



Chemipedia

BUKU • JILID 2 • BAB 15-28

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 2 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 D • STOIKIOMETRI

15	Bahasa Kimia: Rumus & Tata Nama	4
16	Persamaan Reaksi & Hukum Dasar Kimia	36
17	Konsep Mol	67
18	Stoikiometri Reaksi	88

BAGIAN E • ENERGI, LAJU & KESETIMBANGAN

19	Termokimia	116
20	Entropi & Energi Bebas Gibbs	149
21	Laju Reaksi	178
22	Keseimbangan Kimia	210

BAGIAN F • LARUTAN & ASAM-BASA

23	Larutan & Konsentrasi	239
24	Sifat Koligatif Larutan	268
25	Sistem Koloid	300
26	Asam & Basa	328
27	Titration, Penyangga & Hidrolisis	362
28	Kelarutan & Hasil Kali Kelarutan	393

15 Bahasa Kimia: Membaca Rumus, Memberi Nama

Soda kue dan soda api sama-sama disebut "soda". Yang satu mengembangkan bolu, yang lain bisa melukai kulit. Bab ini mengajarkanmu bahasa rahasia kimiawan: rumus dan nama yang tidak pernah tertukar.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membaca **lambang unsur** dan **rumus kimia**, serta membedakan rumus molekul, rumus empiris, dan rumus struktur;
- menentukan **bilangan oksidasi** unsur dalam senyawa dan ion;
- menulis rumus dan **nama IUPAC senyawa ion** (biner dan poliatom), termasuk **angka Romawi** untuk logam bermuatan ganda;
- menamai **senyawa kovalen biner** dengan awalan mono-, di-, tri-, dan seterusnya;
- menamai **asam, basa, garam, dan hidrat**, lalu menerjemahkan **nama dagang** di label produk menjadi nama IUPAC.

SODA YANG SALAH

KOMIK • 4 PANEL

Sabtu sore, di toko kelontong dekat pasar

BIMA

Bu, beli soda sebungkus, ya! Buat bolu kukus pesanan Ibu. Eh, yang ini saja, sama-sama "soda".

yang ini?

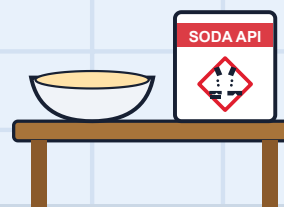


LARAS

Bim, stop! Ini **soda api**: natrium hidroksida, NaOH. Lihat simbol korosif di bungkusnya!

BIMA

Lho? Soda ya soda, kan?



KAK TIRTA

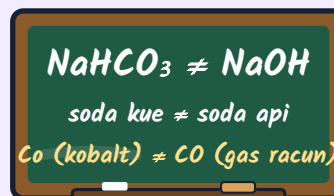
Untung belum masuk adonan! Soda kue itu NaHCO_3 . Soda api NaOH bisa membakar kulit dan merusak saluran cerna.

STOP!**Kimo ikut nimbrung...****KIMO**

Nama dagang bisa berbeda di tiap daerah. Rumus dan nama IUPAC sama di seluruh dunia!

BIMA

Mulai sekarang, aku baca rumusnya dulu...

**Tebak Dulu!**

Bima menulis Co, Laras menulis CO. Apakah keduanya sama?

Sama saja, hanya beda gaya tulisan.

CO adalah "versi besar" dari Co, jadi sifatnya mirip.

Berbeda total: Co adalah unsur kobalt (logam), CO adalah senyawa karbon monoksida (gas beracun).

Keduanya sama-sama gas beracun dari knalpot.

Jawabannya: berbeda total. Huruf kecil "o" pada Co berarti satu lambang unsur dua huruf, yaitu kobalt, logam keperakan untuk baterai dan magnet. Huruf besar "O" pada CO berarti dua unsur: karbon dan oksigen, membentuk karbon monoksida yang tidak berbau dan sangat beracun. Dalam bahasa kimia, satu huruf kapital bisa menjadi soal hidup dan mati!

15.1**Lambang unsur dan rumus kimia: alfabet dan kalimat**

Bahasa Indonesia punya 26 huruf. Bahasa kimia punya 118 "huruf", yaitu **lambang unsur**. Dari huruf-huruf itu, kimiawan merangkai "kata" yang disebut **rumus kimia**. Rumus kimia bercerita tentang dua hal sekaligus: **unsur apa saja** yang menyusun zat, dan **berapa banyak** atom setiap unsur.

Bahasa sederhana • Coba bayangkan lambang unsur seperti inisial nama teman sekelasmu. Huruf pertama selalu kapital, huruf kedua (kalau ada) selalu kecil. Jadi "Co" itu satu orang bernama kobalt, sedangkan "CO" itu dua orang yang bergandengan: karbon dan oksigen.



ATURAN • MENULIS LAMBANG UNSUR

- Satu atau dua huruf (unsur sangat berat yang baru ditemukan pernah memakai tiga huruf sementara).
- Huruf pertama **kapital**, huruf kedua **kecil**: **C** karbon, **Ca** kalsium, **Cl** klorin, **Co** kobalt, **Cu** tembaga.
- Banyak lambang berasal dari **nama Latin**, sehingga tidak mirip nama Indonesianya.

Lambang	Nama Latin	Nama Indonesia	Ada di sekitar kita
Na	natrium	natrium	garam dapur, soda kue
K	kalium	kalium	pisang, pupuk KCl
Fe	ferrum	besi	paku, pasir besi pantai selatan Jawa
Cu	cuprum	tembaga	kabel listrik, gamelan perunggu
Ag	argentum	perak	kerajinan perak Kotagede
Au	aurum	emas	tambang Grasberg, perhiasan
Sn	stannum	timah	bijih timah Bangka-Belitung
Pb	plumbum	timbal	aki kendaraan (dulu juga bensin bertimbal)
Hg	hydrargyrum ("air perak")	raksa	termometer lama (kini dilarang)



AWAS JEBAKAN

Huruf besar dan kecil mengubah arti. **Co** = kobalt, **CO** = karbon monoksida. **No** = nobelium, **NO** = nitrogen monoksida. **Sn** = timah, sedangkan "SN" bukan apa-apa. Satu lagi: dalam bahasa Indonesia, **timah** (Sn) berbeda dengan **timbal** (Pb), walaupun timbal dulu disebut "timah hitam".



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1808, **John Dalton** menggambar unsur sebagai lingkaran bersimbol: lingkaran dengan titik untuk hidrogen, lingkaran hitam untuk karbon. Cantik, tetapi repot dicetak! Sekitar 1813, kimiawan Swedia **Jöns Jacob Berzelius** mengusulkan memakai huruf awal nama Latin unsur, persis seperti yang kita pakai sekarang. Berzelius menulis jumlah atom sebagai angka di atas (H^2O); kini angka itu ditulis kecil di bawah (H_2O).

Indeks dan koefisien: dua angka, dua makna

Dalam rumus, angka kecil di kanan bawah lambang disebut **indeks**. Indeks menyatakan jumlah atom unsur di depannya dalam **satu** molekul atau satuan rumus. Angka besar di depan rumus disebut **koefisien**, yang menyatakan **berapa banyak** molekul atau satuan rumus.

- H_2O : 2 atom H dan 1 atom O (angka 1 tidak ditulis).
- $3 H_2O$: tiga molekul air, berisi 6 atom H dan 3 atom O.
- $Ca(NO_3)_2$: indeks 2 di luar kurung mengalikan isi kurung. Ada 1 Ca, 2 N, dan 6 O.
- $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$: titik tengah berarti "beserta". Satu satuan $CuSO_4$ membawa 5 molekul air.

RUMUS HIDUP Jumlah atom dalam rumus

$$N = k \times p \times q$$

Jumlah atom suatu unsur sama dengan koefisien dikali indeks di luar kurung dikali indeks di dalam kurung.

 k

Koefisien (angka di depan rumus)

 p

Indeks di luar kurung

 q

Indeks atom di dalam kurung

 N

Jumlah atom atom

JUMLAH ATOM

18

atom

 $3Ca(NO_3)_2 \rightarrow 18 \text{ atom O}$

$3 \times 2 \times 3 = 18$ atom. Contoh: atom O dalam $3Ca(NO_3)_2 = 3 \times 2 \times 3 = 18$ atom.

Cek satuan: hitungan atom, tanpa satuan

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

Tiga cara menulis satu zat

Satu zat bisa ditulis dengan beberapa jenis rumus. **Rumus molekul** menyatakan jumlah atom sebenarnya dalam satu molekul. **Rumus empiris** menyatakan perbandingan atom paling sederhana. **Rumus struktur** menunjukkan cara atom-atom itu tersambung.

Rumus molekul



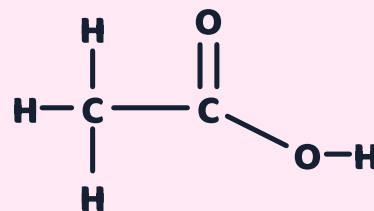
jumlah atom sebenarnya
dalam satu molekul

Rumus empiris



perbandingan paling sederhana
 $2 : 4 : 2 = 1 : 2 : 1$

Rumus struktur



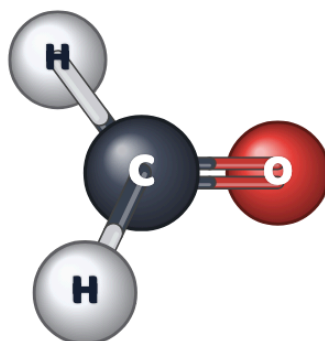
cara atom-atom tersambung

Tiga tulisan, satu zat: asam asetat, penyebab rasa asam pada cuka.

Rumus molekul, rumus empiris, dan rumus struktur asam asetat. Bandingkan dengan Molekul 3D di bawah: model 3D adalah "rumus struktur" yang bisa diputar.

Zat	Rumus molekul	Rumus empiris	Keterangan
Formaldehida	CH_2O	CH_2O	molekulnya sudah paling sederhana
Asam asetat (cuka)	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	CH_2O	sering ditulis CH_3COOH agar gugus asamnya terlihat
Glukosa	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	CH_2O	gula darah, enam kali rumus empiris
Hidrogen peroksida	H_2O_2	HO	cairan antiseptik luka
Benzena	C_6H_6	CH	cincin di kaus Bima!
Garam dapur	(tidak ada)	NaCl	senyawa ion tidak punya molekul; rumusnya disebut satuan rumus

MOLEKUL 3D Satu rumus empiris, banyak wajah



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Formaldehida CH_2O Mr $\approx 30,03$ PubChem ↗

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

Formaldehida, asam asetat, dan glukosa sama-sama berumus empiris CH_2O , tetapi molekulnya sangat berbeda. Putar setiap molekul, hitung atomnya, lalu tulis rumus molekulnya. Ingat: formalin (larutan formaldehida) **dilarang** untuk mengawetkan makanan!

15.2 Bilangan oksidasi dan valensi: "muatan pura-pura"

Sebelum memberi nama, kita perlu satu alat penting. Bayangkan setiap ikatan sebagai tarik tambang memperebutkan elektron. Atom yang lebih **elektronegatif** (lebih rakus elektron, lihat Bab 8) dianggap **menang telak** dan membawa pulang semua elektron ikatan. Muatan yang "seolah-olah" dimiliki setiap atom setelah perebutan itu disebut **bilangan oksidasi** (biloks).

Bahasa sederhana · Bilangan oksidasi itu seperti skor pertandingan rebutan elektron. Atom yang menang mendapat skor minus (karena elektron bermuatan negatif), atom yang kalah mendapat skor plus. Jumlah skor semua atom dalam satu molekul selalu nol.



DEFINISI · BILANGAN OKSIDASI DAN VALENSI

Bilangan oksidasi adalah muatan yang dimiliki sebuah atom bila semua ikatannya dianggap ikatan ion, dengan elektron ikatan diberikan kepada atom yang lebih elektronegatif. **Valensi** adalah daya gabung atom, yaitu banyaknya ikatan yang dapat dibentuknya ($\text{H} = 1$, $\text{O} = 2$, $\text{N} = 3$, $\text{C} = 4$). Valensi selalu berupa bilangan cacah; biloks punya tanda + atau –.

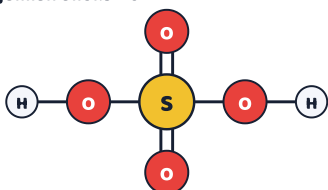
Contoh: karbon bervalensi 4 di metana (CH_4) maupun di karbon dioksida (CO_2). Namun biloks C di CH_4 adalah -4 (C lebih elektronegatif daripada H), sedangkan di CO_2 adalah $+4$ (O lebih elektronegatif daripada C). Valensi sama, biloks berlawanan!



