sampai ke ujung paru-paru!

**PM_{2,5}***(skala sama!)***KIMO**

Asap ini datang dari gambut yang terbakar ratusan kilometer jauhnya. Udara tidak kenal batas provinsi!

BIMA

Jadi udara itu satu gelas kimia raksasa milik bersama...

**UHUK!****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 CO₂ 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 CO₂ dan CH₄ 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 $\pm 0,5$ liter campuran gas. Udara kering terdiri atas nitrogen N₂ $\pm 78\%$, oksigen O₂ $\pm 21\%$, argon $\pm 0,93\%$, dan karbon dioksida $\pm 0,04\%$ (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**

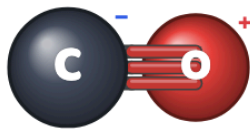
Polutan udara adalah zat di udara yang kadarnya cukup tinggi untuk mengganggu kesehatan makhluk hidup atau merusak benda. **Polutan primer** langsung keluar dari sumbernya (CO, SO₂, NO, jelaga). **Polutan sekunder** terbentuk di udara dari reaksi polutan primer, misalnya ozon permukaan dan asam sulfat 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 → 2 NO	iritasi saluran napas, hujan asam (HNO ₃), pembentuk ozon permukaan
SO₂ (belerang dioksida)	batu bara dan minyak bersulfur, peleburan bijih logam, gunung api	sesak napas, hujan asam (H ₂ SO 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
O₃ 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 NO₂ dari knalpot: NO₂ $\xrightarrow{\text{cahaya}}$ NO + O. Atom O yang sangat reaktif langsung bergabung dengan O₂: O + O₂ → O₃. 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 O₂.

Putar setiap molekul. CO hanya dua atom, tetapi sangat berbahaya karena "merebut" tempat O₂ di hemoglobin. Ketuk tiga atom SO₂, NO₂, dan O₃ 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: PM₁₀, PM_{2,5}, CO, NO₂, SO₂, O₃, 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

Alat pemantau gas sering memberi kadar dalam **ppm volume** (mililiter gas per meter kubik udara), sedangkan baku mutu memakai $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Konversinya memakai konsep mol dan volume molar gas (24,45 L/mol pada 25 °C dan 1 atm):

RUMUS HIDUP Dari ppm ke $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

KADAR MASSA

130,9

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

 ini SO₂

0,05 ppm gas bermassa molar **64** g/mol = **130,9** μg di setiap m^3 udara (25 °C, 1 atm), atau **0,131** mg/m^3 .

Cek satuan: $(\text{mL}/\text{m}^3) \div (1000 \text{ mL}/\text{L}) \div (24,45 \text{ L}/\text{mol}) \times (\text{g}/\text{mol}) \times (10^6 \mu\text{g}/\text{g}) = \mu\text{g}/\text{m}^3$ ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-UDARA-PPM-UGM3](https://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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (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: $3,68 \times 10^{-4} \times 28 = 0,0103 \text{ g} = 10.300 \mu\text{g}$.

Kadar CO $\pm 10.300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\pm 10,3 \text{ mg}/\text{m}^3$). 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 $\text{PM}_{2,5}$ rata-rata 24 jam, batas ISPU 100 adalah $55,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan batas ISPU 200 adalah $150,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kadar $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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.

$\pm 5,6$, sedikit asam.

± 8 , sedikit basa karena membawa debu kapur.

± 2 , sangat asam karena tersambar petir.

Jawabannya: $\pm 5,6$. Air hujan melarutkan CO_2 dari udara dan membentuk asam karbonat yang lemah: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$. Jadi hujan *alami* pun sedikit asam. Hujan baru disebut hujan asam bila pH-nya di bawah 5,6.



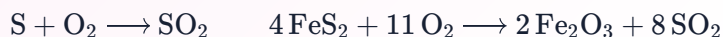
DEFINISI • HUJAN ASAM

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 :



Di udara, SO_2 dioksidasi (dibantu debu, sinar matahari, dan radikal) lalu larut:

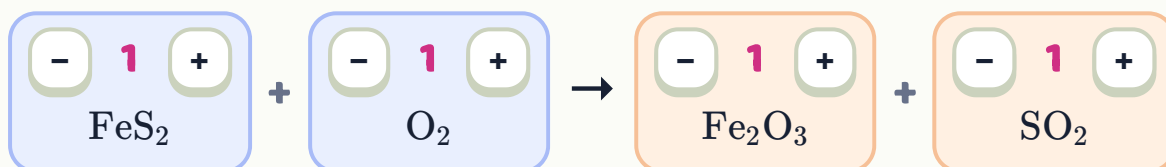


Jalur nitrogen. Di ruang bakar mesin yang sangat panas, nitrogen dan oksigen udara bereaksi. NO lalu teroksidasi menjadi NO_2 yang larut menjadi asam nitrat:



PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi-reaksi hujan asam



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 $\text{NO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$, setarakan atom N dulu, lalu H, terakhir O.

Apa akibatnya? Asam kuat melarutkan batu kapur dan marmer (keduanya CaCO_3):

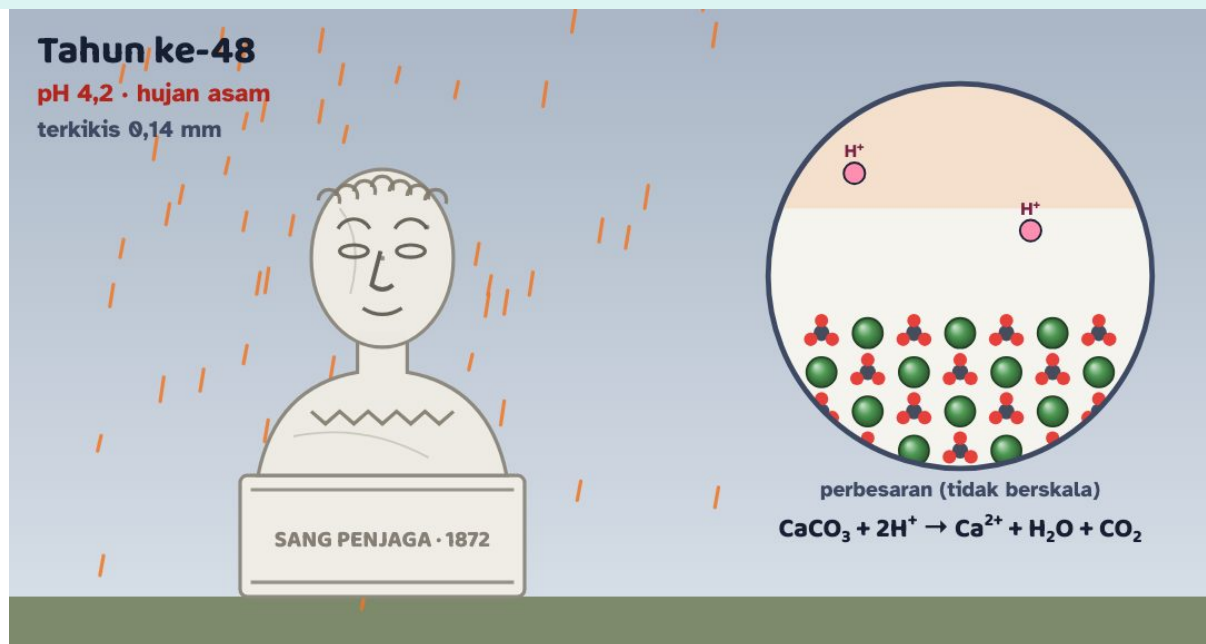
$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Ukiran halus memudar dan permukaan patung menjadi kasar. Di danau, ikan dan telur katak sulit bertahan di bawah pH ± 5 . Di tanah hutan, asam mencuci ion hara Ca^{2+} dan Mg^{2+} serta melepaskan ion Al^{3+} 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

Tahun ke-48

pH 4,2 • hujan asam
terkikis 0,14 mm



[H⁺] air hujan

$6,31 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$

CaCO₃ larut

7,89 g/m² per tahun

Laju pengikisan

2,92 μm/tahun

Waktu

48 tahun

Total terkikis

0,14 mm

Atur pH hujan dan curah hujan, lalu tekan ► untuk memutar waktu sampai 300 tahun. Lingkaran perbesaran memperlihatkan ion H⁺ yang melepas Ca²⁺ dan CO₂ dari kisi CaCO₃. Pada pH berapa ukiran halus di alas patung hilang dalam satu abad? Model ini menganggap semua H⁺ bereaksi; endapan kering SO₂ 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 SO₂ berasal dari pabrik. Gunung api seperti Ijen di Jawa Timur terus mengembuskan SO₂ dan H₂S, 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 $\pm 5,6$? HUKUM HENRY BERTEMU KA

Kelarutan CO_2 sebanding dengan tekanan parsialnya (hukum Henry): $[\text{CO}_2(\text{aq})] = K_H \cdot p_{\text{CO}_2} = 3,4 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1} \text{ atm}^{-1} \times 4,2 \times 10^{-4} \text{ atm} \approx 1,4 \times 10^{-5} \text{ M}$.

Dengan $K_{a1} \approx 4,5 \times 10^{-7}$ dan mengabaikan ionisasi kedua: $[\text{H}^+] = \sqrt{K_{a1}[\text{CO}_2]} = \sqrt{6,3 \times 10^{-12}} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ M}$, sehingga $\text{pH} \approx 5,6$. 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 menyemburkan bubuk kapur ke gas buang: $2 \text{CaCO}_3 + 2 \text{SO}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{CaSO}_4 + 2 \text{CO}_2$. 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 = $1,2\% \times 1.000 \text{ kg} = 12 \text{ kg} \rightarrow \text{mol S} = 12.000 \text{ g} / 32 = 375 \text{ mol}$.
- 2 $\text{S} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SO}_2$: 1 mol S $\rightarrow$ 1 mol SO_2 . Massa $\text{SO}_2 = 375 \times 64 = 24.000 \text{ g} = 24 \text{ kg}$.
- 3 Pada scrubber, perbandingan $\text{CaCO}_3 : \text{SO}_2 = 2 : 2 = 1 : 1$, jadi butuh 375 mol $\text{CaCO}_3 = 375 \times 100 \text{ g} = 37,5 \text{ kg}$.