ATURAN • MENENTUKAN BILANGAN OKSIDASI

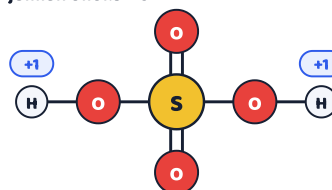
1. Unsur bebas (Na, Fe, O₂, H₂, P₄, S₈) berbiloks **0**.
 2. Ion monoatom berbiloks sama dengan **muatannya**: Na⁺ = +1, Fe³⁺ = +3, Cl⁻ = -1.
 3. Dalam senyawa, logam golongan 1 selalu **+1**, golongan 2 selalu **+2**, dan aluminium **+3**.
 4. Fluorin dalam senyawa selalu **-1**.
 5. Hidrogen umumnya **+1**, kecuali dalam hidrida logam (NaH, CaH₂) yang **-1**.
 6. Oksigen umumnya **-2**, kecuali dalam peroksida (H₂O₂, Na₂O₂) yang **-1** dan dalam OF₂ yang **+2**.
 7. Jumlah biloks semua atom = **0** untuk senyawa netral, dan = **muatan ion** untuk ion poliatom.
- Bila dua aturan bertentangan, aturan dengan nomor lebih kecil yang menang.

H₂SO₄ netral → jumlah biloks = 0



Langkah 1. Asam sulfat, H₂SO₄, adalah molekul netral. Jadi jumlah semua bilangan oksidasinya harus 0.

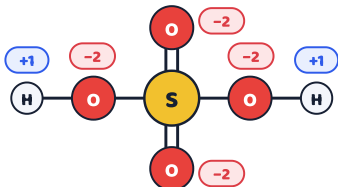
H₂SO₄ netral → jumlah biloks = 0



$$\text{H: } 2 \times (+1) = +2$$

Langkah 2. Aturan 5: H dalam senyawa ini berbiloks +1. Dua atom H menyumbang $2 \times (+1) = +2$.

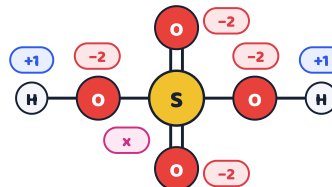
H₂SO₄ netral → jumlah biloks = 0



$$\text{O: } 4 \times (-2) = -8$$

Langkah 3. Aturan 6: O berbiloks -2 (bukan peroksida). Empat atom O menyumbang $4 \times (-2) = -8$.

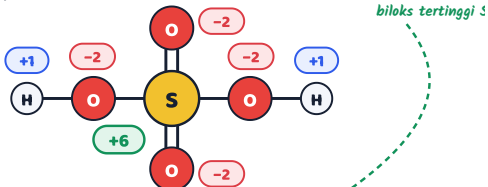
H₂SO₄ netral → jumlah biloks = 0



$$(+2) + x + (-8) = 0$$

Langkah 4. Biloks S belum diketahui; sebut saja x . Susun persamaan jumlah nol: $(+2) + x + (-8) = 0$.

H₂SO₄ netral → jumlah biloks = 0



$$x = +6 \rightarrow \text{belerang(VI) dalam asam sulfat} \checkmark$$

Langkah 5. Selesaikan: $x = +6$. Belerang dalam asam sulfat berbiloks +6, nilai tertinggi untuk unsur golongan 16.



TRIK KAK TIRTA

"Tulis di atas, kalikan, jumlahkan." Tulis biloks setiap unsur yang sudah pasti *di atas* lambangnya, kalikan dengan indeksinya, lalu jumlahkan dan samakan dengan muatan total. Untuk $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$: $2x + 7(-2) = -2$, jadi $x = +6$. Dua menit, tanpa menghafal!

RUMUS HIDUP

Bilangan oksidasi dari jumlah nol

$$x = \frac{q - a(+1) - b(-2)}{n}$$

Biloks unsur yang dicari sama dengan muatan total dikurangi sumbangan H dan sumbangan O, lalu dibagi jumlah atom unsur itu.



Spesi dengan **2** atom H, **1** atom X, dan **4** atom O, bermuatan **0**: biloks X = **6**.

Cek satuan: biloks tidak bersatuan

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-BILOKS-JUMLAH-NOL](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-biloks-jumlah-nol)

CONTOH Biloks klorin dalam pemutih

Label pemutih pakaian menulis "natrium hipoklorit", NaClO . Tentukan bilangan oksidasi Cl.

- 1 Senyawa netral: jumlah biloks = 0.
- 2 Na (golongan 1) = +1; O = -2.
- 3 $(+1) + x + (-2) = 0$, sehingga $x = +1$.

Biloks Cl = +1. Bandingkan dengan Cl dalam garam dapur (NaCl) yang -1. Klorin yang "kekurangan elektron" inilah yang membuat pemutih bersifat oksidator kuat.

ADU CEPAT Biloks kilat

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-15

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Jumlah semua biloks = muatan total. H = +1, O = -2. Contoh: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} \rightarrow 2x - 14 = -2 \rightarrow x = +6$.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

BILOKS PECAHAN DAN "PENGECUALIAN" KESUKAAN OLIMPIADE

Biloks yang dihitung dari rumus adalah **rata-rata**. Struktur sebenarnya bisa lebih menarik:

- Magnetit, Fe_3O_4 (pasir besi), memberi rata-rata Fe = +8/3. Sebenarnya isinya satu Fe^{2+} dan dua Fe^{3+} , sehingga namanya **besi(II,III) oksida**.
- Ion tetratonat, $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$, memberi rata-rata S = +2,5. Dari struktur Lewisnya, dua S di ujung (terikat pada O) berbiloks +5, dan dua S di tengah (hanya terikat pada S) berbiloks 0.
- Kalium superoksida, KO_2 (dipakai pada tabung oksigen darurat), memberi O = $-\frac{1}{2}$.
- CrO_5 bukan Cr(+10)! Molekulnya berisi dua gugus peroksida (O = -1), sehingga Cr = +6.

Rentang biloks yang dikenal adalah -4 (C dalam CH_4) sampai +8 (Os dalam OsO_4). IUPAC kini menganjurkan menentukan biloks dari struktur Lewis: setiap pasangan elektron ikatan diberikan kepada atom yang lebih elektronegatif, dan ikatan antara dua atom sejenis dibagi rata.

15.3 Senyawa ion: kation dulu, anion kemudian

Ingat Natrium yang royal dan Klorin yang rakus dari Klub Unsur (Bab 10)? Natrium menyerahkan satu elektron menjadi **kation** Na^+ , dan klorin menerimanya menjadi **anion** Cl^- . Keduanya saling tarik dan membentuk kisi kristal garam. Senyawa ion diberi nama seperti nama orang Indonesia yang punya nama depan dan nama belakang: **nama kation dulu, lalu nama anion**.



DEFINISI • NAMA SENYAWA ION

Nama senyawa ion = **nama kation** + **nama anion**. Kation logam memakai nama unsurnya (ditambah angka Romawi bila logam itu bisa bermuatan lebih dari satu). Anion monoatom memakai nama unsur dengan akhiran **-ida**: klorida, oksida, sulfida. Ion poliatom punya nama khusus yang perlu dikenali.

Bahasa sederhana • Contoh paling sederhana: natrium + klorida = **natrium klorida** (garam dapur). Kalsium + oksida = **kalsium oksida** (kapur tohor). Mudah, kan? Kation selalu disebut lebih dulu, seperti pemain tuan rumah.

Tabel ion yang paling sering muncul

Kation (ion positif)

Muatan +1

H^+ hidrogen
 Na^+ natrium
 K^+ kalium
 Ag^+ perak
 NH_4^+ amonium
 Cu^+ tembaga(I)

Muatan +2

Mg^{2+} magnesium
 Ca^{2+} kalsium
 Ba^{2+} barium
 Zn^{2+} seng
 Fe^{2+} besi(II)
 Cu^{2+} tembaga(II)
 Sn^{2+} timah(II)
 Pb^{2+} timbal(II)
 Mn^{2+} mangan(II)
 Ni^{2+} nikel(II)
 Hg^{2+} raksa(II)

Muatan +3 dan +4

Al^{3+} aluminium
 Fe^{3+} besi(III)
 Cr^{3+} kromium(III)
 Sn^{4+} timah(IV)
 Pb^{4+} timbal(IV)

Anion monoatom (akhiran -ida)

Muatan -1

F^- fluorida
 Cl^- klorida
 Br^- bromida
 I^- iodida
 H^- hidrida

Muatan -2

O^{2-} oksida
 S^{2-} sulfida

Muatan -3

N^{3-} nitrida
 P^{3-} fosfida

Ion poliatom

Nama

Ditemukan di ...

NH_4^+

amonium

pupuk ZA, nisadar (baterai kering)

OH^-

hidroksida

soda api, kapur sirih, obat maag

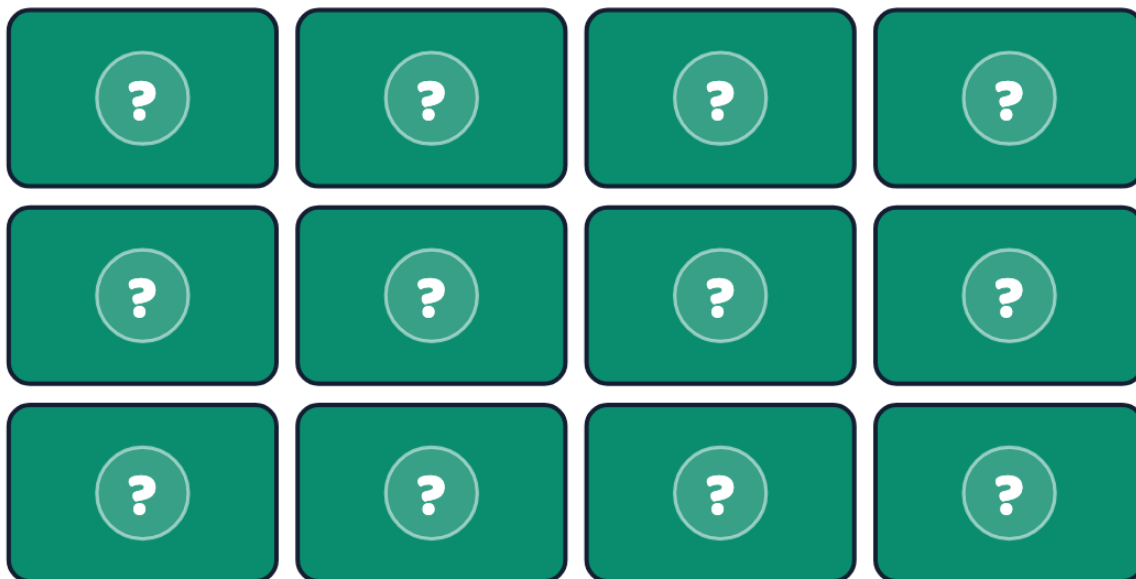
CN^-	sianida	dilepaskan singkong pahit dan gadung yang tidak diolah benar (sebagai HCN)
NO_3^-	nitrat	pupuk, sendawa
NO_2^-	nitrit	pengawet daging olahan
SO_4^{2-}	sulfat	terusi, tawas, garam inggris, air aki
SO_3^{2-}	sulfit	pengawet buah kering
HSO_4^-	hidrogen sulfat	pembersih kloset berbentuk serbuk
CO_3^{2-}	karbonat	batu kapur, cangkang telur, soda abu
HCO_3^-	hidrogen karbonat (bikarbonat)	soda kue, air mineral
PO_4^{3-}	fosfat	tulang dan gigi
HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-	hidrogen fosfat, dihidrogen fosfat	pupuk fosfat, pengatur keasaman
CH_3COO^-	asetat	cuka
ClO^- , ClO_3^- , ClO_4^-	hipoklorit, klorat, perklorat	pemutih & kaporit, korek api, kembang api
IO_3^-	iodat	garam beryodium
MnO_4^-	permanganat	PK, disinfektan berwarna ungu
CrO_4^{2-} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	kromat, dikromat	larutan kuning dan jingga di laboratorium
$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	oksalat	belimbing wuluh, bayam
$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	tiosulfat	penetral klorin air akuarium



TRIK KAK TIRTA • -AT ATAU -IT?

Akhiran **-it** ada di kata "**sedikit**": ion berakhiran -it punya oksigen **lebih sedikit** satu daripada pasangan -at-nya. Sulfat $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow$ sulfit SO_3^{2-} ; nitrat $\text{NO}_3^- \rightarrow$ nitrit NO_2^- . Muatannya tetap sama! Awalan **hipo-** berarti "di bawah" (lebih sedikit lagi), awalan **per-** berarti "melebihi": hipoklorit $\text{ClO}^- <$ klorit $\text{ClO}_2^- <$ klorat $\text{ClO}_3^- <$ perklorat ClO_4^- .

Pasangkan rumus ion dengan namanya



Ketuk dua kartu. Pasangkan rumus ion (biru) dengan namanya (oranye).

Langkah

0

Pasangan

0 / 6

Waktu

0 s

Status

siap

Ketuk dua kartu untuk membukanya. Pasangkan **rumus ion** (biru) dengan **namanya** (oranye). Setiap pasangan yang cocok membuka satu fakta kimia sehari-hari. Coba set "Kembar -at/-it": sanggupkah kamu menyelesaikannya dalam kurang dari 12 langkah?

Dari nama ke rumus: silangkan muatannya

Senyawa ion selalu **netral**. Jadi jumlah muatan positif kation harus tepat menghapus muatan negatif anion. Caranya: angka muatan kation menjadi indeks anion, dan sebaliknya. Lalu sederhanakan.

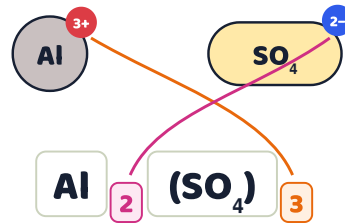


ATURAN • MENULIS RUMUS SENYAWA ION

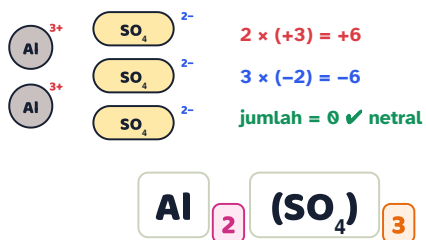
1. Tulis lambang kation dulu, anion kemudian.
2. Pilih jumlah setiap ion sehingga **muatan total = 0** (silangkan angka muatannya).
3. Sederhanakan perbandingannya: $\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CaO}$, bukan Ca_2O_2 .
4. Beri **kurung** pada ion poliatom yang jumlahnya lebih dari satu: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.



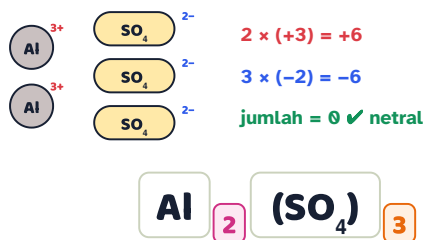
Langkah 1. Ion aluminium, Al^{3+} , dan ion sulfat, SO_4^{2-} . Muatannya tidak sama besar, jadi perbandingannya tidak bisa 1 : 1.



Langkah 2. Silangkan angka muatannya: angka 3 dari Al menjadi indeks sulfat, angka 2 dari sulfat menjadi indeks Al.

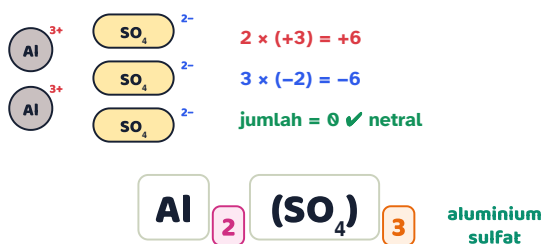


Langkah 3. Cek muatan: $2 \times (+3) + 3 \times (-2) = 0$. Senyawa ion selalu netral!



Langkah 4. Karena ada tiga ion sulfat utuh, SO_4 diberi kurung: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, bukan " $\text{Al}_2\text{SO}_{43}$ ".

kurung: SO_4 dihitung utuh, 3 kali



Langkah 5. Namanya **aluminium sulfat**: tanpa awalan dan tanpa angka Romawi, karena Al hanya punya satu muatan (+3). Zat inilah yang dipakai PDAM untuk menjernihkan air.

$$x = \frac{b}{\text{FPB}(a, b)}, \quad y = \frac{a}{\text{FPB}(a, b)}$$

Jumlah kation (x) adalah besar muatan anion, dan jumlah anion (y) adalah besar muatan kation, setelah keduanya dibagi faktor persekutuan terbesarnya.

 a

Muatan kation (+)

 b

Besar muatan anion (-)

 x

Jumlah kation dalam rumus

JUMLAH KATION DALAM RUMUS

2

 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$

Kation **+3** dan anion **-2**: $x = 2$ kation, $y = 3$ anion. Cek: $2 \times (+3) + 3 \times (-2) = 0$ ✓

Cek satuan: $x \cdot a - y \cdot b = 0$

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

Angka Romawi: muatan, bukan jumlah



Tebak Dulu!

Karat besi diberi nama besi(III) oksida. Apa arti angka III?

Ada tiga atom besi dalam satu satuan rumus.

Ada tiga atom oksigen dalam satu satuan rumus.

Muatan (bilangan oksidasi) ion besi adalah +3.

Besi berada di golongan III tabel periodik.

Jawabannya: muatan ion besi +3. Besi bisa membentuk Fe^{2+} atau Fe^{3+} , jadi namanya harus memberi tahu yang mana. Rumusnya Fe_2O_3 : hanya **dua** atom besi, walaupun angka Romawinya III. Bahwa jumlah O kebetulan tiga hanyalah kebetulan silang muatan, bukan arti angka Romawi.

Logam golongan 1 dan 2, aluminium, seng, dan perak hampir selalu bermuatan tunggal, jadi namanya tidak perlu angka Romawi. Banyak logam transisi (dan timah serta timbal) punya lebih dari satu muatan. Untuk mereka, **muatan ion ditulis dengan angka Romawi dalam kurung**, menempel pada nama logam (sistem Stock).

Ion	Nama IUPAC	Nama lama	Contoh senyawa
Fe^{2+}	besi(II)	fero	FeSO_4 besi(II) sulfat, tablet tambah darah
Fe^{3+}	besi(III)	feri	Fe_2O_3 besi(III) oksida, karat dan hematit
Cu^+	tembaga(I)	kupro	Cu_2O tembaga(I) oksida, endapan merah bata
Cu^{2+}	tembaga(II)	kupri	CuSO_4 tembaga(II) sulfat, terusi
Sn^{2+}	timah(II)	stano	SnF_2 timah(II) fluorida, pasta gigi
Sn^{4+}	timah(IV)	stani	SnO_2 timah(IV) oksida, kasiterit
Pb^{2+}	timbal(II)	plumbo	PbI_2 timbal(II) iodida, "hujan emas"



Angka Romawi menunjukkan **muatan ion logam**, bukan jumlah atom. Untuk menemukannya dari rumus, hitung mundur dari anion: dalam FeCl_3 , tiga Cl^- bermuatan total -3 , jadi besi $+3 \rightarrow$ besi(III) klorida. Dalam Cu_2O , satu O^{2-} diimbangi dua tembaga, masing-masing $+1 \rightarrow$ tembaga(I) oksida, bukan tembaga(II)!

Siapa yang butuh angka Romawi?

Kategori

1 H																
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I
55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No

■ Logam alkali
 ■ Logam alkali tanah
 ■ Logam transisi
 ■ Logam pascatransisi
 ■ Metaloid
 ■ Nonlogam
 ■ Halogen
 ■ Gas mulia
 ■ Lantanida
 ■ Aktinida

Unsur yang menyala umumnya bisa membentuk lebih dari satu ion, jadi namanya butuh angka Romawi. Ketuk unsurnya dan lihat baris "bilangan oksidasi umum". Bandingkan dengan **Na**, **Mg**, **Al**, dan **Zn** yang muatannya tunggal.



Bangka-Belitung adalah salah satu penghasil timah terbesar di dunia. Bijihnya, **kasiterit**, adalah **timah(IV) oksida**, SnO_2 ; muatan Sn^{4+} diimbangi dua O^{2-} . Kasiterit dilebur bersama karbon menjadi logam timah untuk solder elektronik dan pelapis kaleng. Nama IUPAC-nya yang lengkap, timah(IV) oksida, membedakannya dari timah(II) oksida, SnO , yang hitam.

LAB MINI Mesin Nama: rakit kation dan anionLAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-15**Rakit ion sampai muatan totalnya nol**

kation × 2



anion × 3



Neraca muatan

+	+	+	+	+	+
---	---	---	---	---	---

$$2 \times (+3) = +6$$

-	-	-	-	-	-
---	---	---	---	---	---

$$3 \times (-2) = -6$$
$$(+6) + (-6) = 0 \checkmark \text{ netral}$$



nama lama: feri oksida

 Karat dan bijih hematit.

Rumus

Fe₂O₃

Nama IUPAC

besi(III) oksida

Skor tebakan

0 / 0

Mode **Rakit**: pilih satu kation dan satu anion. Mesin menyusun ion-ion sampai muatannya nol, lalu menulis rumus dan nama IUPAC-nya (lengkap dengan angka Romawi). Coba $\text{Fe}^{3+} + \text{O}^{2-}$, lalu $\text{Fe}^{2+} + \text{O}^{2-}$. Mode **Tebak nama** dan **Tebak rumus**: ketuk jawaban yang benar. Bisakah kamu benar lima kali berturut-turut?

CONTOH Memberi nama dari rumus

Tuliskan nama IUPAC: (a) MgCl_2 , (b) Fe_2O_3 , (c) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

1 (a) Mg (golongan 2) selalu +2, tidak perlu Romawi. Cl^- = klorida. → **magnesium klorida**.

2 (b) Besi bermuatan ganda, jadi hitung muatannya: $3 \times (-2) = -6$ dibagi 2 atom Fe → +3. → **besi(III) oksida**.

3 (c) Dua ion poliatom: NH_4^+ amonium dan SO_4^{2-} sulfat. → **amonium sulfat** (pupuk ZA).

Magnesium klorida, besi(III) oksida, amonium sulfat. Perhatikan: tidak ada awalan "di-" atau "tri-" pada nama senyawa ion.

Tuliskan rumus kimia: (a) kalsium fosfat, mineral utama tulang; (b) timah(IV) oksida, bijih timah Bangka.

- 1 (a) Ion: Ca^{2+} dan PO_4^{3-} . Silangkan: 3 Ca dan 2 PO_4 .
- 2 Cek: $3 \times (+2) + 2 \times (-3) = 0$ ✓. Beri kurung pada fosfat $\rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.
- 3 (b) Angka Romawi IV berarti Sn^{4+} ; oksida = O^{2-} . Silang: Sn_2O_4 .
- 4 Sederhanakan $2 : 4 = 1 : 2 \rightarrow \text{SnO}_2$.

(a) $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; (b) SnO_2 . Langkah menyederhanakan sering terlupa. Sn_2O_4 bukan rumus yang benar untuk senyawa ion.

15.4

Senyawa kovalen biner: awalan "satu, dua, tiga" ala Yunani



Tebak Dulu!

CO dinamai karbon monoksida, dengan awalan "mono-". Mengapa NaCl tidak dinamai "natrium monoklorida"?

Karena natrium adalah logam yang lebih penting daripada karbon.

Karena NaCl senyawa ion: perbandingan ionnya sudah pasti dari muatan, jadi awalan tidak perlu.

Karena "monoklorida" terlalu panjang untuk ditulis di label garam.

Sebenarnya keduanya benar dan sama-sama dipakai IUPAC.

Jawabannya: karena NaCl senyawa ion. Na^+ dan Cl^- hanya bisa bergabung 1 : 1, jadi nama "natrium klorida" sudah cukup jelas. Karbon dan oksigen adalah dua nonlogam yang bisa bergabung dengan banyak cara (CO , CO_2 , bahkan C_3O_2), sehingga jumlah atomnya harus disebut lewat awalan.

Senyawa kovalen biner tersusun atas dua unsur nonlogam yang berbagi elektron, misalnya karbon dan oksigen, atau nitrogen dan oksigen. Karena dua nonlogam bisa bergabung dalam berbagai perbandingan, namanya memakai **awalan angka Yunani**.

Jumlah	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Awalan	mono	di	tri	tetra	penta	heksa	hepta	okta	nona	deka



ATURAN • MENAMAI SENYAWA KOVALEN BINER

1. Unsur yang lebih ke kiri/bawah di tabel periodik (kurang elektronegatif) ditulis dan disebut dulu. Urutan IUPAC: B, Si, C, P, N, H, S, I, Br, Cl, O, F.
2. Unsur kedua diberi akhiran **-ida**: oksida, klorida, fluorida, sulfida.
3. Jumlah atom setiap unsur dinyatakan dengan awalan. Awalan **mono-** **tidak dipakai** untuk unsur pertama: CO = karbon monoksida, bukan monokarbon monoksida.
4. Huruf vokal ganda yang canggung boleh dilebur: mono + oksida = **monoksida**.

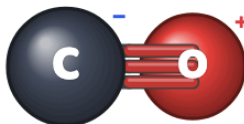
Rumus	Nama IUPAC	Cerita singkat
CO	karbon monoksida	gas tak berbau dari knalpot dan genset; mengikat hemoglobin
CO ₂	karbon dioksida	gelembung minuman bersoda, es kering
N ₂ O	dinitrogen oksida (dinitrogen monoksida)	"gas tawa", pembius ringan
NO ₂	nitrogen dioksida	gas cokelat penyebab kabut kota
N ₂ O ₄	dinitrogen tetraoksida	oksidator bahan bakar roket
SO ₂	belerang dioksida	gas menyengat dari kawah Ijen
SO ₃	belerang trioksida	bahan pembuat asam sulfat
CCl ₄	karbon tetraklorida	pelarut lama yang kini dilarang
PCl ₅	fosforus pentaklorida	pereaksi di laboratorium organik
SF ₆	belerang heksafluorida	gas isolator di gardu listrik
P ₄ O ₁₀	tetrafosforus dekaoksida	pengering yang sangat rakus air
SiO ₂	silikon dioksida	pasir kuarsa, bahan kaca

Beberapa senyawa kovalen sudah begitu terkenal sehingga IUPAC tetap memakai nama umumnya: H₂O **air**, NH₃ **amonia**, CH₄ **metana**. Senyawa hidrogen dengan halogen dinamai "hidrogen ...ida": HCl hidrogen klorida (dalam

bentuk gas).