(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 $+15^{\circ}\text{C}$. 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 ($\text{GWP CO}_2 = 1$). Emisi gas lain dinyatakan dalam **CO_2 -ekuivalen** (CO_2e) = massa gas $\times$ GWP.

Gas	Kadar pra-industri	Kadar kini ($\pm$)	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)	$\pm 0,72$ ppm	$\pm 1,9$ ppm	$\pm 28\text{--}30$	sawah tergenang, sampah di TPA, ternak, kebocoran gas
N_2O	$\pm 0,27$ ppm	$\pm 0,34$ ppm	± 270	pupuk nitrogen berlebih di lahan pertanian
CFC-12, CCl_2F_2	0	$\pm 0,0005$ 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 CO₂

Mr ≈ 44,01

[PubChem ↗](#)

Linear (180°), nonpolar walau ikatannya polar. Keluar dari napas kita dan diserap tumbuhan.

Bandingkan CO₂, CH₄, N₂O, dan H₂O dengan N₂ dan O₂. 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

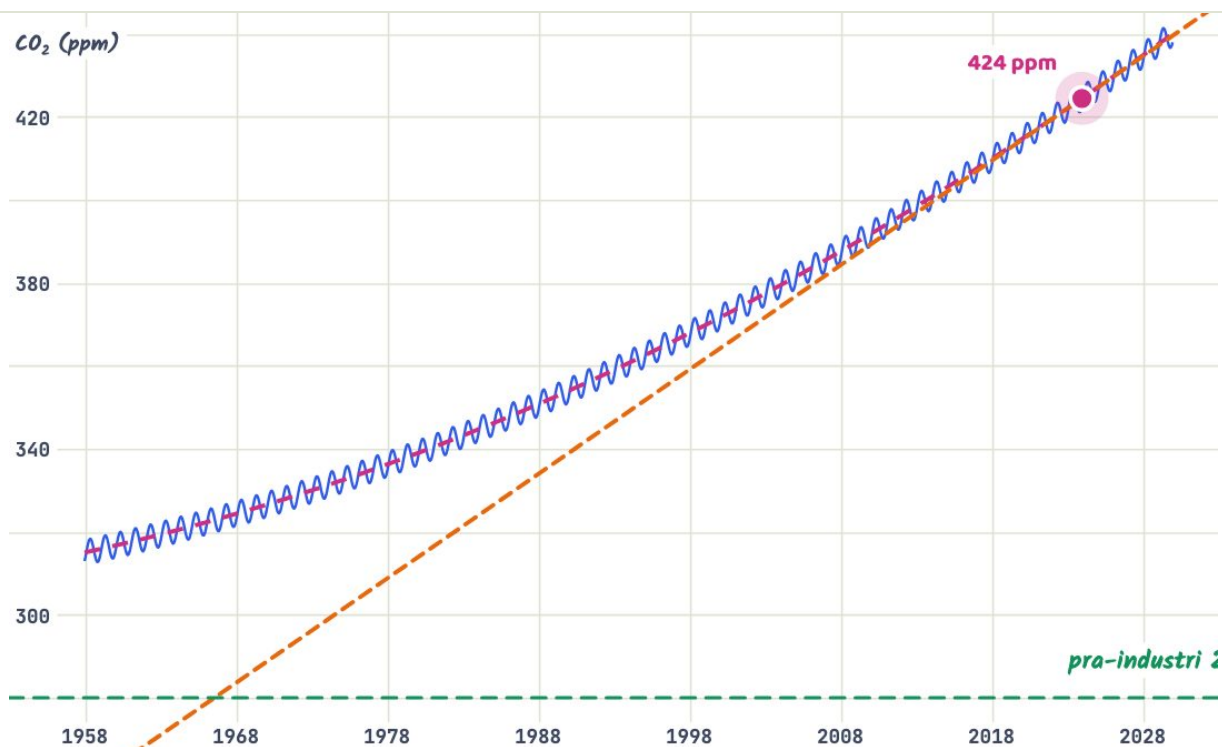
GETARAN YANG "AKTIF IR"

Sebuah molekul menyerap foton IR bila getarannya **mengubah momen dipol**. CO₂ linear punya empat mode getaran: regangan simetris (dipol tetap nol, tidak aktif IR), regangan asimetris ($\pm 2.349 \text{ cm}^{-1}$, $4,3 \text{ }\mu\text{m}$), dan dua tekukan setara ($\pm 667 \text{ cm}^{-1}$, $15 \text{ }\mu\text{m}$). Bumi memancarkan IR paling kuat di sekitar $10 \text{ }\mu\text{m}$, dan pita tekukan $15 \text{ }\mu\text{m}$ milik CO₂ jatuh tepat di tepi "jendela" pancaran itu. Pengetahuan yang sama dipakai di spektroskopi IR (Bab 39).

Bagaimana kita tahu CO₂ 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.

$$C \approx 315 + 0,8t + 0,013t^2 + A \sin 2\pi(t - 0,12)$$

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
2024

CO₂ rata-rata tahunan
424 ppm

laju kenaikan (garis singgung)
2,52 ppm/tahun

di atas pra-industri
52 %

C = kadar CO₂ (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 CO₂. 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 ($\pm 0,74$ kg, $\pm 85\%$ karbon) menghasilkan $\pm 2,3$ kg CO_2 ; satu kilogram LPG (campuran propana dan butana) menghasilkan $\pm 3,0$ kg CO_2 .

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{bb}} \times w_{\text{C}} \times \frac{44}{12}$$

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 kgCO₂ YANG DIHASILKAN

2,29

kg

1 liter bensin $\approx$ 2,3 kg CO₂CO₂ yang keluar lebih dari 3 kali massa bahan bakarnya!

0,74 kg bahan bakar berkadar karbon 84,5 % $\rightarrow$ 2,29 kg CO₂, kira-kira 1,25 m³ gas pada suhu kamar.

Cek satuan: kg $\times$ (tanpa satuan) $\times$ (g CO₂ / g C) = kg CO₂ ✓

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 CO₂ yang dilepaskan dalam seminggu dan dalam setahun (52 minggu)? Pakai 2,3 kg CO₂ per liter.

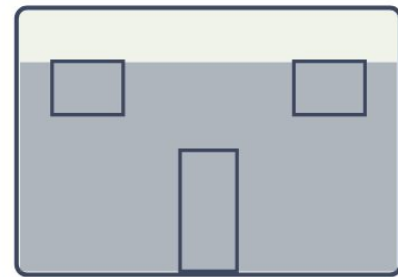
- 1 Seminggu: 6 L $\times$ 2,3 kg/L = 13,8 kg CO₂.
- 2 Setahun: 13,8 kg $\times$ 52 = 717,6 kg CO₂.
- 3 Pada suhu kamar, 1 kg CO₂ bervolume $\pm$ 0,55 m³, jadi 717,6 kg $\approx$ 390 m³ gas.

$\pm$ 13,8 kg per minggu, $\pm$ 0,72 ton per tahun: gas sebanyak itu cukup untuk memenuhi lebih dari dua ruang kelas!

Jejak karbon keluargaku per bulan (kg CO₂e)

Total ≈ 248 kg CO₂e per bulan ≈ 2,98 ton per tahun

Pohon dewasa yang dibutuhkan untuk menyerapnya dalam setahun: ±149

Volume CO₂ sebulan

135 m³ gas CO₂
 ≈ 80% isi satu ruang kelas
 (kelas 8 m × 7 m × 3 m = 168 m³)

Total per bulan

248 kg CO₂e

Total per tahun

2,98 ton CO₂e

Per orang per tahun

0,74 ton

Pohon penyerap (±20 kg/tahun)

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 CO₂e/kg (perkiraan kasar).

ADU CEPAT

Bensin → CO₂ADU 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

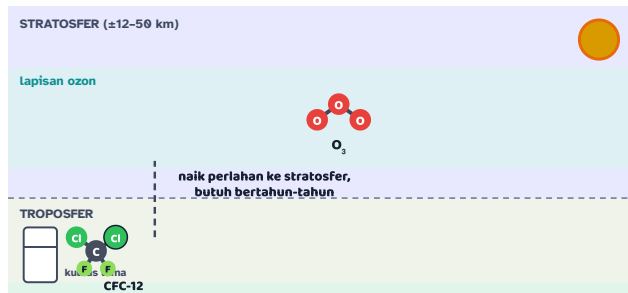
Ozon, O₃, punya dua wajah. Di dekat hidung kita ia polutan yang memedihkan mata. Tetapi 15–35 km di atas kepala, ozon membentuk perisai yang menyerap sebagian besar sinar **UV-B** dan hampir semua **UV-C** dari matahari. Tanpa perisai itu, kanker kulit, katarak, dan kerusakan tanaman akan jauh lebih banyak.