MOLEKUL 3D

Awalan Yunani dalam 3D



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Karbon monoksida CO Mr ≈ 28,01

Ikatan rangkap tiga (dua kovalen biasa + satu kovalen koordinasi dari O), panjang 113 pm. Gas tak berbau dan beracun dari pembakaran tidak sempurna; mengikat hemoglobin lebih kuat daripada O₂.

Pilih molekul, lalu cocokkan jumlah atomnya dengan awalan pada namanya: karbon **monoksida** (1 O), **dinitrogen tetraoksida** (2 N, 4 O), belerang **heksafluorida** (6 F). Ketuk tiga atom F pada SF₆ untuk mengukur sudut F-S-F. Berapa derajat?



AWAS JEBAKAN

Awalan jumlah **hanya** untuk senyawa kovalen dari dua nonlogam. Al₂O₃ adalah aluminium oksida, bukan "dialuminium trioksida". Sebaliknya, N₂O₄ **wajib** berawalan: "nitrogen oksida" saja bisa berarti NO, NO₂, N₂O, atau N₂O₅.



TRIK KAK TIRTA · MENGHAFAK AWALAN

Kamu sudah mengenal awalan ini dari kata sehari-hari: **monorel** (satu rel), **dioda**, **trisula**, **tetrapod** pemecah ombak (4 kaki), **pentagon** (5 sisi), **heksagon** sarang lebah, **oktaf** (8 nada), **dekade** (10 tahun). Kimo menambahkan: "**Hepta** = 7, seperti heptathlon, lomba tujuh cabang!"

(a) Tuliskan rumus difosforus pentaoksida dan belerang heksafluorida. (b) Beri nama Cl_2O_7 dan CS_2 .

1 (a) di = 2 P, penta = 5 O $\rightarrow \text{P}_2\text{O}_5$. Heksa = 6 F, tanpa awalan pada belerang (berarti 1) $\rightarrow \text{SF}_6$.

2 (b) Cl_2O_7 : 2 Cl = di, 7 O = hepta $\rightarrow$ diklorin heptaoksida.

3 CS_2 : 1 C (tanpa mono), 2 S = di, unsur kedua berakhiran -ida $\rightarrow$ karbon disulfida.

P_2O_5 , SF_6 , **diklorin heptaoksida**, **karbon disulfida**. **Cek silang: biloks Cl dalam Cl_2O_7 = +7, sama dengan Cl dalam perklorat.**



KIMIA NUSANTARA · API BIRU DAN ASAP KUNING DI IJEN

Di kawah Ijen, Banyuwangi, gas vulkanik yang kaya belerang menyala biru di malam hari. Saat terbakar, belerang menjadi **belerang dioksida**, SO_2 , gas menyengat yang membuat mata pedih. Para penambang memikul bongkahan belerang kuning dari pipa-pipa di tepi danau kawah, sering hanya bermasker kain basah. Nama "dioksida" langsung memberi tahu: satu atom S, dua atom O.

15.5 Asam, basa, garam, dan hidrat

Banyak zat di dapur dan di laboratorium termasuk salah satu dari tiga keluarga besar: asam, basa, dan garam. Masing-masing punya pola nama yang khas. (Sifat asam-basa dibahas tuntas di Bab 26.)

Asam: "asam" + nama anionnya

Menurut Arrhenius, **asam** adalah zat yang melepaskan ion H^+ dalam air. Rumusnya biasanya diawali H, dan namanya cukup dibentuk dari kata "asam" ditambah nama anionnya.

Rumus	Anion	Nama asam	Di sekitar kita
HCl	Cl^- klorida	asam klorida	cairan lambung, pembersih porselen
H_2S	S^{2-} sulfida	asam sulfida	bau telur busuk di sumber air panas
HNO_3	NO_3^- nitrat	asam nitrat	bahan pupuk dan bahan peledak tambang
H_2SO_4	SO_4^{2-} sulfat	asam sulfat	air aki
H_3PO_4	PO_4^{3-} fosfat	asam fosfat	pengasam minuman bersoda

H_2CO_3	CO_3^{2-} karbonat	asam karbonat	terbentuk saat CO_2 larut dalam minuman bersoda
CH_3COOH	CH_3COO^- asetat	asam asetat (asam etanoat)	cuka, kuah cuko pempek
HClO	ClO^- hipoklorit	asam hipoklorit	pembunuh kuman pada air berkaporit
$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ oksalat	asam oksalat	belimbing wuluh, pembersih noda karat



SATU RUMUS, DUA NAMA

HCl(g) berupa gas disebut **hidrogen klorida** (senyawa kovalen). Setelah larut dalam air, HCl(aq) disebut **asam klorida**, karena di air ia melepaskan H^+ . Wujud zat ikut menentukan namanya!

MOLEKUL 3D Asam-asam di sekitarmu



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Hidrogen klorida ClH

Mr $\approx 36,46$

[PubChem](#)

Larutannya adalah asam klorida; asam lambung kita mengandung HCl.

Kebanyakan atom H yang "asam" terikat pada atom O. Hitung: asam sulfat punya berapa H seperti itu? Asam asetat punya 4 atom H, tetapi hanya 1 yang lepas sebagai H^+ . Temukan yang mana dengan memutar molekulnya.

Basa: nama logam + "hidroksida"

Basa Arrhenius melepaskan ion OH^- dalam air. Kebanyakan basa adalah senyawa ion logam dengan hidroksida, jadi namanya mengikuti aturan senyawa ion: NaOH natrium hidroksida (soda api), KOH kalium hidroksida, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kalsium hidroksida (kapur sirih), $\text{Mg}(\text{OH})_2$ magnesium hidroksida dan $\text{Al}(\text{OH})_3$ aluminium hidroksida (obat maag), $\text{Fe}(\text{OH})_3$ besi(III) hidroksida (endapan cokelat kemerahan). Amonia dalam air, $\text{NH}_3(\text{aq})$, sering diberi label "amonium hidroksida".

Garam: kation dari basa, anion dari asam

Bila asam bereaksi dengan basa, terbentuk air dan **garam**, yaitu senyawa ion yang kationnya berasal dari basa dan anionnya dari asam. Contohnya $\text{HCl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$. Namanya mengikuti aturan senyawa ion: kalium nitrat KNO_3 , amonium sulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, kalsium karbonat CaCO_3 . Garam yang masih membawa H dari asamnya diberi kata "hidrogen": NaHCO_3 **natrium hidrogen karbonat** (soda kue), NaH_2PO_4 natrium dihidrogen fosfat.

Hidrat: garam yang membawa air

Kristal beberapa garam menjebak molekul air di dalam kisinya. Air ini disebut **air kristal**, dan garamnya disebut **hidrat**. Dalam rumus, air kristal ditulis setelah titik tengah; dalam nama, jumlahnya disebut dengan awalan Yunani + "hidrat".



Rumus	Nama IUPAC	Nama dagang / kegunaan
$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	tembaga(II) sulfat pentahidrat	terusi, kristal biru untuk kolam
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	magnesium sulfat heptahidrat	garam inggris
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	kalsium sulfat dihidrat	gips, batu tahu
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	natrium karbonat dekahidrat	soda kristal, soda cuci
$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	kalium aluminium sulfat dodekahidrat	tawas
$\text{CoCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	kobalt(II) klorida heksahidrat	penanda basah pada silika gel lama (biru $\rightarrow$ merah muda)

Saat terusi biru dipanaskan, air kristalnya menguap dan tersisa serbuk putih CuSO_4 anhidrat ("tanpa air"). Teteskan air, warna birunya kembali! Di Bab 17 kamu akan menghitung jumlah air kristal dari data penimbangan.

Sebungkus garam Inggris berlabel $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. (a) Tuliskan nama IUPAC-nya. (b) Berapa jumlah atom O dan atom H dalam satu satuan rumus? (c) Berapa biloks S?

1 (a) Mg^{2+} (tanpa Romawi) + SO_4^{2-} sulfat + 7 air = hepta → **magnesium sulfat heptahidrat**.

2 (b) Atom O: 4 (dari sulfat) + 7×1 (dari air) = 11. Atom H: $7 \times 2 = 14$.

3 (c) Dalam SO_4^{2-} : $x + 4(-2) = -2$, jadi $x = +6$. Air kristal tidak mengubah biloks.

(a) **Magnesium sulfat heptahidrat**; (b) **11 atom O dan 14 atom H**; (c) **S = +6**. Satu satuan rumus berisi $1 + 1 + 11 + 14 = 27$ atom!



LANJUT · IB & OLIMPIADE

SEKILAS NAMA SENYAWA KOMPLEKS

Ion logam transisi bisa dikelilingi molekul atau ion lain (**ligan**) yang menyumbangkan pasangan elektron, membentuk **ion kompleks** yang ditulis dalam kurung siku. Aturan singkatnya:

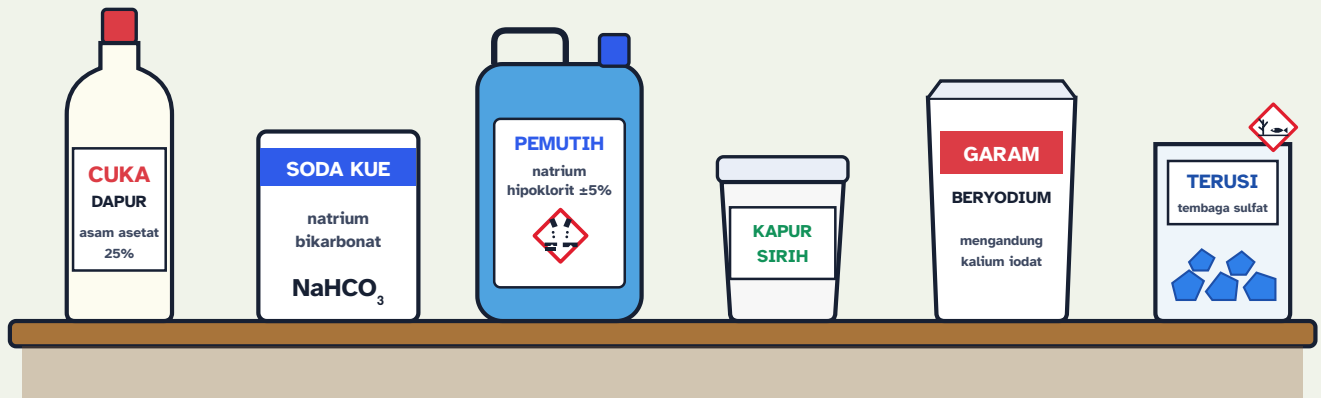
- Ligan disebut dulu (berurutan abjad), lalu logamnya, lalu biloks logam dalam angka Romawi. Ligan netral: NH_3 **amin**, H_2O **akua**; ligan anion berakhiran -ido: Cl^- **klorido**, CN^- **sianido**.
- $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$ = **tetraamintembaga(II) sulfat**, larutan biru tua yang memukau di laboratorium.
- Bila ion kompleksnya bermuatan negatif, nama logam berakhiran **-at**, sering dari akar Latin: $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ = **kalium heksasianidoferat(II)**. Zat ini dipakai sebagai antigumpal pada sebagian garam dapur. Sianidanya terikat sangat kuat pada besi, sehingga tidak berbahaya pada kadar yang diizinkan.

15.6

Nama dagang ↔ nama IUPAC: membaca label di warung

Kembali ke kisah Bima. Di toko, orang memakai **nama dagang** (nama sehari-hari) yang berbeda-beda antardaerah: soda kue, soda api, kapur sirih, terusi. Di laboratorium, apotek, dan BPOM, semua orang memakai **nama IUPAC** yang sama di seluruh dunia. Kemampuan menerjemahkan keduanya bisa menyelamatkan nyawa.

Rak warung: label mana yang menyebut nama kimianya?



Sebagian label menulis nama kimia (cuka, soda kue, pemutih, garam beryodium), sebagian hanya nama dagang (kapur sirih). Bisakah kamu menuliskan rumus dan nama IUPAC keenamnya? Jawabannya ada di tabel berikut.