Lapisan ozon terus dibuat dan diurai oleh sinar UV dalam **siklus Chapman**:

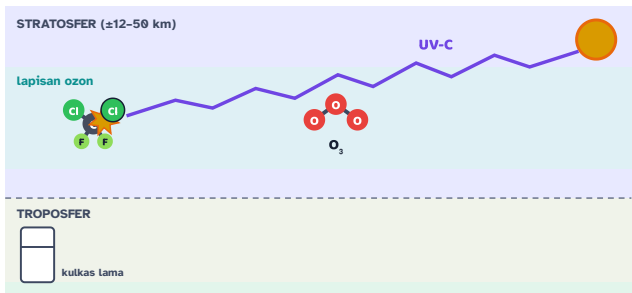


Ozonnya sebenarnya sangat sedikit. Bila semua ozon di atas kepalamu dikumpulkan pada 0 °C dan 1 atm, tebalnya hanya ±3 mm, setebal dua keping koin. Ketebalan ini diukur dalam **Dobson Unit** (DU): 100 DU = 1 mm, jadi 300 DU = 3 mm. Wilayah dengan ozon di bawah 220 DU disebut **lubang ozon**.

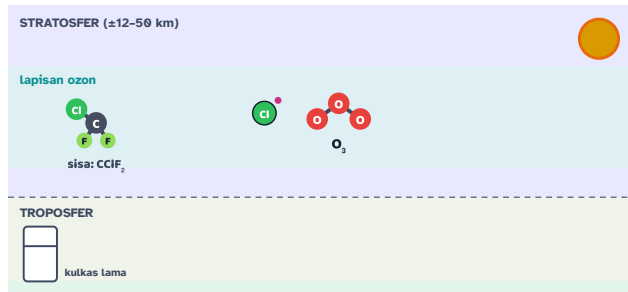
Lalu datanglah **CFC** (klorofluorokarbon), misalnya freon-12, CCl_2F_2 . Ia tidak beracun, tidak mudah terbakar, dan sangat stabil, sehingga dulu menjadi bahan pendingin kulkas dan AC serta pendorong semprotan. Justru karena stabil, CFC tidak terurai di troposfer dan perlahan naik sampai ke stratosfer, tempat sinar UV-C akhirnya memecahnya.



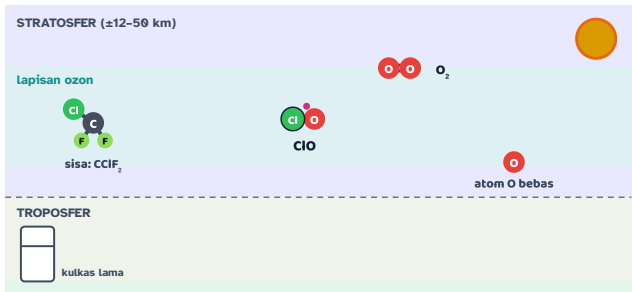
Langkah 1. CFC seperti CCl_2F_2 (freon-12) bocor dari kulkas, AC, dan semprotan lama. Di troposfer ia sangat stabil: tidak larut dalam hujan dan tidak bereaksi, sehingga perlahan naik ke stratosfer.



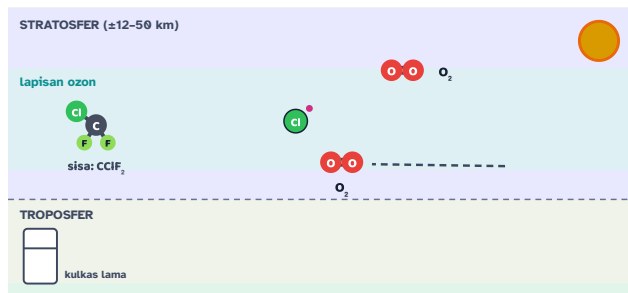
Langkah 2. Di stratosfer, sinar UV-C berenergi tinggi memutus ikatan C-Cl: $\text{CCl}_2\text{F}_2 \xrightarrow{\text{UV}} \text{CClF}_2 + \text{Cl}\cdot$. Lahirilah **radikal klorin** ($\text{Cl}\cdot$) yang punya satu elektron tak berpasangan (titik magenta).



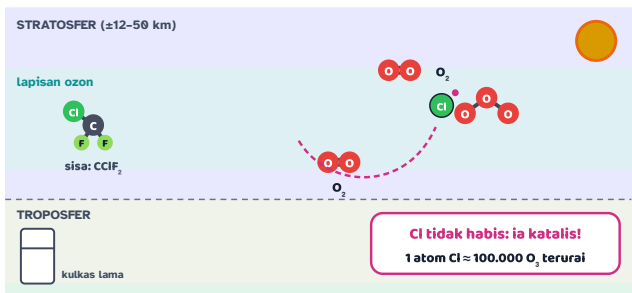
Langkah 3. Radikal Cl sangat reaktif dan langsung mencari pasangan. Di dekatnya ada sebuah molekul ozon, O_3 .



Langkah 4. $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$. 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): $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl}\cdot + \text{O}_2$. Atom Cl lepas lagi, utuh!

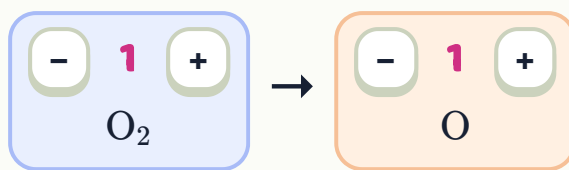


Langkah 6. Cl kembali menyerang ozon berikutnya. Reaksi bersihnya $\text{O}_3 + \text{O} \rightarrow 2\text{O}_2$, dan Cl adalah **katalis**. Satu atom Cl dapat menguraikan sekitar 100.000 molekul ozon sebelum terkunci dalam senyawa "gudang" seperti HCl.

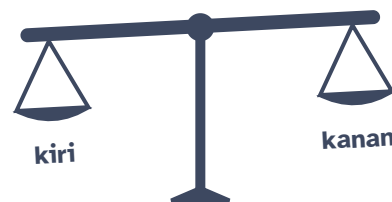


PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi ozon, CFC, dan "gudang" klorin



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 ClONO₂, dan di awan stratosfer kutub keduanya dilepas lagi sebagai Cl₂. Mengapa $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$ tidak ada di sini? Karena atom O muncul di tiga zat, persamaan itu bisa "setara" dengan banyak cara (misalnya $\text{Cl} + 3\text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + 4\text{O}_2$). Koefisien yang benar ditentukan oleh mekanismenya: satu tumbukan antara satu Cl dan satu O₃.



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

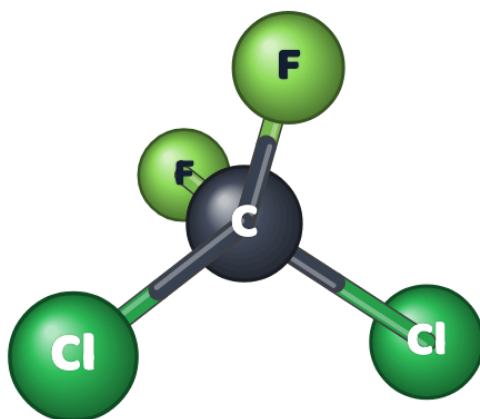
Lubang ozon bukan penyebab utama pemanasan global. Lubang ozon membiarkan lebih banyak **UV** masuk (bahaya bagi kulit dan mata), sedangkan pemanasan global terjadi karena gas rumah kaca menahan **inframerah**. Kaitan keduanya ada pada CFC: selain merusak ozon, CFC juga gas rumah kaca yang sangat kuat.



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 (CCl₂F₂) CCl₂F₂

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.

**MENGAPA LUBANGNYA DI ANTARTIKA?**

Sebagian besar klorin di stratosfer "tidur" dalam senyawa gudang yang tidak merusak, yaitu HCl dan ClONO₂. Di musim dingin kutub selatan (di bawah ±-78 °C), terbentuk **awan stratosfer kutub**. Pada permukaan kristal es awan itu terjadi reaksi heterogen $\text{HCl} + \text{ClONO}_2 \longrightarrow \text{Cl}_2 + \text{HNO}_3$. Gas Cl₂ menumpuk dalam gelap. Begitu matahari muncul di musim semi (September–Oktober), $\text{Cl}_2 \xrightarrow{\text{cahaya}} 2 \text{Cl}$ 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 Ca^{2+} dan 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 CaCO_3 .

Air hujan yang sedikit asam melarutkan batu kapur di daerah karst seperti Gunung Sewu:

$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Saat air itu dididihkan, reaksinya berbalik dan meninggalkan kerak:

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Di dalam air sadah, sabun (garam natrium asam lemak) bereaksi dengan ion kalsium membentuk endapan lengket, sehingga busanya sedikit:



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.

$$c = \frac{\text{ppm}}{1000 \times M_r}$$

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 ($\approx$ mg/L) ppm

M_r Massa molar zat g/mol

c Konsentrasi mol/L

KONSENTRASI

0,001

mol/L

100 ppm $\approx$ 100 mg/L = 1 mmol/L = 0,001 mol/L.

Cek satuan: (mg/L) $\div$ (1000 mg/g) $\div$ (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 $\geq$ BOD. Makin besar keduanya, makin tercemar airnya.

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 BOD₅ 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 BOD₅ = $4,8 \times 30 = 144$ mg/L.