Nama dagang	Rumus	Nama IUPAC	Dipakai untuk
Garam dapur	NaCl	natrium klorida	bumbu, pengawet ikan asin
Cuka	CH_3COOH	asam asetat (asam etanoat)	acar, kuah cuko pempek (diencerkan)
Soda kue	NaHCO_3	natrium hidrogen karbonat	pengembang kue, obat maag
Soda api (soda kaustik)	NaOH	natrium hidroksida	pembuatan sabun, pembersih saluran; korosif!
Soda abu	Na_2CO_3	natrium karbonat	deterjen, kaca, bahan air abu (air ki) untuk mi kuning
Batu kapur / gamping, kapur tulis	CaCO_3	kalsium karbonat	semen, penetral tanah asam (banyak kapur tulis modern dibuat dari gips)
Kapur tohor (kapur hidup)	CaO	kalsium oksida	bahan bangunan; sangat panas bila disiram air
Kapur sirih (kapur mati)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	kalsium hidroksida	nginang, merenyahkan keripik, air kapur
Tawas	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	kalium aluminium sulfat dodekahidrat	penjernih air, deodoran

Garam inggris	$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	magnesium sulfat heptahidrat	garam berendam, pencahar (dengan anjuran dokter)
Pemutih pakaian	NaClO (larutan $\pm 5\%$)	natrium hipoklorit	pemutih dan disinfektan; sering ditulis NaOCl
Kaporit	$\text{Ca}(\text{ClO})_2$	kalsium hipoklorit	disinfektan air sumur dan kolam renang
Terusi	$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	tembaga(II) sulfat pentahidrat	pembasmi lumut kolam, fungisida
Garam beryodium	$\text{NaCl} + \text{KIO}_3$	natrium klorida + kalium iodat	mencegah gondok
Gips / batu tahu	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	kalsium sulfat dihidrat	penggumpal tahu, pembalut patah tulang
Pupuk ZA	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	amonium sulfat	pupuk nitrogen dan belerang
Sendawa	KNO_3	kalium nitrat	pupuk, bahan mesiu (sejarah)
Nisadar (salmiak)	NH_4Cl	amonium klorida	baterai kering, fluks patri
Boraks (bleng)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	natrium tetraborat dekahidrat	dilarang untuk pangan (bakso, kerupuk)
Karbit	CaC_2	kalsium karbida	las karbit; menghasilkan gas asetilena
Es kering	$\text{CO}_2 (\text{s})$	karbon dioksida padat	pendingin es krim dan efek kabut panggung
Gas tawa	N_2O	dinitrogen oksida	pembius ringan
Air aki (air zuur, tutup merah)	$\text{H}_2\text{SO}_4 (\text{aq})$	asam sulfat encer	elektrolit aki basah



KIMIA NUSANTARA • KIMIA DI RAK WARUNG

Hampir semua warung di Indonesia adalah "toko kimia" kecil. Ada **cuka** (asam asetat), **garam beryodium** yang wajib mengandung **kalium iodat** agar penduduk tidak kekurangan yodium, **kapur sirih** untuk nginang dan merenyahkan keripik, **pemutih** (natrium hipoklorit), serta di toko pertanian ada **terusi** untuk kolam ikan dan pupuk ZA. Beberapa nama dagang bahkan berasal dari bahasa Belanda: "ZA" dari *zwavelzure ammoniak* (amonium sulfat), dan "air zuur" untuk air aki (*zuur* = asam).



KESELAMATAN

Soda api (NaOH) dan pemutih (NaClO) bersifat **korosif**. Untuk tugas di bab ini, cukup **baca dan foto labelnya**: jangan membuka, mencium, mencicipi, atau menuanginya. **Jangan pernah mencampur pemutih dengan pembersih lain**: campuran dengan pembersih porselen yang berisi asam atau dengan pembersih beramonia melepaskan gas beracun. Simpan keduanya di tempat tinggi, jauh dari jangkauan anak dan jauh dari bahan makanan.



Korosif



Iritan



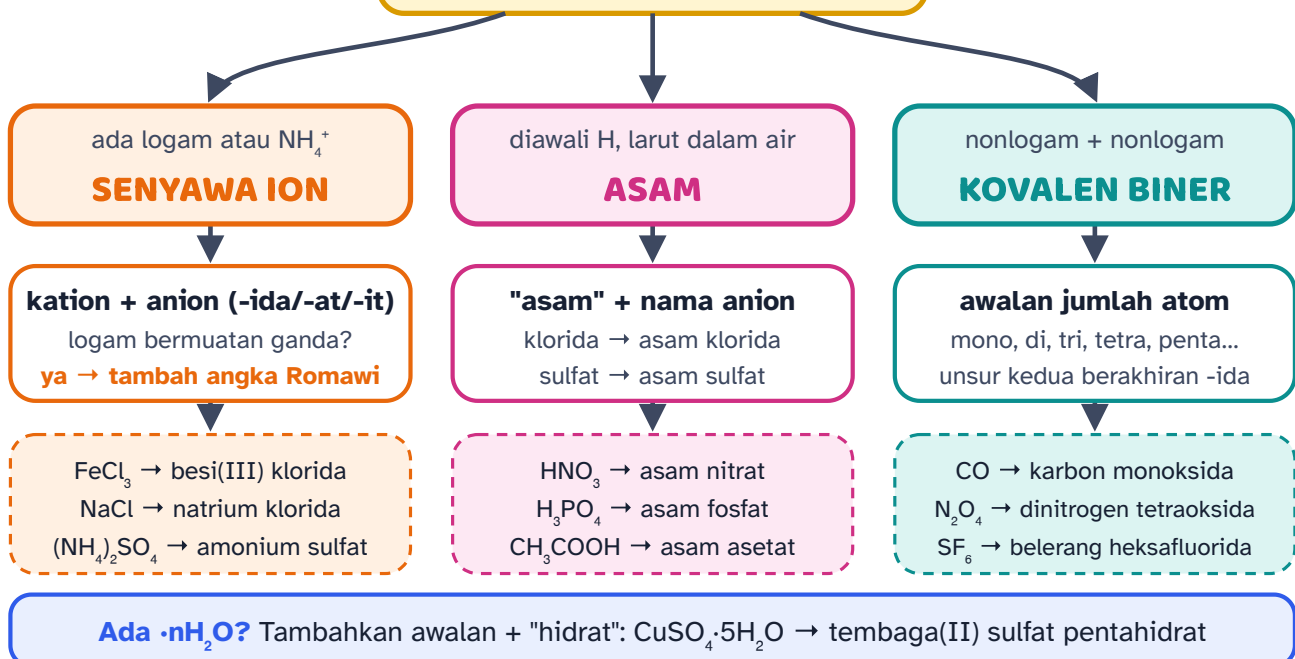
Bahaya lingkungan



TAMU DARI MASA LALU

Sebelum 1787, nama zat kimia kacau. Asam sulfat disebut "minyak vitriol", seng oksida "bunga seng", dan terusi "vitriol biru". Pada 1787, **Antoine Lavoisier** bersama Guyton de Morveau, Berthollet, dan Fourcroy menerbitkan *Méthode de nomenclature chimique*: nama zat harus mencerminkan penyusunnya. Itulah cikal bakal nama IUPAC. Namun nama dagang tetap bertahan. "Garam Inggris", misalnya, berasal dari mata air pahit di kota Epsom, Inggris, yang terkenal sejak abad ke-17. Kristalnya ternyata magnesium sulfat heptahidrat.

Senyawa apa yang kamu hadapi?



Peta keputusan tata nama. Mulai dari atas: kenali jenis senyawanya dulu, baru pilih aturan namanya.

MITOS

"Soda kue, soda abu, dan soda api sama-sama soda, jadi sama saja."

FAKTA

Berbeda jauh! Soda kue



aman untuk kue, soda abu



basa untuk deterjen, soda api



sangat korosif. Baca rumusnya, bukan nama dagangnya.

MITOS

"Angka III pada besi(III) oksida berarti ada tiga atom besi."

FAKTA

Angka Romawi adalah muatan ion logam, yaitu



. Rumusnya



: hanya dua atom besi.

MITOS

"Huruf besar atau kecil dalam rumus tidak penting."

FAKTA

Sangat penting! Co adalah kobalt (logam), CO adalah karbon monoksida (gas beracun). NO adalah nitrogen monoksida, No adalah unsur nobelium.

MITOS

"Mencampur pemutih dengan pembersih lain membuat cucian lebih bersih."

FAKTA

Berbahaya! Pemutih yang bercampur pembersih berisi asam atau amonia melepaskan gas beracun. Pakai satu produk saja, dan bilas bersih sebelum memakai produk lain.

Di toko bangunan, Laras menemukan sekarung serbuk berlabel "Kaporit 60%, kalsium hipoklorit. Jangan dicampur dengan asam." (a) Tuliskan rumus kalsium hipoklorit. (b) Tentukan biloks Cl. (c) Hitung M_r -nya (Ar Ca = 40, Cl = 35,5, O = 16). (d) Mengapa ada peringatan "jangan dicampur dengan asam"?

- 1 (a) Ion: Ca^{2+} dan hipoklorit ClO^- . Silang: 1 Ca, 2 ClO $\rightarrow \text{Ca}(\text{ClO})_2$.
- 2 (b) Dalam ClO^- : $x + (-2) = -1$, sehingga $x = +1$.
- 3 (c) $M_r = 40 + 2(35,5 + 16) = 40 + 103 = 143$.
- 4 (d) Hipoklorit mengandung klorin berbiloks +1 yang siap menerima elektron. Bila bertemu asam, terbentuk gas klorin (Cl_2) yang beracun, terutama di ruang tertutup.

(a) $\text{Ca}(\text{ClO})_2$; (b) +1; (c) 143; (d) agar tidak terbentuk gas klorin beracun. Satu label, empat konsep kimia: rumus, biloks, Mr, dan keselamatan!

Kimia di sekitarmu



Garam beryodium

Kalium iodat, KIO_3 , dicampurkan ke garam dapur untuk mencegah gondok dan membantu perkembangan otak anak.



Terusi di kolam ikan

Sejumput tembaga(II) sulfat pentahidrat membasmi lumut dan jamur. Dosisnya harus kecil, karena ion Cu^{2+} berlebih justru meracuni ikan.



Kapur sirih & keripik renyah

Merendam irisan pisang atau singkong dalam air kapur sirih, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, membuat keripik lebih renyah. Ion kalsium menguatkan dinding sel tumbuhan.



Air bersih PDAM

Aluminium sulfat, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, menggumpalkan lumpur halus sehingga mengendap. Kaporit lalu membunuh kuman.



Tablet tambah darah

Tablet untuk remaja putri berisi besi(II) sulfat atau besi(II) fumarat. Angka Romawi II penting: tubuh menyerap Fe^{2+} lebih baik.



Tinta pemilu

Tinta di jari pemilih umumnya mengandung perak nitrat, AgNO_3 . Ion Ag^+ bereaksi dengan kulit dan cahaya membentuk noda gelap yang bertahan berhari-hari.

Cek Cepat

Nama IUPAC CuO adalah ...

tembaga oksida

tembaga(I) oksida

tembaga(II) oksida

monotembaga monoksida

Rumus kimia kalsium nitrat adalah ...

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

CaNO_3

Ca_2NO_3

$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$

Nama senyawa SO_3 adalah ...

sulfat

belerang(III) oksida

monobelerang trioksida

belerang trioksida

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D



Tantangan Rumah: kamus nama dagang ↔ IUPAC

Bahan: kemasan produk di dapur dan kamar mandi (cuka, soda kue, garam, pasta gigi, sabun, deterjen, pemutih), buku catatan, ponsel untuk memotret, tabel di subbab 15.3 dan 15.6.

1. Bersama orang dewasa, kumpulkan atau potret label 8 produk. Cari bagian "komposisi" atau "bahan aktif".
2. Catat setiap nama kimia yang tertulis, misalnya "natrium bikarbonat" atau "natrium fluorida".
3. Tuliskan rumus kimianya dan nama IUPAC yang tepat. Untuk ion, pakai tabel ion di subbab 15.3.
4. Kelompokkan: senyawa ion, kovalen, asam, basa, garam, hidrat, atau campuran.
5. Susun "kamus" dua kolom: nama dagang ↔ nama IUPAC, lengkap dengan pictogram bahaya yang kamu temukan.

Keselamatan: tugas ini hanya **membaca label**. Jangan membuka tutup, mencium, mencicipi, menuang, apalagi mencampur isi kemasan. Untuk pemutih, soda api, pembersih porselen, dan pestisida, cukup potret labelnya lalu kembalikan ke tempat penyimpanan yang tinggi. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Senyawa apa yang paling sering muncul di rumahmu? Adakah produk yang hanya menulis nama dagang tanpa nama kimia? Menurutmu, mengapa label yang lengkap penting bagi pembeli?



RINGKASAN KILAT

Bab 15 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membaca **lambang unsur** dan **rumus kimia**, serta membedakan rumus molekul, rumus empiris, dan rumus struktur
- menentukan **bilangan oksidasi** unsur dalam senyawa dan ion
- menulis rumus dan **nama IUPAC senyawa ion** (biner dan poliatom), termasuk **angka Romawi** untuk logam bermuatan ganda
- menamai **senyawa kovalen biner** dengan awalan mono-, di-, tri-, dan seterusnya

- menamai **asam, basa, garam, dan hidrat**, lalu menerjemahkan **nama dagang** di label produk menjadi nama IUPAC

Istilah kunci

Lambang unsur

rumus kimia

indeks

koefisien

Rumus molekul

Rumus empiris

Rumus struktur

bilangan oksidasi

Bilangan oksidasi

Valensi

kation

anion

Senyawa kovalen biner

awalan angka Yunani

asam

Basa

Rumus penting

$$N = k \times p \times q$$

Jumlah atom dalam rumus. Jumlah atom suatu unsur sama dengan koefisien dikali indeks di luar kurung dikali indeks di dalam kurung.

$$x = \frac{q - a(+1) - b(-2)}{n}$$

Bilangan oksidasi dari jumlah nol. Biloks unsur yang dicari sama dengan muatan total dikurangi sumbangan H dan sumbangan O, lalu dibagi jumlah atom unsur itu.

$$x = \frac{b}{\text{FPB}(a, b)}, \quad y = \frac{a}{\text{FPB}(a, b)}$$

Silang muatan: berapa ion yang dibutuhkan?.

Jumlah kation (x) adalah besar muatan anion, dan jumlah anion (y) adalah besar muatan kation, setelah keduanya dibagi faktor persekutuan terbesarnya.

Jangan sampai terjebak

- Huruf besar dan kecil mengubah arti.
- Angka Romawi menunjukkan muatan ion logam, bukan jumlah atom.
- Awalan jumlah hanya untuk senyawa kovalen dari dua nonlogam.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=15

Teka-teki untuk Bab 16

Sekarang kamu sudah fasih "mengeja" zat. Saatnya merangkai kalimat kimia! Kayu bakar yang dibakar di tungku berubah menjadi abu yang jauh lebih ringan. Apakah massanya benar-benar hilang? Ke mana perginya?

▼ Intip petunjuk

Kayu tersusun atas senyawa C, H, dan O. Saat terbakar, kayu bereaksi dengan oksigen udara menjadi gas CO₂ dan uap air yang terbang ke udara. Bila semua gas itu ditangkap dan ditimbang, massa total sebelum dan sesudah reaksi ternyata sama. Inilah hukum kekekalan massa Lavoisier, dan cara menuliskannya sebagai **persamaan reaksi yang setara** adalah petualangan Bab 16.

16 Persamaan Reaksi: Tak Ada Atom yang Hilang

Lilin memendek, kayu menjadi abu, paku berkarat malah bertambah berat. Ke mana massa pergi, dan dari mana massa datang? Jawabannya tertulis dalam "kalimat" kimia yang disebut persamaan reaksi.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menulis **persamaan reaksi** dari kalimat, lengkap dengan lambang wujud zat (s), (l), (g), (aq);
- **menyetarakan** persamaan reaksi dengan cara inspeksi dan cara aljabar, tanpa mengubah rumus zat;
- menjelaskan dan memakai **hukum Lavoisier**, **hukum Proust**, dan **hukum Dalton** untuk mengolah data massa;
- menghitung volume gas dengan **hukum Gay-Lussac** dan menjelaskannya dengan **hipotesis Avogadro**;
- menggolongkan **jenis reaksi** dan menulis **persamaan ion bersih**.

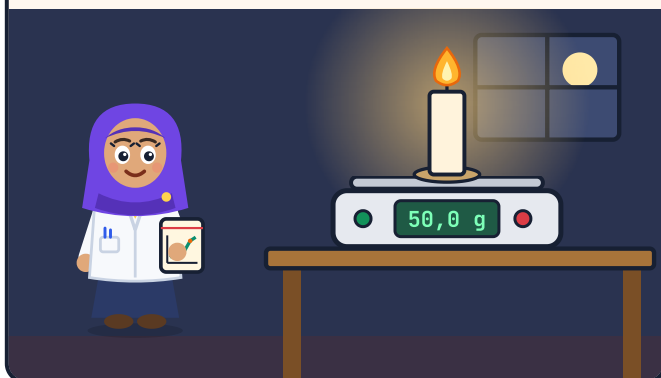
LILIN YANG MENYUSUT

KOMIK · 4 PANEL

Malam hari, listrik padam di rumah Laras

LARAS

Sebelum dinyalakan, lilin ini 50,0 gram. Satu jam lagi aku timbang ulang. Penasaran!



Satu jam kemudian...

BIMA

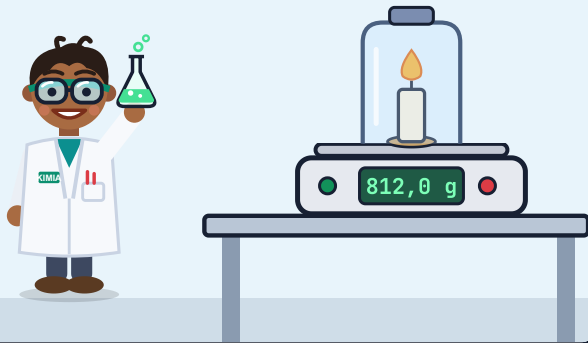
Tinggal 44,0 gram! Enam gram lilin lenyap ditelan api. Berarti Lavoisier salah, massa bisa hilang!



Esoknya, di laboratorium sekolah

KAK TIRTA

Lilinnya tidak lenyap, Bim! Ia berubah menjadi gas CO_2 dan uap air yang kabur ke udara. Ayo kurung lilin dalam toples, lalu timbang semuanya.



Lima menit kemudian...

LARAS

Nyalanya padam sendiri, tetapi angkanya tetap 812,0 gram!

KIMO

Atom C dan H dari lilin cuma pindah ke CO_2 dan H_2O . Tak satu atom pun hilang!



Tebak Dulu!

Sebatang paku besi bermassa 10 g dibiarkan di udara lembap sampai berkarat. Karat tidak dikerok sedikit pun. Bagaimana massa paku berkarat itu?

Lebih kecil dari 10 g, karena besinya "dimakan" karat.

Tetap 10 g, karena massa selalu kekal.

Lebih besar dari 10 g.

Tidak bisa diperkirakan sama sekali.

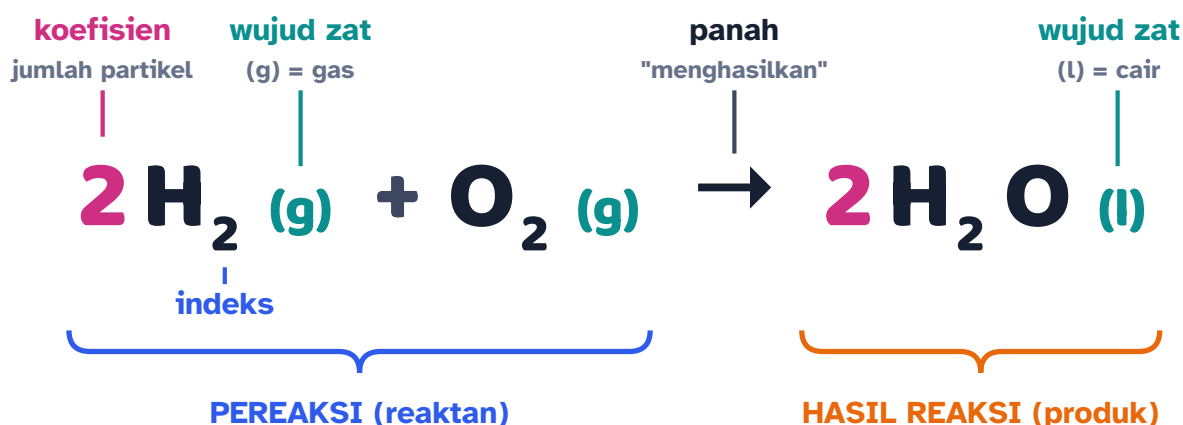
Jawabannya: lebih besar. Karat terbentuk ketika besi mengikat oksigen dan uap air dari udara. Atom-atom dari udara itu ikut menempel di paku, sehingga massanya bertambah. Massa tetap kekal bila kita menghitung **semua** zat: besi + oksigen + air = karat. Bab ini membongkar teka-teki "massa hilang" dan "massa bertambah" seperti ini.

16.1 Menulis "kalimat" kimia

Setiap hari dapurmu menjadi panggung reaksi kimia. Gas LPG terbakar di kompor, adonan kue mengembang oleh soda kue, dan nasi yang dibiarkan sehari-hari menjadi basi. Pada setiap reaksi, **ikatan antaratom putus, lalu atom-atom itu berpasangan dengan cara baru**. Atomnya sendiri tidak dibuat dan tidak dimusnahkan; mereka hanya ditata ulang.

Bahasa sederhana • Bayangkan atom sebagai balok mainan. Reaksi kimia seperti membongkar rumah-rumahan dari balok, lalu menyusun balok yang sama menjadi mobil-mobilan. Bentuknya berubah, tetapi jumlah baloknya tetap. Persamaan reaksi adalah catatan "resep": balok apa yang dibongkar dan bangunan apa yang jadi.

Kimiawan menuliskan peristiwa itu sebagai **persamaan reaksi**. Zat di kiri panah disebut **pereaksi** (reaktan); zat di kanan panah disebut **hasil reaksi** (produk). Contohnya pembakaran metana, komponen utama gas alam dan biogas:



Anatomi sebuah persamaan reaksi. **Indeks** (angka kecil) adalah bagian dari rumus dan tidak boleh diubah. **Koefisien** (angka besar di depan) menyatakan perbandingan jumlah partikel dan boleh diubah untuk menyetarakan.



DEFINISI • PERSAMAAN REAKSI

Persamaan reaksi adalah cara menuliskan reaksi kimia memakai rumus kimia. Isinya: rumus pereaksi dan hasil reaksi, **koefisien** yang menyatakan perbandingan jumlah partikel, dan **lambang wujud zat**. Persamaan disebut **setara** bila jumlah setiap jenis atom (dan jumlah muatan listrik) di ruas kiri sama dengan di ruas kanan.

Lambang	Arti	Contoh
(s)	<i>solid</i> , padat	$\text{NaCl}(\text{s})$ garam dapur, $\text{CaCO}_3(\text{s})$ batu kapur
(l)	<i>liquid</i> , cair (zat murni)	$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ air, $\text{Hg}(\text{l})$ raksa, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$ etanol murni
(g)	<i>gas</i>	$\text{O}_2(\text{g})$, $\text{CO}_2(\text{g})$, $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g})$ propana dalam LPG
(aq)	<i>aqueous</i> , larut dalam air	$\text{NaCl}(\text{aq})$ air garam, $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq})$ cuka dapur

Ada pula tanda tambahan: $\text{CaCO}_3(\text{s}) \xrightarrow{\Delta} \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$ (segitiga Δ di atas panah = dipanaskan), panah ke atas untuk gas yang keluar, $\text{CO}_2 \uparrow$, panah ke bawah untuk endapan, $\text{AgCl} \downarrow$, dan panah bolak-balik untuk reaksi yang dapat berbalik arah, $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$ (dibahas di Bab 22).



TRIK KIMO • TUJUH UNSUR YANG SELALU BERPASANGAN

Tujuh unsur berupa molekul dwiatom bila berdiri sendiri: H_2 , N_2 , O_2 , F_2 , Cl_2 , Br_2 , I_2 . Cara mengingatnya: di tabel periodik, mulailah dari unsur nomor **7** (nitrogen), lalu "gambar" angka 7: $\text{N} \rightarrow \text{O} \rightarrow \text{F}$, kemudian turun ke $\text{Cl} \rightarrow \text{Br} \rightarrow \text{I}$. Tambahkan H, si mungil yang tinggal sendirian di pojok kiri atas.

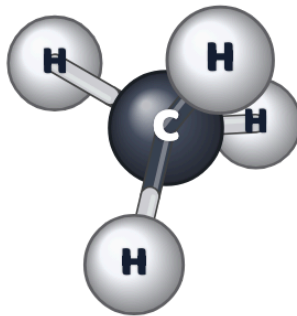
CONTOH Dari kalimat ke persamaan

Pita magnesium dibakar di udara. Ia menyala putih menyilaukan dan berubah menjadi serbuk putih magnesium oksida. Tuliskan persamaan reaksinya lengkap dengan wujud zat.

- 1 Tulis rumus setiap zat: magnesium $\text{Mg}(\text{s})$, gas oksigen $\text{O}_2(\text{g})$ (ingat, oksigen di udara berupa molekul dwiatom), magnesium oksida $\text{MgO}(\text{s})$.
- 2 Susun kerangkanya: $\text{Mg}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{MgO}(\text{s})$.
- 3 Hitung atom O: kiri 2, kanan 1. Tulis koefisien 2 di depan MgO . Sekarang Mg di kanan menjadi 2, jadi tulis 2 di depan Mg.
- 4 Periksa: $\text{Mg } 2 = 2$, $\text{O } 2 = 2 \checkmark$

$2\text{Mg}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow 2\text{MgO}(\text{s})$. Dua atom magnesium "memperebutkan" satu molekul oksigen, dan masing-masing mendapat satu atom O.

MOLEKUL 3D Atom yang sama, pasangan baru



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Metana CH₄

Mr ≈ 16,04

[PubChem](#) ↗

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

Pembakaran metana memutus ikatan C–H dan O=O, lalu membentuk ikatan C=O dan O–H yang baru. Putar setiap molekul dan hitung atomnya: satu CH₄ dan dua O₂ punya atom yang persis sama dengan satu CO₂ dan dua H₂O. Lihat juga asetilena dari karbit, etanol dari tapai, dan glukosa yang difermentasi. Ketuk **C** **H** **O** untuk kartu unsurnya.