BOD₅ = 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	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3 \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \longrightarrow 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + 3 \text{CaSO}_4 + 6 \text{CO}_2$; ion Al^{3+} menetralkan muatan koloid
2. Flokulasi	diaduk pelan beberapa menit	partikel netral dan $\text{Al}(\text{OH})_3$ 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	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HOCl} + \text{HCl}$; asam hipoklorit membunuh kuman; sisa klor melindungi air di pipa

Koagulasi

tawas + aduk cepat

Flokulasi

aduk pelan

Sedimentasi

diamkan

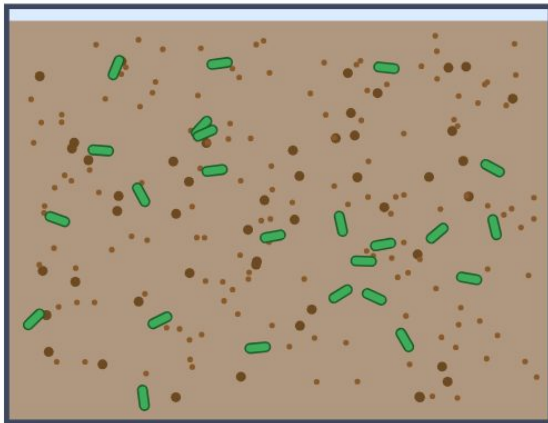
Filtrasi

saring pasir

Desinfeksi

klorin

Bak air • sungai musim hujan



hijau = E. coli (tiap batang mewakili banyak koloni)

Hasil uji air

Kekeruhan (syarat < 3 NTU) 150 NTU

E. coli (syarat 0) 20.000 /100 mL

pH (syarat 6,5–8,5) 7,4

Sisa klor (syarat 0,2–0,5 mg/L) 0 mg/L

Air baku dari sungai musim hujan: keruh, cokelat, dan penuh kuman. Pilih tahap pertama!

✗ Belum layak: keruh, ada E. coli, belum didesinfeksi

Kekeruhan

150 NTU

E. coli

20.000 koloni/100 mL

pH

7,4

Sisa klor

0 mg/L

Urutanmu

(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 ₂ O 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 diinginkan?" Karena massa kekal, massa semua pereaksi sama dengan massa produk utama ditambah produk samping.

RUMUS HIDUP

Ekonomi atom: berapa atom yang 'pulang' ke produk?

$$\% \text{ EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{produk}} + M_{\text{samping}}} \times 100\%$$

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 ($\times$ koefisien) g/mol

M_{samping} Massa molar semua produk samping ($\times$ koefisien) g/mol

$\% \text{ EA}$ Ekonomi atom %

EKONOMI ATOM

51,1
%

 fermentasi tapai: glukosa $\rightarrow$ 2 etanol + 2 CO₂

Dari setiap 100 kg pereaksi, **51,1** kg menjadi produk dan **48,889** kg menjadi produk samping.

Cek satuan: (g/mol) $\div$ (g/mol) $\times$ 100% = % ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-HIJAU-EKONOMI-ATOM

Etanol dapat dibuat dengan dua cara. (1) Fermentasi glukosa (seperti tapai):

$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$. (2) Adisi air pada etena: $C_2H_4 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$. Bandingkan ekonomi atom keduanya. (Ar C = 12, H = 1, O = 16)

- 1 Mr glukosa = 180; Mr etanol = 46; produk yang diinginkan pada cara (1) = $2 \times 46 = 92$.
- 2 Cara (1): % EA = $92/180 \times 100\% = 51,1\%$. 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 $\pm 40\%$: lebih dari separuh massa bahan berakhir sebagai limbah. Proses BHC (1990-an) memakai katalis sehingga cukup tiga tahap, dengan ekonomi atom $\pm 77\%$. 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 $\pm 1-5$, bahan kimia halus $\pm 5-50$, dan farmasi $\pm 25-100$ 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 $31^\circ C$ 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."

MITOS

"Air yang jernih pasti aman diminum."

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.

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."

MITOS

"Efek rumah kaca itu jahat dan harus dihilangkan."

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.

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:



.



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?

CO₂

CH₄

SO₂

N₂

Apa fungsi tawas dalam pengolahan air PDAM?

Menggumpalkan partikel koloid agar mudah mengendap

Membunuh bakteri

Menaikkan pH air

Menghilangkan kesadahan

Berapa ekonomi atom reaksi $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$?

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 ($\pm$ 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 , $\text{PM}_{2.5}$, 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- menjelaskan **kesadahan**, **BOD/COD**, bahaya **merkuri**, dan tahap pengolahan air di **PDAM**
- menerapkan **12 prinsip kimia hijau** dan menghitung **ekonomi atom** suatu reaksi

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (gas di udara). Satu ppm berarti satu mililiter gas di setiap meter kubik udara. Ubah mililiter itu menjadi mol, lalu menjadi mikrogram.

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{bb}} \times w_{\text{C}} \times \frac{44}{12}$$

Jejak karbon pembakaran. Setiap 12 gram karbon dalam bahan bakar berubah menjadi 44 gram karbon dioksida. CO₂ 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 **^1H NMR** (pergeseran kimia, integrasi, aturan $n+1$);
- menggabungkan **IHD** dan semua bukti spektrum untuk **menentukan struktur** molekul.

TIGA BOTOL TANPA LABEL

KOMIK • 4 PANEL

Sore hari, gudang laboratorium sekolah

BIMA

Kak, ada tiga botol tanpa label. Isinya serbuk putih semua. Cicip sedikit, ya?

KAK TIRTA

JANGAN! Aturan nomor satu detektif kimia: tidak mencicipi, tidak menghirup langsung.



LARAS

Kita kumpulkan bukti saja. Uji nyala dulu: serbuk A membuat nyala kuning terang!

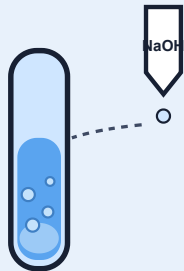
WUSS!



BIMA

Serbuk B yang putih jadi biru waktu dilarutkan! Ditetesi NaOH... ada endapan biru muda!

PLUK!



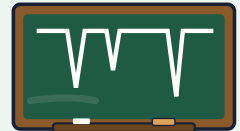
Kimo ikut menyelidiki...

KIMO

Detektif BPOM dan forensik juga "menginterogasi" molekul dengan cahaya inframerah, gelombang radio, bahkan menimbang pecahannya!

BIMA

Molekul bisa diinterogasi? Keren...



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 (NaHCO_3), soda abu (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.

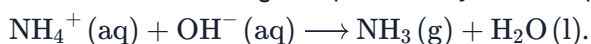
Kation	NaOH(aq) sedikit	NaOH(aq) berlebih	NH ₃ (aq) sedikit	NH ₃ (aq) berlebih
Al Al ³⁺	endapan putih	larut → larutan tak berwarna	endapan putih	tidak larut
Ca ²⁺	endapan putih	tidak larut	tidak ada endapan (atau sangat sedikit)	tidak ada endapan

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:



Amonium tidak mengendap. Ia "menyerahkan" protonnya kepada OH⁻ dan lepas sebagai gas:



TRIK KAK TIRTA • WARNA DULU, LALU "BERLEBIH"

Endapan berwarna langsung menunjuk tersangka: **biru muda** = Cu²⁺, **hijau** = Fe²⁺, **cokelat kemerahan** = Fe³⁺ (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⁻ + 2H ⁺ → CO ₂ + H ₂ O
Cl Cl ⁻	asamkan dengan HNO ₃ encer, lalu tetesi AgNO ₃ (aq)	endapan putih	Ag ⁺ + Cl ⁻ → AgCl ↓

Br Br ⁻	sama seperti di atas	endapan krem	$\text{Ag}^+ + \text{Br}^- \longrightarrow \text{AgBr} \downarrow$
I I ⁻	sama seperti di atas	endapan kuning	$\text{Ag}^+ + \text{I}^- \longrightarrow \text{AgI} \downarrow$
SO ₄ ²⁻	asamkan, lalu tetesi BaCl ₂ atau Ba(NO ₃) ₂ (aq)	endapan putih	$\text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow \text{BaSO}_4 \downarrow$
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 SO₄²⁻). Pengasaman sendiri berguna untuk menghancurkan karbonat, yang juga membentuk endapan putih Ag₂CO₃ atau BaCO₃ 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: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{H}_2\text{O}$
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 ₂ O	serbuk CuSO ₄ anhidrat (putih)	menjadi biru

Larutan garam misterius

Kation? (ion positif)

1. Warna larutan (biru? hijau? kuning?)
2. Uji nyala
3. NaOH sedikit → berlebih
4. NH_3 sedikit → berlebih
5. NaOH + dihangatkan → gas NH_3 ?

Anion? (ion negatif)

1. Asam encer → buih CO_2 ?
2. $\text{HNO}_3 + \text{AgNO}_3 \rightarrow \text{Cl}^- / \text{Br}^- / \text{I}^-$
3. Asam + $\text{BaCl}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$
4. Ulangi dengan uji kedua bila hasilnya meragukan

kation + anion = nama garam ✓

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 nyala

NaOH
sedikit

NaOH
berlebih

NaOH +
panaskan

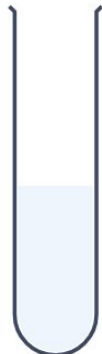
NH_3
sedikit

NH_3
berlebih

HCl +
air kapur

HNO_3 +
 AgNO_3

HCl +
 BaCl_2



Larutan garam misterius
Ketuk botol pereaksi di rak untuk
memulai. Lihat juga warna larutan awal!

Uji dipakai: 0

Catatan Laras • kasus #1

0. Larutan awal: tak berwarna

Uji dipakai
0

Warna larutan awal
tak berwarna

Status kasus
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, K^+ .
- 2 Endapan kuning dengan perak nitrat menunjuk ion iodida: $Ag^+(aq) + I^-(aq) \rightarrow AgI(s)$.
- 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, melewati 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):



Ion kompleks tetraaminatembaga(II) berwarna biru tua pekat. Pada analisis kation klasik (skema 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 AgNO_3 untuk klorida, 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

$$\% \text{ Cl} = \frac{m_{\text{AgCl}} \times \frac{35,5}{143,5}}{m_{\text{sampel}}} \times 100\%$$

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

$\% \text{ Cl}$ Kadar klorida %

KADAR KLORIDA

58,6
%

 garam hampir murni ($\text{NaCl} \geq 95\%$)

Endapan **2,37 g** mengandung **0,586 g** klorin. Bila semua klorida berasal dari NaCl , kadar $\text{NaCl} \approx \mathbf{96,617\%}$.

Cek satuan: $\text{g} \times (\text{g Cl} / \text{g AgCl}) \div \text{g sampel} \times 100\% = \% \checkmark$

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

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 $\text{Mr AgCl} = 108 + 35,5 = 143,5$; $\text{mol AgCl} = 4,75/143,5 = 0,0331 \text{ mol}$.

2 Reaksi $\text{Ag}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl}$ berbanding 1 : 1, jadi $\text{mol Cl}^- = \text{mol NaCl} = 0,0331 \text{ mol}$.

3 Massa $\text{NaCl} = 0,0331 \times 58,5 = 1,94 \text{ g}$.

4 Kadar $= 1,94/2,00 \times 100\% = 96,8\%$.

Kadar $\text{NaCl} \pm 96,8\%$. 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.

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 $\text{Mol NaOH} = 0,100 \times 0,0208 = 2,08 \times 10^{-3} \text{ mol}$. Reaksi $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{NaOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{COONa} + \text{H}_2\text{O}$ berbanding 1 : 1.

2 Dalam 100,0 mL larutan encer ada $4 \times 2,08 \times 10^{-3} = 8,32 \times 10^{-3} \text{ mol}$, yang semuanya berasal dari 10,0 mL cuka.

3 Massa asam asetat $= 8,32 \times 10^{-3} \times 60 = 0,499 \text{ g}$ dalam 10,0 mL cuka, berarti 4,99 g per 100 mL.

Kadarnya $\pm 5,0 \text{ g per 100 mL}$. 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, menyinarikannya 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.

$$A = \epsilon b c$$

Makin kuat daya serap zat, makin tebal kuvet, dan makin pekat larutannya, makin banyak cahaya yang ditelan.

 ϵ Absorptivitas molar $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ b Tebal kuvet cm c Konsentrasi mol/L A

Absorbans

ABSORBANS

0,48

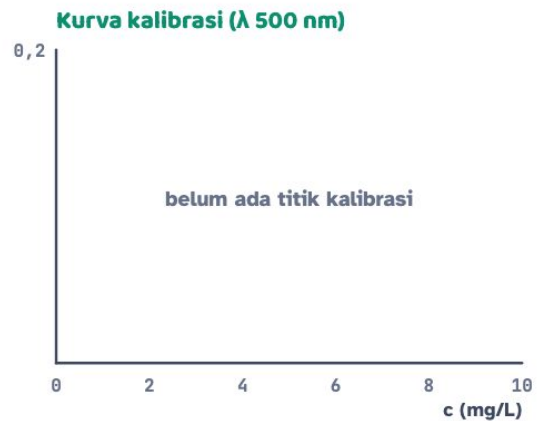
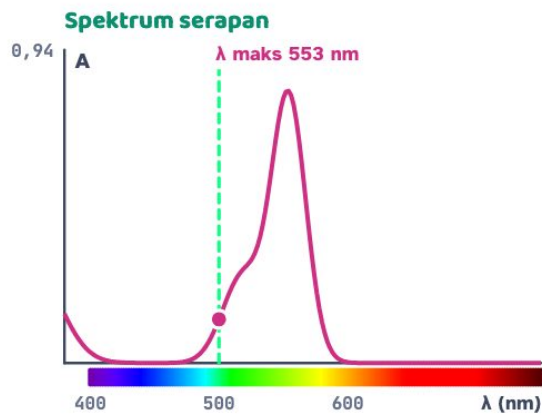
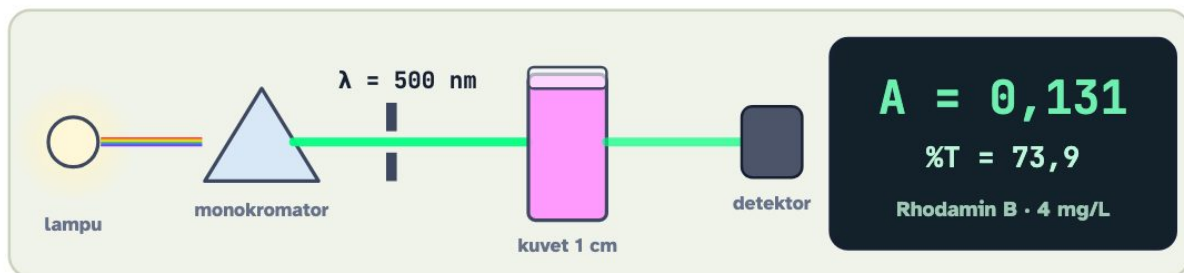
✓ daerah ideal (A 0,1-1)

Cahaya yang lolos: %T = **33,113** %. Dari setiap 1.000 foton, hanya **331,131** yang sampai ke detektor.

Cek satuan: $(\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}) \times \text{cm} \times (\text{mol/L}) = \text{tanpa satuan}$ ✓

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.



Cari dulu λ maks: geser λ sampai absorbans paling besar.

Absorbans A

0,131

Transmitans

73,9 %

 λ maks pewarna

553 nm

Konsentrasi sampel

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 $a = \epsilon/M$.)

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: $I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon bc}$. Ambil logaritmanya, dan muncullah $A = \epsilon bc$ 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 $A = \epsilon_1 bc_1 + \epsilon_2 bc_2$, 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

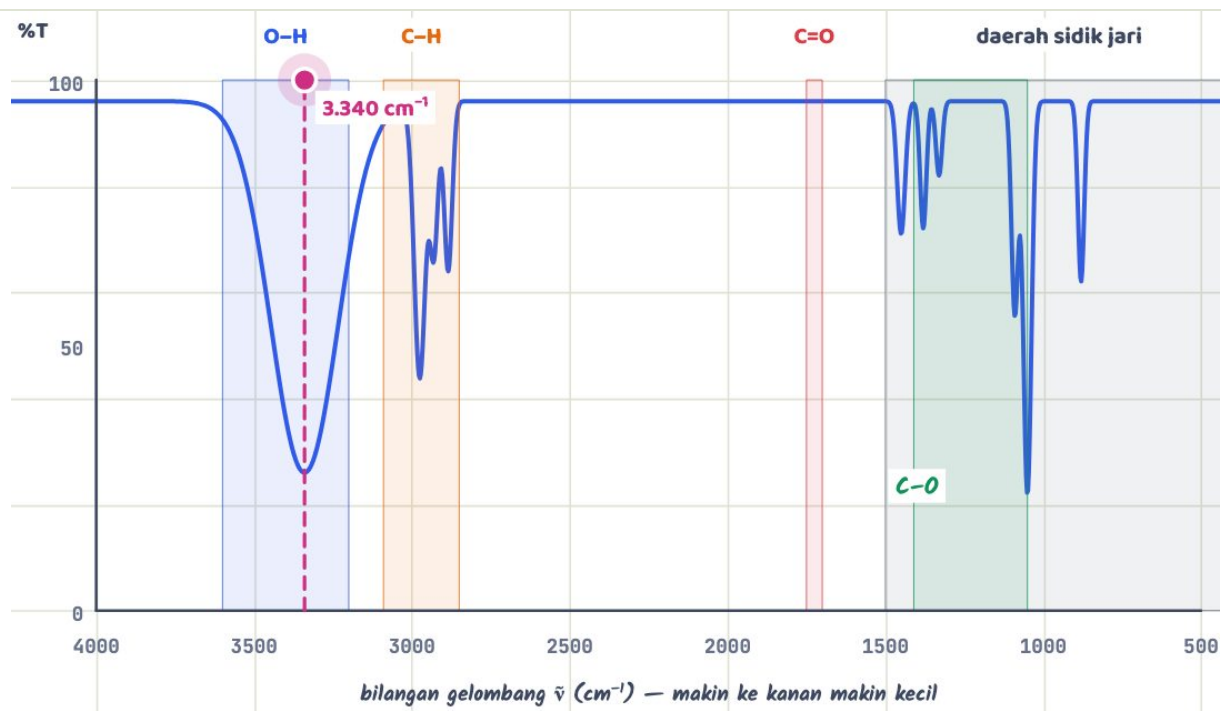
itu, dan alat IR mencatat nada mana saja yang hilang.

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 menekuk 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
$\text{C}\equiv\text{C}$, $\text{C}\equiv\text{N}$	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

$$\%T = f(\tilde{\nu})$$

etanol : $\tilde{\nu}_{\text{kursor}} = 3.340 \text{ cm}^{-1}$



etanol: O-H lebar ± 3340 + C-O ± 1050 , tanpa C=O $\rightarrow$ alkohol

🎯 kursor di jendela O-H alkohol

senyawa

etanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$

$\tilde{\nu}$ 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 pembandingan 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

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}, \quad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

dengan μ massa tereduksi dan c kecepatan cahaya. Contoh: mengganti H dengan deuterium (D) hampir menggandakan massa tereduksi C-H (dari $\pm 0,92$ menjadi $\pm 1,71$ u) tanpa mengubah k . Pita C-H di $\pm 3000\text{ cm}^{-1}$ bergeser ke $3000/\sqrt{1,71/0,92} \approx 2200\text{ cm}^{-1}$. Pergeseran isotop ini dipakai untuk memastikan pita mana milik ikatan mana. Ikatan rangkap tiga $\text{C}\equiv\text{C}$ (k besar) juga menjelaskan mengapa ia muncul jauh di atas $\text{C}=\text{C}$ dan $\text{C}-\text{C}$.