16.2 Menyetarakan persamaan reaksi

Pada 1803, John Dalton mengajukan teori atom: dalam reaksi kimia, atom tidak diciptakan, tidak dimusnahkan, dan tidak berubah menjadi atom unsur lain. Akibatnya sederhana tetapi tegas: **jumlah setiap jenis atom di ruas kiri harus sama dengan di ruas kanan**. Persamaan yang memenuhinya disebut setara.



Tebak Dulu!

Bima ingin menyetarakan $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$. Ia mengganti H_2O menjadi H_2O_2 supaya atom O di kanan juga 2. Bolehkah?

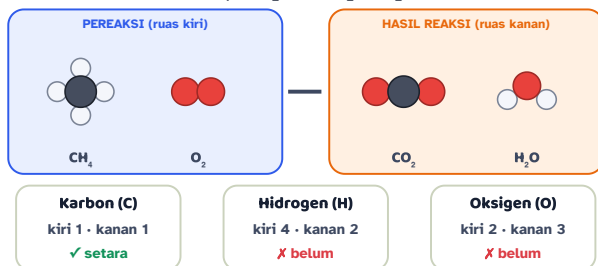
Boleh, karena jumlah atom H dan O sekarang sudah sama.

Tidak boleh, karena H_2O_2 adalah zat lain, bukan air.

Boleh, asalkan ditulis lambang wujud zatnya.

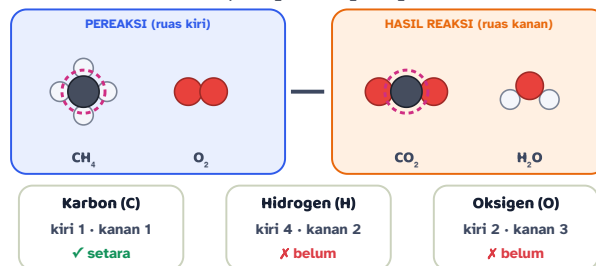
Tidak boleh, karena angka di kanan tidak boleh lebih besar dari angka di kiri.

Jawabannya: tidak boleh. H_2O_2 adalah hidrogen peroksida, cairan pemutih dan antiseptik, bukan air yang kita minum. Mengubah indeks berarti mengganti zatnya. Yang boleh diubah hanyalah **koefisien**:
 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$.

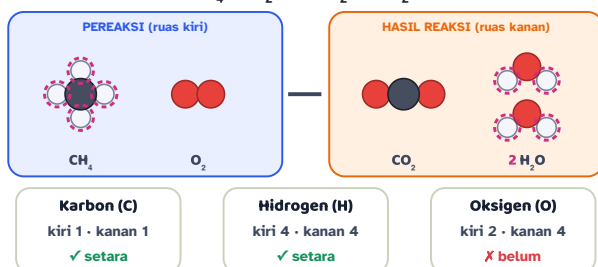


Langkah 1. Tulis dulu rumus yang benar:

$\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Gambar partikelnya, lalu hitung atom setiap unsur di kedua ruas. Karbon sudah sama, tetapi hidrogen dan oksigen belum.



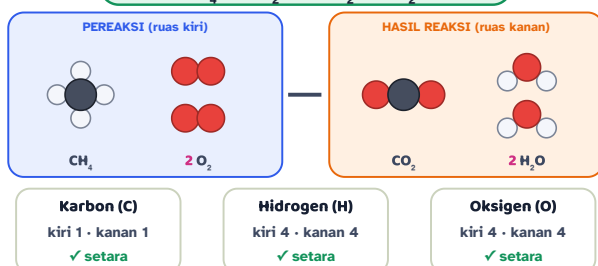
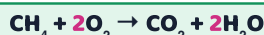
Langkah 2. Mulailah dari unsur yang hanya ada di satu zat pada setiap ruas: **karbon**. Kiri 1 atom C, kanan 1 atom C. Koefisien CH₄ dan CO₂ tetap 1.



Langkah 3. Berikutnya **hidrogen**: kiri 4, kanan baru 2. Tulis koefisien 2 di depan H₂O (indeksnya tidak diubah!). Muncul satu molekul air lagi. H sekarang 4 = 4, tetapi atom O di kanan menjadi 2 + 2 = 4.



Langkah 4. **Oksigen** paling akhir: kanan 4 atom O, kiri baru 2. Koefisien 2 di depan O₂ memberi 2 × 2 = 4 atom O. Satu molekul oksigen lagi masuk ke ruas kiri.



Langkah 5. Selesai: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Kedua ruas sama-sama punya 1 C, 4 H, dan 4 O. Ikatan putus dan terbentuk, tetapi tidak ada atom yang muncul atau lenyap.



ATURAN • MENYETARAKAN DENGAN CARA INSPEKSI

1. Tulis rumus semua zat dengan benar. Setelah itu, rumus (indeks) **tidak boleh diubah** lagi.
2. Setarakan dulu unsur yang hanya muncul di satu zat pada setiap ruas (biasanya logam, lalu C).
3. Setarakan H, kemudian O paling akhir, karena keduanya sering muncul di banyak zat.
4. Boleh memakai koefisien pecahan sementara, lalu kalikan semua koefisien agar menjadi bilangan bulat.
5. Periksa ulang setiap unsur (dan muatan, bila ada ion). Koefisien akhir harus bilangan bulat **terkecil**.



TRIK KAK TIRTA

Ingat kata **MaCHO**: **M**etal (logam) dulu, lalu **C**, lalu **H**, dan **O** paling akhir. Gugus poliatom yang muncul utuh di kedua ruas, seperti SO_4 , NO_3 , atau PO_4 , hitung sebagai satu "paket" saja. Untuk pembakaran hidrokarbon yang jumlah C-nya genap, jangan takut pecahan: $\text{C}_2\text{H}_6 + \frac{7}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$ itu sah, tinggal kalikan dua menjadi $2 \text{C}_2\text{H}_6 + 7 \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$.



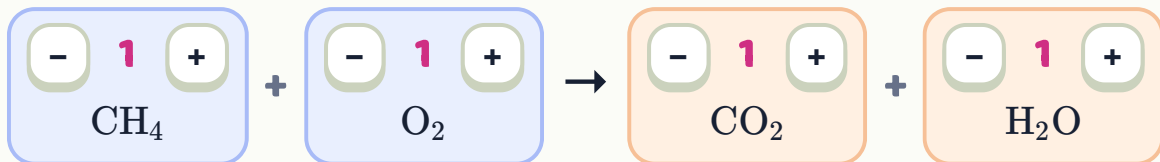
AWAS JEBAKAN

Koefisien mengalikan **seluruh** rumus di belakangnya, sedangkan indeks hanya berlaku untuk atom (atau kurung) tepat di depannya. Pada $3 \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ada 3 atom Ca, $3 \times 2 = 6$ atom N, dan $3 \times 2 \times 3 = 18$ atom O. Koefisien juga **bukan** perbandingan massa: pada $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$, massa hidrogen yang bereaksi (4 bagian) jauh lebih kecil daripada massa oksigen (32 bagian).

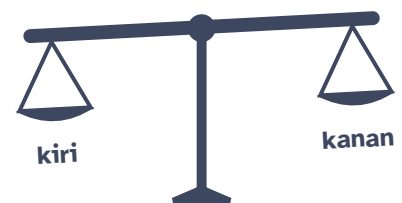


PENYETARA REAKSI

Tingkat mudah: api, air, dan karat



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



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



Petunjuk

Ulang

Persamaan berikutnya ▶

Persamaan 1 dari 6 null

Mulai dari pembakaran metana (gas kompor dan biogas), lalu air dari hidrogen, karat besi, magnesium yang menyala putih, amonia untuk pupuk, dan garam dapur. Tekan - / + pada koefisien. Tabel menghitung atom setiap unsur, dan timbangan miring ke ruas yang atomnya lebih banyak.

Tabung LPG berisi campuran propana (C_3H_8) dan butana. Setarakan reaksi pembakaran sempurna propana: $C_3H_8 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$.

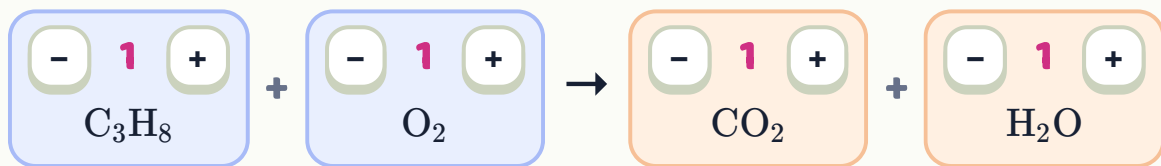
- 1 Karbon: kiri 3 atom C, jadi tulis 3 di depan CO_2 .
- 2 Hidrogen: kiri 8 atom H, jadi tulis 4 di depan H_2O ($4 \times 2 = 8$).
- 3 Oksigen di kanan sekarang $3 \times 2 + 4 \times 1 = 10$ atom. Supaya kiri juga 10, tulis 5 di depan O_2 .
- 4 Periksa: C $3 = 3$, H $8 = 8$, O $10 = 10$ ✓

$C_3H_8(g) + 5 O_2(g) \rightarrow 3 CO_2(g) + 4 H_2O(l)$. Setiap molekul propana butuh lima molekul oksigen. Itulah sebabnya lubang udara kompor tidak boleh tertutup kotoran.

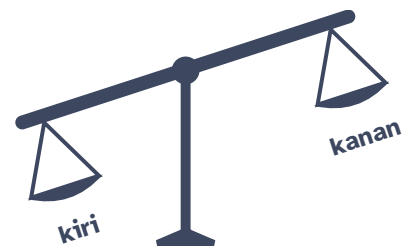


PENYETARA REAKSI

Tingkat sedang: dapur, pasar, dan tanur



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



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



Petunjuk



Ulang

Persamaan berikutnya ▶

Persamaan 1 dari 7 null

LPG (propana), aluminium dalam asam yang menghasilkan gelembung hidrogen, fermentasi tapai, karbit, tanur tiup besi, butana pengisi korek gas, dan soda kue yang dipanaskan (rahasia kue yang mengembang). Untuk butana, coba cara pecahan dari Trik Kak Tirta.



KIMIA NUSANTARA · TAPAI, TUAK, DAN KARBIT

Ragi tapai berisi kapang dan khamir. Kapang memecah pati singkong atau beras ketan menjadi glukosa, lalu khamir mengubah glukosa menjadi etanol dan gas karbon dioksida: $C_6H_{12}O_6(aq) \rightarrow 2C_2H_5OH(aq) + 2CO_2(g)$. Reaksi yang sama terjadi pada nira aren atau nira kelapa yang menjadi tuak, dan pada adonan roti yang mengembang karena gelembung CO_2 .

Karbit (kalsium karbida) bereaksi dengan air menghasilkan gas asetilena: $CaC_2(s) + 2H_2O(l) \rightarrow C_2H_2(g) + Ca(OH)_2(aq)$. Dulu gas ini dipakai untuk lampu karbit para penambang dan untuk mengelas. Di Pontianak, tradisi meriam karbit di tepi Sungai Kapuas menyambut Lebaran dan dikerjakan orang dewasa berpengalaman. Sebagian pedagang memakai karbit untuk mematangkan buah, tetapi cara ini **tidak dianjurkan**: karbit teknis dapat mengandung pengotor arsen dan fosfor. Karbit cukup kita pelajari lewat cerita, **bukan** untuk percobaan di rumah: asetilena sangat mudah terbakar dan dapat meledak.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

METODE ALJABAR: BIARKAN MATEMATIKA YANG MENYETARAKAN

Beri setiap koefisien sebuah huruf, lalu tulis satu persamaan untuk setiap unsur. Untuk $aC_3H_8 + bO_2 \rightarrow cCO_2 + dH_2O$: C: $3a = c$; H: $8a = 2d$; O: $2b = 2c + d$. Pilih $a = 1$, maka $c = 3$, $d = 4$, dan $b = 5$.

Cara ini sangat ampuh untuk reaksi yang "tidak jelas mulai dari mana", misalnya tembaga dalam asam nitrat encer: $aCu + bHNO_3 \rightarrow cCu(NO_3)_2 + dNO + eH_2O$. Persamaannya: Cu: $a = c$; H: $b = 2e$; N: $b = 2c + d$; O: $3b = 6c + d + e$. Dari sini diperoleh $3e = 4c$, sehingga $c = 3$, $e = 4$, $b = 8$, $d = 2$, dan $a = 3$:

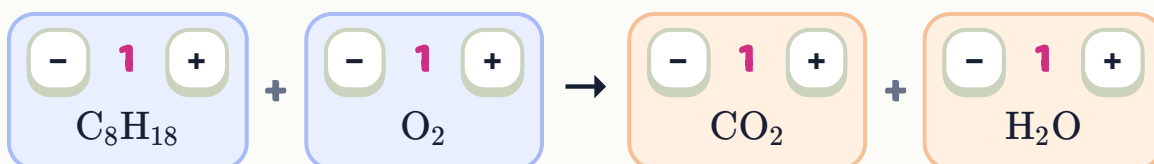


Secara umum ini adalah sistem persamaan linear homogen; jawabannya adalah "ruang nol" sebuah matriks. Penyetara Reaksi di buku ini menyelesaikannya dengan eliminasi Gauss. Untuk reaksi redoks yang rumit, cara setengah reaksi (Bab 29) sering lebih cepat.