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 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: $\text{M} + \text{e}^- \longrightarrow \text{M}^+ + 2\text{e}^-$. 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:



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

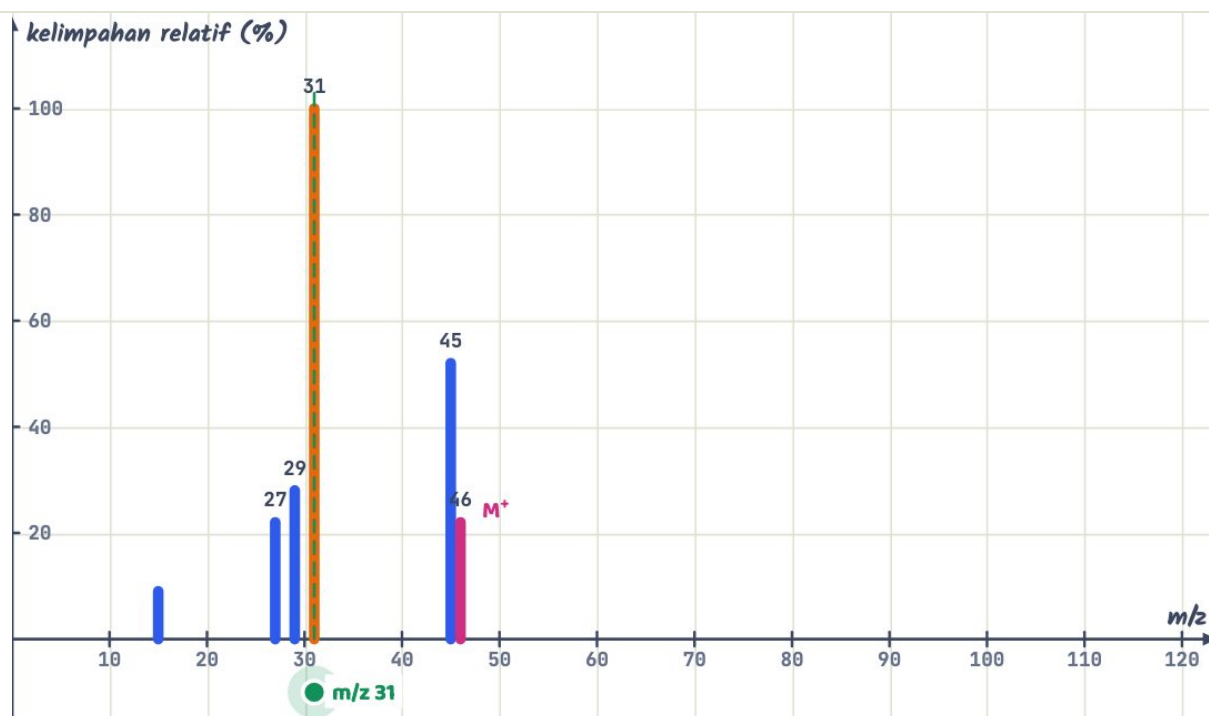
$15 \cdot M - 15$	$\text{CH}_3^+ \cdot \text{lepas CH}_3$	ada gugus metil
$29 \cdot M - 29$	C_2H_5^+ atau CHO^+	gugus etil atau aldehida
31	CH_2OH^+	alkohol primer
43	CH_3CO^+ atau C_3H_7^+	metil keton, ester asetat, atau gugus propil
$45 \cdot M - 45$	$\text{COOH}^+ \cdot \text{lepas COOH}$	asam karboksilat
$M - 17 \cdot M - 18$	lepas $\text{OH} \cdot \text{lepas H}_2\text{O}$	alkohol atau asam
$77 \cdot 91$	$\text{C}_6\text{H}_5^+ \cdot \text{C}_7\text{H}_7^+$	ada cincin benzena

Sidik jari isotop: klorin dan brom

Klorin di alam terdiri atas ^{35}Cl ($\pm 75,8\%$) dan ^{37}Cl ($\pm 24,2\%$), 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 $\approx$ **9 : 6 : 1**, hasil penjabaran $(3 + 1)^2$.

$$\text{kelimpahan relatif} = f(m/z)$$

$$\text{etanol : } m/z_{\text{kursor}} = 31$$



etanol: puncak tertinggi m/z 31 (CH_2OH^+), BUKAN ion molekul m/z 46!

senyawa

etanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (M_r 46)

ion di kursor

CH_2OH^+ ($M - \text{CH}_3$) · 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 $\rightarrow$ 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, $\text{C}_3\text{H}_7\text{Cl}$. 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 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 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 alcohol* 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 (^1H 1,0078; ^{16}O 15,9949; ^{14}N 14,0031), molekul dengan "Mr 28" bisa dibedakan: $\text{CO} = 27,9949$, $\text{N}_2 = 28,0061$, $\text{C}_2\text{H}_4 = 28,0313$. Satu angka massa cukup untuk menentukan rumus molekul.

Puncak **M+1** berasal terutama dari ^{13}C ($\pm 1,1\%$ dari setiap atom C). Perkiraan jumlah atom C: $n_{\text{C}} \approx \frac{\text{tinggi } (M+1)}{\text{tinggi } M} \times \frac{100}{1,1}$. 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

"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

"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

"Larutan biru tampak biru karena menyerap cahaya biru."

FAKTA

Kebalikannya: larutan biru **meneruskan** biru dan menyerap warna komplementernya, jingga sampai merah.

39.6

^1H NMR, IHD, dan menyusun bukti

IHD: berapa ikatan rangkap atau cincin?

Sebelum membuka spektrum, detektif menghitung satu angka dari rumus molekul. Alkana rantai terbuka $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ adalah "jenuh". Setiap ikatan π ($\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$) 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 $\geq$ 4: curigai cincin benzena!

C₆H₆ 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

C₂H₆O (etanol, dimetil eter)

0

jenuh

C₃H₆O (propanon, propanal)

1

satu C=O (atau C=C, atau cincin)

C_2H_2 (etuna)	2	$C\equiv C$ 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 $C_4H_8O_2$: $(10 - 8)/2 = 1$.

1H 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 1H 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)
$R-CH_3$ (alkil)	0,9-1,0
$R-CH_2-R$	1,3-1,4
$CH_3-C(=O)^-$, $-CH_2-C(=O)^-$ (di sebelah $C=O$)	2,0-2,7
$R-O-CH_3$, $R-O-CH_2^-$ (eter, alkohol)	3,3-3,7
$-CH_2-Cl$, $-CH_2-Br$	3,4-4,2
$R-COO-CH_2^-$, $R-COO-CH_3$ (sisi O pada ester)	3,7-4,8

R–OH	1–6 (berubah-ubah, sering singlet lebar)
H pada cincin benzena	6,5–8,0
R–CHO (aldehida)	9,4–10
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.

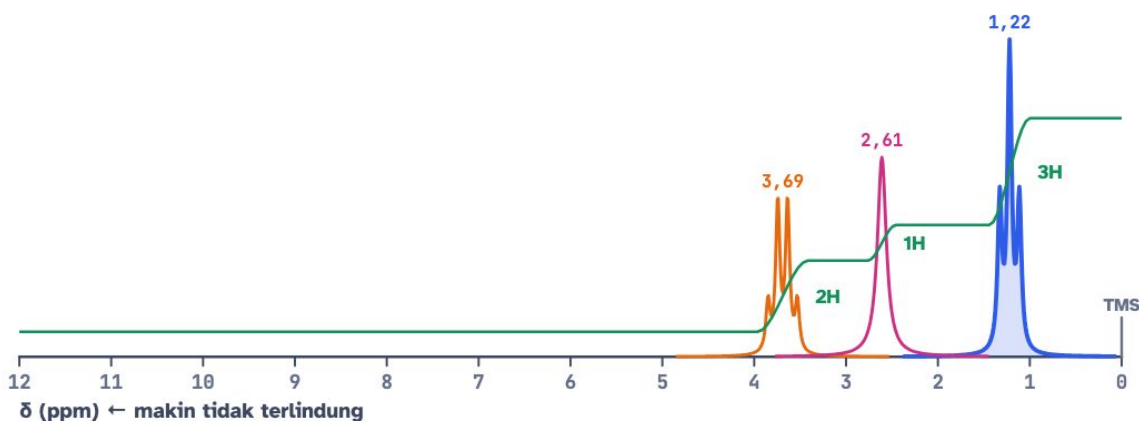
LAB MINI

Simulator ^1H NMR: dengarkan para hidrogen

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-39

Etanol

$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$



perbesaran: triplet



$\text{CH}_3 \cdot \delta 1,22 \text{ ppm} \cdot 3 \text{ H}$

tetangga 2 H $\rightarrow 2 + 1 = 3$ puncak: triplet.

CH_3 jauh dari O, masih "berselimut" elektron $\rightarrow \delta$ kecil.

Jumlah sinyal
3

δ sinyal terpilih
1,22 ppm

Integrasi
3 H (dari 6)

Pola
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 ^1H NMR memberi peta tetangga atom H. Lihat bagaimana keempatnya bekerja sama dalam satu kasus.

Kasus: cairan beraroma buah, $C_4H_8O_2$. Siapa dia?



Langkah 1. Bukti awal: analisis unsur dan ion molekul memberi rumus $C_4H_8O_2$. Banyak isomer punya rumus ini. Siapa pelakunya?

Kasus: cairan beraroma buah, $C_4H_8O_2$. Siapa dia?

① IHD (indeks kekurangan H)

IHD = $(2 \cdot 4 + 2 - 8) / 2 = 1$
 → satu ikatan π (C=O atau C=C) atau satu cincin

C=C ?

C=O ?

cincin ?

tepat satu dari ketiganya

Langkah 2. Hitung IHD: $(2 \cdot 4 + 2 - 8) / 2 = 1$. Molekul ini punya tepat satu ikatan π atau satu cincin.

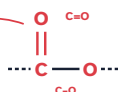
Kasus: cairan beraroma buah, $C_4H_8O_2$. Siapa dia?

① IHD (indeks kekurangan H)

IHD = $(2 \cdot 4 + 2 - 8) / 2 = 1$
 → satu ikatan π (C=O atau C=C) atau satu cincin

② Spektrum IR

pita kuat 1740 cm^{-1} (C=O) dan 1240 cm^{-1} (C-O)
 tanpa lembah lebar $2500\text{--}3600$ → tidak ada O-H



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**, $-\text{COO}-$.

Kasus: cairan beraroma buah, $C_4H_8O_2$. Siapa dia?

① IHD (indeks kekurangan H)

IHD = $(2 \cdot 4 + 2 - 8) / 2 = 1$
 → satu ikatan π (C=O atau C=C) atau satu cincin

② Spektrum IR

pita kuat 1740 cm^{-1} (C=O) dan 1240 cm^{-1} (C-O)
 tanpa lembah lebar $2500\text{--}3600$ → tidak ada O-H

③ Spektrum massa

$M^+ = 88$ ✓ cocok dengan $C_4H_8O_2$
 puncak dasar $43 = \text{CH}_3\text{CO}^+$; ada juga $29 = \text{C}_2\text{H}_5^+$



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.

Kasus: cairan beraroma buah, $C_4H_8O_2$. Siapa dia?

① IHD (indeks kekurangan H)

IHD = $(2 \cdot 4 + 2 - 8) / 2 = 1$
 → satu ikatan π (C=O atau C=C) atau satu cincin

② Spektrum IR

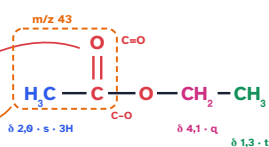
pita kuat 1740 cm^{-1} (C=O) dan 1240 cm^{-1} (C-O)
 tanpa lembah lebar $2500\text{--}3600$ → tidak ada O-H

③ Spektrum massa

$M^+ = 88$ ✓ cocok dengan $C_4H_8O_2$
 puncak dasar $43 = \text{CH}_3\text{CO}^+$; ada juga $29 = \text{C}_2\text{H}_5^+$

④ $^1\text{H NMR}$: 3 sinyal, 2 : 3 : 3

$\delta\ 4,1$ kuartet (2H) · $\delta\ 2,0$ singlet (3H)
 $\delta\ 1,3$ triplet (3H)
 jumlah H: $2 + 3 + 3 = 8$ ✓



Langkah 5. $^1\text{H NMR}$: singlet 3H di $\delta\ 2,0$ adalah CH_3 di sebelah C=O yang tak punya tetangga H. Kuartet 2H di $\delta\ 4,1$ adalah CH_2 yang menempel pada O ester dan bertetangga dengan CH_3 . Triplet 3H di $\delta\ 1,3$ adalah CH_3 yang bertetangga dengan CH_2 .

Kasus: cairan beraroma buah, $C_4H_8O_2$. Siapa dia?

① IHD (indeks kekurangan H)

IHD = $(2 \cdot 4 + 2 - 8) / 2 = 1$
 → satu ikatan π (C=O atau C=C) atau satu cincin

② Spektrum IR

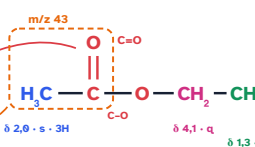
pita kuat 1740 cm^{-1} (C=O) dan 1240 cm^{-1} (C-O)
 tanpa lembah lebar $2500\text{--}3600$ → tidak ada O-H

③ Spektrum massa

$M^+ = 88$ ✓ cocok dengan $C_4H_8O_2$
 puncak dasar $43 = \text{CH}_3\text{CO}^+$; ada juga $29 = \text{C}_2\text{H}_5^+$

④ $^1\text{H NMR}$: 3 sinyal, 2 : 3 : 3

$\delta\ 4,1$ kuartet (2H) · $\delta\ 2,0$ singlet (3H)
 $\delta\ 1,3$ triplet (3H)
 jumlah H: $2 + 3 + 3 = 8$ ✓



Uji alibi isomer lain:

X metil propanoat: OCH_3 mestinya $\delta\ 3,7$
 X asam butanoat: mestinya ada O-H lebar
 X propil metanoat: mestinya H-C=O di $\delta\ 8$

Langkah 6. Uji alibi isomer lain: metil propanoat seharusnya memberi singlet OCH_3 di $\delta\ 3,7$; asam butanoat punya O-H sangat lebar; propil metanoat punya H-C=O di $\delta\ 8$. Semuanya gugur.

Kasus: cairan beraroma buah, $C_4H_8O_2$. Siapa dia?

① IHD (indeks kekurangan H)

$$IHD = (2 \cdot 4 + 2 - 8) / 2 = 1$$

→ satu ikatan π ($C=O$ atau $C=C$) atau satu cincin

② Spektrum IR

pita kuat 1749 cm^{-1} ($C=O$) dan 1249 cm^{-1} ($C-O$)
tanpa lembah lebar $2500\text{--}3600$ → tidak ada $O-H$

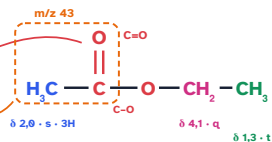
③ Spektrum massa

$M^+ = 88$ ✓ cocok dengan $C_4H_8O_2$
puncak dasar $43 = CH_3CO^+$; ada juga $29 = C_2H_5^+$

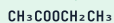
④ 1H NMR: 3 sinyal, 2 : 3 : 3

δ 4,1 kuartet (2H) · δ 2,0 singlet (3H)
 δ 1,3 triplet (3H)

jumlah H: $2 + 3 + 3 = 8$ ✓



✓ Etil etanoat (etil asetat)



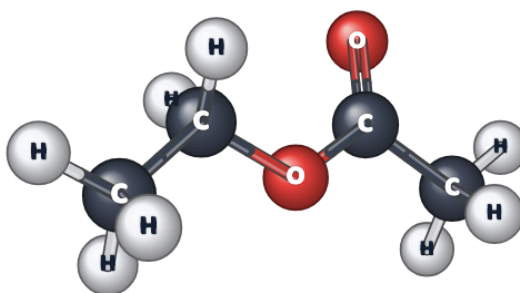
aroma buah · pelarut kutek dan lem

Langkah 7. Kesimpulan: **etil etanoat**, $CH_3COOCH_2CH_3$.

Semua bukti saling menguatkan, bukan hanya satu.

MOLEKUL 3D

Barisan tersangka: cocokkan struktur dengan bukti



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etil asetat $C_4H_8O_2$

Mr $\approx 88,11$

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?

Cairan pembersih bening Z memiliki rumus C_3H_8O . IR: pita lebar $\pm 3350\text{ cm}^{-1}$, tidak ada pita $1700\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$. MS: $M^+ = 60$, puncak dasar m/z 45. ^1H NMR: δ 4,0 (septet, 1H), 2,2 (singlet lebar, 1H), 1,2 (duplet, 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 $\rightarrow$ 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), $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$, 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 $0\text{--}220\text{ ppm}$), 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 ($\pm 170\text{--}210\text{ ppm}$).

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 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 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, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$, 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 iodine 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 $\frac{1}{4}$ sendok teh setiap serbuk dalam 3 sendok makan air. Mana yang larut jernih, mana yang keruh?
3. Teteskan 2 tetes larutan iodine. 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. Iodine 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 **^1H 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

Rumus penting

$$\% \text{Cl} = \frac{m_{\text{AgCl}} \times \frac{35,5}{143,5}}{m_{\text{sampel}}} \times 100\%$$

Kadar klorida dari endapan AgCl. Timbang endapan perak klorida, ambil bagian massa klorinnya, lalu bandingkan dengan massa sampel.

$$A = \epsilon b c$$

Hukum Beer-Lambert. Makin kuat daya serap zat, makin tebal kuvet, dan makin pekat larutannya, makin banyak cahaya yang ditelan.

$$\text{IHD} = \frac{2C + 2 + N - H - X}{2}$$

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 ($\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$), 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

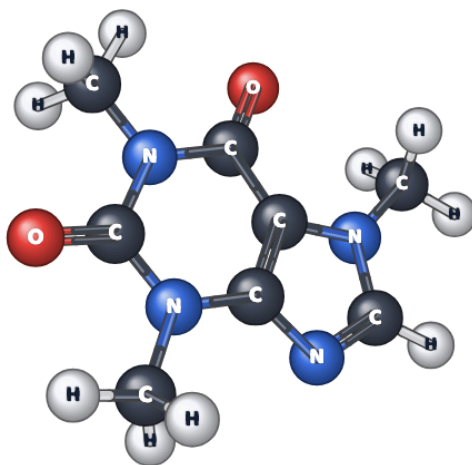
Lebih dari 130 molekul dan kristal yang bisa kamu putar: dari air dan amonia, bentuk-bentuk VSEPR, kisi garam dapur dan intan, sampai molekul rempah Nusantara seperti kafein kopi Gayo, kurkumin kunyit, dan eugenol cengkeh.



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 $\approx 194,19$

[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) Fullerena C₆₀ (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 butirir 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.

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)...

[illegible]

■ 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

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

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

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

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

Bab 3 • #8

Nilai R_f

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

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

Bab 3 • #9

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.

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)

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

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

Bab 4 • #12

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.

Bab 4 • #13

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.

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

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

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

$$n = A - Z \quad e = Z - q$$

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

$$N_{\text{maks}} = 2n^2$$

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 K α 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)

$$Z_{\text{ef}} = Z - S$$

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)

$$r \approx 52,9 \text{ pm} \times \frac{n^2}{Z_{\text{ef}}}$$

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

$$m_{\text{Al}} = \frac{I \times t \times 27}{3 \times 96485} \times \frac{\eta}{100}$$

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

$$U = \Delta H_f^\circ - (\Delta H_{\text{at}}^M + E_i + \Delta H_{\text{at}}^X + E_{\text{ae}})$$

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

$$\text{ikatan} = \frac{N - A}{2}, \quad N = 8n_X + 2n_H$$

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

$$D = \frac{1}{2} (V + L - q)$$

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.

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.

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°.

Orde ikatan dari teori orbital molekul

$$\text{orde} = \frac{1}{2} (n_{\text{ikatan}} - n_{\text{antiikatan}})$$

Setiap pasangan elektron di orbital ikatan menambah 'separuh lem dua kali', setiap pasangan di orbital antiikatan mengurangi. Orde ikatan 0 berarti molekul tidak terbentuk.

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.

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.

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.

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.

Gas ideal: berapa tekanannya?

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

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?

$$x = \frac{b}{\text{FPB}(a, b)}, \quad y = \frac{a}{\text{FPB}(a, b)}$$

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

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \times \min\left(m_{\text{H}}, \frac{m_{\text{O}}}{8}\right)$$

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 & Kestimbangan

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

$$\Delta H = \underbrace{4E_{\text{C-H}} + 2E_{\text{O=O}}}_{\text{diputus}} - \underbrace{(2E_{\text{C=O}} + 4E_{\text{O-H}})}_{\text{dibentuk}}$$

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

$$v = k [A]^m [B]^n$$

Laju sama dengan tetapan laju dikali konsentrasi setiap pereaksi yang dipangkatkan ordenya.

Bab 21 · #11

Peluruhan orde satu

$$[A]_t = [A]_0 e^{-kt}$$

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

$$C = C_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

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

$$K_c = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2][\text{H}_2]^3}$$

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?

$$K_c = \frac{(2x)^2}{(a-x)(b-x)} \Rightarrow [\text{HI}] = 2x$$

Masukkan konsentrasi awal H₂ dan I₂ serta Kc. Mesin menyelesaikan persamaan kuadrat dalam x (H₂ yang bereaksi) sehingga hasil baginya tepat sama dengan Kc.

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**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.

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.

Molaritas dari massa zat

$$M = \frac{m / M_r}{V}$$

Molaritas adalah jumlah mol zat terlarut di setiap liter larutan.

Pengenceran

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

Saat diencerkan, mol zat terlarut tetap; yang bertambah hanya pelarutnya.

Molalitas dan fraksi mol

$$m = \frac{m_t / M_r}{p} \times 1000$$

Molalitas adalah mol zat terlarut untuk setiap kilogram pelarut, bukan larutan.

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 $\times$ tekanan uap pelarut murni.

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 K_b derajat.

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 = $K_f \times$ molalitas $\times$ jumlah partikel per satuan zat.

Bab 24 · #9

Tekanan osmotik

$$\pi = M \cdot R \cdot T \cdot i$$

Tekanan osmotik = konsentrasi partikel $\times R \times$ 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

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 + \log [\text{OH}^-]$$

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

$$\text{pH} = -\log (a \times C_a)$$

Asam kuat melepas semua H⁺-nya. Kalikan konsentrasi asam dengan jumlah H⁺ per molekul, lalu ambil minus logaritmanya.

Bab 26 · #16

pH asam lemah

$$[\text{H}^+] \approx \sqrt{K_a \cdot C_a}$$

Asam lemah hanya melepas sebagian kecil H⁺. Konsentrasi H⁺ kira-kira akar dari K_a dikali konsentrasi asam.

Bab 26 · #17

pH basa lemah

$$[\text{OH}^-] \approx \sqrt{K_b \cdot C_b}, \quad \text{pH} = 14 + \log[\text{OH}^-]$$

Basa lemah hanya menarik sedikit H^+ dari air. Hitung dulu OH^- dengan akar K_b kali konsentrasi, lalu ubah ke pH lewat pOH.

Bab 27 · #18

Titrasi: mol H^+ = mol OH^-

$$M_a = \frac{M_b V_b}{V_a}$$

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

$$[\text{OH}^-] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a} C_g} \quad \text{pH} = 14 + \log[\text{OH}^-]$$

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

$$\text{pH} = \text{p}K_a + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

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, $K_{sp} = s \times (2s)^2 = 4s^3$. Bagi Ksp dengan 4, lalu tarik akar pangkat tiga.

Bab 28 · #24

Qsp setelah dua larutan dicampur ($\text{AgNO}_3 + \text{NaCl}$)

$$Q_{sp} = \frac{c_1 V_1}{V_1 + V_2} \times \frac{c_2 V_2}{V_1 + V_2}$$

Encerkkan dulu setiap ion dengan volume total, baru kalikan. Jika hasilnya melewati Ksp AgCl ($1,8 \times 10^{-10}$), endapan putih muncul.

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 K_{sp} dibagi c .

Bagian G · Redoks & Elektrokimia**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.

Elektron yang dipindahkan

$$n_e = k \times |x_{\text{akhir}} - x_{\text{awal}}|$$

Jumlah elektron per satuan rumus sama dengan jumlah atom yang berubah dikali besar perubahan biloksnya.

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).

Potensial sel standar

$$E_{\text{sel}}^\circ = E_{\text{katode}}^\circ - E_{\text{anode}}^\circ$$

Tegangan sel sama dengan 'ketinggian' setengah sel katode dikurangi 'ketinggian' setengah sel anode.

Kapasitas teoretis logam anode

$$Q = \frac{m}{A_r} \times n \times F$$

Muatan yang dapat dilepas = jumlah mol logam $\times$ elektron yang dilepas setiap atom $\times$ muatan satu mol elektron.

 ΔG° dari E°_{sel}

$$\Delta G^\circ = -n F E_{\text{sel}}^\circ$$

Makin banyak elektron yang dipindahkan dan makin besar tegangannya, makin besar energi bebas yang dilepaskan.

Bab 30 · #7

Persamaan Nernst

$$E_{sel} = E_{sel}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

Tegangan sel nyata = tegangan standar dikurangi 'hukuman' karena hasil reaksi sudah menumpuk (Q besar).

Bab 31 · #8

Hukum Faraday: massa endapan

$$m = \frac{A_r}{n} \cdot \frac{It}{F}$$

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

$$V = \frac{It}{zF} \times V_m$$

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

$$W = \frac{3FV}{A_r \times \eta}$$

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

$$C_n H_{2n+2} \quad M_r = 12n + (2n + 2) = 14n + 2$$

Setiap tambahan satu karbon membawa dua hidrogen, jadi Mr naik 14 setiap kali rantai bertambah satu gugus CH₂.

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

$$n_{O_2} = x + \frac{y}{4}$$

Setiap atom C butuh satu molekul O₂ untuk menjadi CO₂, dan setiap empat atom H butuh satu molekul O₂ untuk menjadi dua H₂O.

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.

Rumus umum dan Mr deret homolog

$$\text{C}_n\text{H}_{2n+2-2u}\text{O}_x \Rightarrow M_r = 14n + 2 - 2u + 16x$$

Setiap tambahan satu gugus $-\text{CH}_2-$ menambah Mr sebesar 14; jumlah atom O dan ikatan rangkap $\text{C}=\text{O}$ menentukan 'keluarga' molekulnya.

Rendemen esterifikasi

$$\% \text{rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{\frac{m_{\text{asam}}}{M_{r,\text{asam}}} \times M_{r,\text{ester}}} \times 100\%$$

Bandingkan ester yang benar-benar kamu tampung dengan ester yang seharusnya terbentuk bila semua asam (pereaksi pembatas) berubah menjadi ester.

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.

Ekonomi atom

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

Persentase massa atom pereaksi yang benar-benar masuk ke produk yang kita inginkan. Sisanya menjadi produk samping alias limbah.

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.

Hukum laju substitusi nukleofilik

$$r = k [\text{RX}] [\text{Nu}]^n$$

Laju sebanding dengan konsentrasi haloalkana. Nukleofil hanya ikut menentukan laju bila ia terlibat di tahap paling lambat: $n = 1$ untuk SN_2 , $n = 0$ untuk SN_1 .

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.

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)

$$E = 4m_K + 4m_P + 9m_L$$

Setiap gram karbohidrat dan protein memberi sekitar 4 kkal, sedangkan setiap gram lemak memberi sekitar 9 kkal.

Bab 36 · #16

Etanol dan CO₂ 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

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Setiap lewat satu waktu paruh, yang tersisa tinggal separuh dari jumlah sebelumnya.

Bab 37 · #2

Umur dari sisa karbon-14

$$t = T_{1/2} \times \frac{\ln(100\% / p)}{\ln 2}$$

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (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

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{bb}} \times w_C \times \frac{44}{12}$$

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?

$$\% \text{EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{produk}} + M_{\text{samping}}} \times 100\%$$

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

$$\% \text{Cl} = \frac{m_{\text{AgCl}} \times \frac{35,5}{143,5}}{m_{\text{sampel}}} \times 100\%$$

Timbang endapan perak klorida, ambil bagian massa klorinnya, lalu bandingkan dengan massa sampel.

Bab 39 · #11

Hukum Beer–Lambert

$$A = \epsilon b c$$

Makin kuat daya serap zat, makin tebal kuvet, dan makin pekat larutannya, makin banyak cahaya yang ditelan.

Bab 39 · #12

Indeks kekurangan hidrogen (IHD)

$$\text{IHD} = \frac{2C + 2 + N - H - X}{2}$$

Bandingkan jumlah H molekulmu dengan senyawa jenuh rantai terbuka: setiap pasang H yang hilang berarti satu ikatan π atau satu cincin.



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 pictogram 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 & Keseimbangan

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	$-\log[H^+]$; 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 $\pm 5,6$ karena terlarutnya oksida belerang dan nitrogen.
Kimia hijau	Rancangan proses kimia yang mengurangi atau menghilangkan zat berbahaya dan limbah.
Hukum Beer-Lambert	$A = \epsilon bc$: absorbansi sebanding dengan konsentrasi dan panjang jalur cahaya.

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.