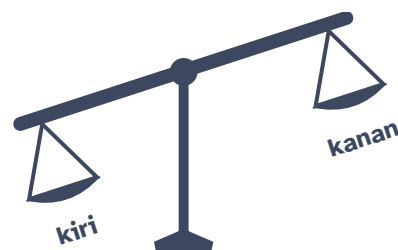


PENYETARA REAKSI

Tingkat sulit: tantangan calon olimpiade



Unsur	Kiri	Kanan	
C	8 ●●●●●●●●	1 ●	✗
H	18 ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○	2 ○○	✗
O	2 ●●	3 ●●●	✗



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

Petunjuk

Ulang

Persamaan berikutnya ►

Persamaan 1 dari 6 null

Bensin (oktana), pembuatan gas klorin di laboratorium, tembaga dalam asam nitrat, langkah pertama pembuatan asam nitrat, pemanggangan bijih pirit, dan pembuatan fosfor. Coba dulu tanpa . Bila buntu, tulis persamaan aljabarnya seperti di kotak Lanjut.

Mau berlatih lebih cepat? Menghitung atom adalah keterampilan inti menyetarakan: **jumlah atom = koefisien × indeks** (× angka di luar kurung, bila ada).

ADU CEPAT Hitung atom O: koefisien × indeks

ADU CEPAT • MAINKAN DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-16](https://aurumgen.my.id/chemipedia#BAB-16)

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Satu $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ punya $2 \times 3 = 6$ atom O; satu H_2SO_4 punya 4 atom O. Kalikan dengan koefisiennya, lalu jumlahkan.

16.3 Hukum Lavoisier: massa tidak pernah hilang

Ingat teka-teki Bab 15? Sebatang kayu yang dibakar menjadi segenggam abu yang jauh lebih ringan. Selama berabad-abad orang menduga api "menghancurkan" sebagian materi. Para ahli bahkan percaya pada zat khayalan bernama *flogiston* yang konon keluar dari benda saat terbakar. Anehnya, logam yang dipanaskan di udara justru bertambah berat. Bagaimana mungkin benda kehilangan flogiston tetapi menjadi lebih berat?



TAMU DARI MASA LALU • KIMIAWAN YANG MENIMBANG SEGALANYA

Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794) dari Prancis memanaskan timah dan raksa di dalam bejana tertutup, lalu menimbang semuanya dengan neraca yang sangat teliti. Massa total sebelum dan sesudah pemanasan ternyata sama. Logam bertambah berat karena mengikat sebagian udara, yaitu gas yang kemudian ia namai *oksigen*. Istrinya, Marie-Anne Paulze Lavoisier, ikut mencatat percobaan, menerjemahkan makalah ilmiah, dan menggambar alat-alatnya. Lavoisier dihukum mati pada 1794 semasa Revolusi Prancis, tetapi bukunya *Traité élémentaire de chimie* (1789) mengubah kimia menjadi ilmu yang ditimbang dan diukur.



HUKUM KEKALKAN MASSA (LAVOISIER)

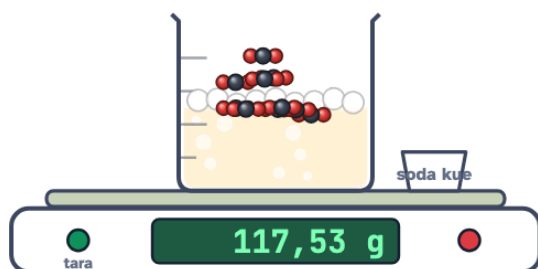
Dalam reaksi kimia di **sistem tertutup**, massa total zat sebelum reaksi sama dengan massa total zat sesudah reaksi.

$$\sum m_{\text{pereaksi}} = \sum m_{\text{hasil reaksi}}$$

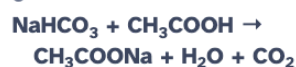
Alasannya pada tingkat partikel: atom hanya ditata ulang, tidak ada atom yang dibuat atau dimusnahkan.

Kuncinya ada pada kata **sistem tertutup**, yaitu wadah yang tidak membiarkan zat keluar atau masuk. Lilin di piring, kayu di tungku, dan cuka di gelas terbuka termasuk **sistem terbuka**: gas hasil reaksi bebas kabur ke udara, dan oksigen dari udara bebas masuk. Timbangan hanya "melihat" zat yang ada di atasnya.

Bahasa sederhana • Coba bayangkan kamu meniup balon lalu melepaskannya tanpa diikat. Balon mengempis, tetapi udaranya tidak lenyap; udara itu hanya pindah ke ruangan. Begitu juga gas dari lilin yang terbakar: ia pindah ke udara, sehingga timbangan menunjukkan angka yang lebih kecil.

**Sistem TERBUKA**

gas bebas keluar dan masuk

**CO₂ terbentuk: 0,88 g****CO₂ yang kabur: 0,47 g****t = 1,2 detik**

Massa awal

118 g

Bacaan timbangan

117,53 g

Perubahan

-0,47 g

Kesimpulan

massa berkurang: gas keluar ke udara

Pilih reaksi dan sistemnya, lalu tekan ► Jalankan. Bandingkan soda kue + cuka di gelas terbuka dengan botol berbalon, lilin di piring dengan lilin dalam toples, dan wol besi yang berkarat. Kapan timbangan turun, kapan naik, dan kapan tetap? Lihat juga partikel gasnya: ke mana mereka pergi? Nyalakan "timbangan super teliti" untuk melihat efek gaya apung udara pada balon.

$$m_{\text{gas}} = m_{\text{kayu}} + m_{\text{O}_2} - m_{\text{abu}}$$

Massa sebelum sama dengan massa sesudah. Gas tak terlihat yang terbang ke udara membawa hampir seluruh massa kayu, ditambah oksigen yang diambil dari udara.

 m_{kayu}

Massa kayu kering g

 m_{O_2}

Oksigen dari udara g

 m_{abu}

Massa abu g

 m_{gas} Massa gas (CO₂ + uap air) gMASSA GAS (CO₂ + UAP AIR)**2.390**

g

🔥 oksigen $\approx 1,4 \times$ massa kayu: pembakaran sempurna

1.000 g kayu + **1.400** g oksigen $\rightarrow$ **10** g abu + **2.390** g gas tak terlihat. Abu hanya **1 %** dari massa kayu!

Satuan Nusantara: $\approx 80\%$ dari isi gas tabung LPG melon $\cdot \approx 2,4 \times$ sekantong gula 1 kg $\cdot \approx 10\%$ dari karung beras 25 kg

Cek satuan: g + g – g = g ✓

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

Laras menaruh gelas berisi cuka dan sesendok teh soda kue (di atas secarik kertas) di timbangan: totalnya 152,6 g. Soda kue dituang ke cuka, buih bermunculan. Setelah buih berhenti, timbangan menunjukkan 150,4 g. Berapa massa gas yang lepas? Apakah hukum kekekalan massa dilanggar?

- 1 Persamaan reaksinya: $\text{NaHCO}_3(\text{s}) + \text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) \rightarrow \text{CH}_3\text{COONa}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{CO}_2(\text{g})$.
- 2 Massa yang "hilang" dari timbangan: $152,6 - 150,4 = 2,2$ g. Itulah massa gas CO_2 yang kabur ke udara.
- 3 Gelas terbuka adalah sistem terbuka. Bila gasnya ditangkap (misalnya dengan botol bertutup), massa total tetap 152,6 g.

Gas CO_2 yang lepas = 2,2 g. Hukum Lavoisier tidak dilanggar; massanya hanya pindah ke udara.

MITOS

"Saat kayu terbakar, sebagian massanya musnah."

MITOS

"Koefisien di depan rumus menunjukkan massa zat."

FAKTA

Massa kayu + oksigen = massa abu + gas. Gasnya (CO_2 dan uap air) tak terlihat dan terbang ke udara. Bila semua gas ditangkap, massanya justru lebih besar daripada kayu semula!

FAKTA

Koefisien menunjukkan perbandingan

jumlah partikel

. Pada $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, massa hidrogen yang bereaksi (4 bagian) jauh lebih kecil daripada massa oksigen (32 bagian).

MITOS

"Boleh menyetarakan dengan mengubah angka kecil di rumus."

FAKTA

Mengubah indeks berarti mengganti zat. H_2O adalah air; H_2O_2 adalah hidrogen peroksida yang berbahaya bila diminum. Yang boleh diubah hanya koefisien.



KESELAMATAN • SODA KUE DAN CUKA

Soda kue + cuka aman bila takarannya kecil: paling banyak $\frac{1}{2}$ sendok teh soda kue untuk 50 mL cuka. Botol yang ditutup rapat hanya boleh botol bekas minuman bersoda yang dindingnya tebal, bukan botol kaca atau botol air mineral tipis. Buka tutupnya perlahan sambil diarahkan menjauhi wajah. Cuka terasa perih di mata: pakai kacamata dan bilas dengan air mengalir bila terciprat. Jangan mencicipi campurannya, dan lakukan bersama orang dewasa.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

APAKAH MASSA BENAR-BENAR KEKAL? EINSTEIN IKUT BICARA

Menurut Einstein, energi dan massa setara: $E = mc^2$. Reaksi yang melepas energi sebenarnya kehilangan sedikit sekali massa. Pembakaran 16 g metana dengan 64 g oksigen melepas ± 890 kJ. Massa yang setara dengan energi itu:

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{8,9 \times 10^5 \text{ J}}{(3,0 \times 10^8 \text{ m/s})^2} \approx 1 \times 10^{-11} \text{ kg} =$$

Dibandingkan 80 g pereaksi, perubahannya hanya sekitar satu per delapan miliar, jauh di bawah ketelitian neraca terbaik. Jadi untuk reaksi kimia, hukum Lavoisier berlaku dengan sangat baik. Pada reaksi inti (Bab 37), perubahan massanya jutaan kali lebih besar dan benar-benar terukur.

16.4

Hukum Proust & Dalton: resep yang tidak bisa ditawar

Air dari hujan di Bogor, dari mata air di Gunung Gede, atau dari es di kutub punya komposisi yang sama: setiap 9 g air tersusun atas 1 g hidrogen dan 8 g oksigen. Tidak pernah 2 g hidrogen dengan 7 g oksigen. Senyawa ibarat resep yang tidak bisa ditawar.



TAMU DARI MASA LALU • PERDEBATAN DUA KIMIAWAN

Joseph Louis Proust (1754–1826), kimiawan Prancis yang lama bekerja di Spanyol, menganalisis tembaga karbonat buatan laboratorium dan yang ditemukan di alam. Komposisinya selalu sama. Selama bertahun-tahun (sekitar 1801–1808) ia berdebat dengan **Claude Louis Berthollet**, yang yakin komposisi senyawa bisa berubah-ubah. Data Proust lebih meyakinkan untuk sebagian besar senyawa, tetapi Berthollet tidak sepenuhnya salah (lihat kotak Lanjut di bawah).



HUKUM PERBANDINGAN TETAP (PROUST)

Perbandingan massa unsur-unsur dalam suatu senyawa selalu tetap, dari mana pun asal senyawa itu dan bagaimanapun cara membuatnya. Contoh: H : O dalam air = 1 : 8; C : O dalam CO_2 = 3 : 8; Fe : S dalam besi(II) sulfida = 7 : 4.

Akibatnya, bila dua unsur direaksikan dengan perbandingan yang tidak pas, **sebagian pereaksi akan tersisa**. Perhatikan percobaan memanaskan serbuk besi dan belerang (**Fe**, **S**) berikut.

Percobaan	Besi (g)	Belerang (g)	Besi(II) sulfida (g)	Sisa
1	7	4	11	tidak ada
2	14	8	22	tidak ada
3	10	4	11	besi 3 g
4	7	6	11	belerang 2 g

Pada percobaan 3, belerang 4 g hanya cukup untuk 7 g besi; sisanya 3 g besi tidak ikut bereaksi. Perhatikan pula: massa total tetap kekal, misalnya $10 + 4 = 11 + 3$. Hukum Lavoisier dan hukum Proust selalu berlaku bersama.

RUMUS HIDUP Membuat air: hidrogen dan oksigen selalu 1 : 8

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \times \min \left(m_{\text{H}}, \frac{m_{\text{O}}}{8} \right)$$

Setiap 1 gram hidrogen bergabung dengan tepat 8 gram oksigen menjadi 9 gram air.
Pereaksi yang kelebihan tidak ikut bereaksi; ia tersisa.

m_{H} Massa hidrogen g m_{O} Massa oksigen g $m_{\text{H}_2\text{O}}$ Massa air terbentuk g

MASSA AIR TERBENTUK

18

g

oksigen berlebih, hidrogen habis

Terbentuk **18 g** air. Sisa hidrogen **0 g**, sisa oksigen **8 g**. Massa total tetap **26 g**.

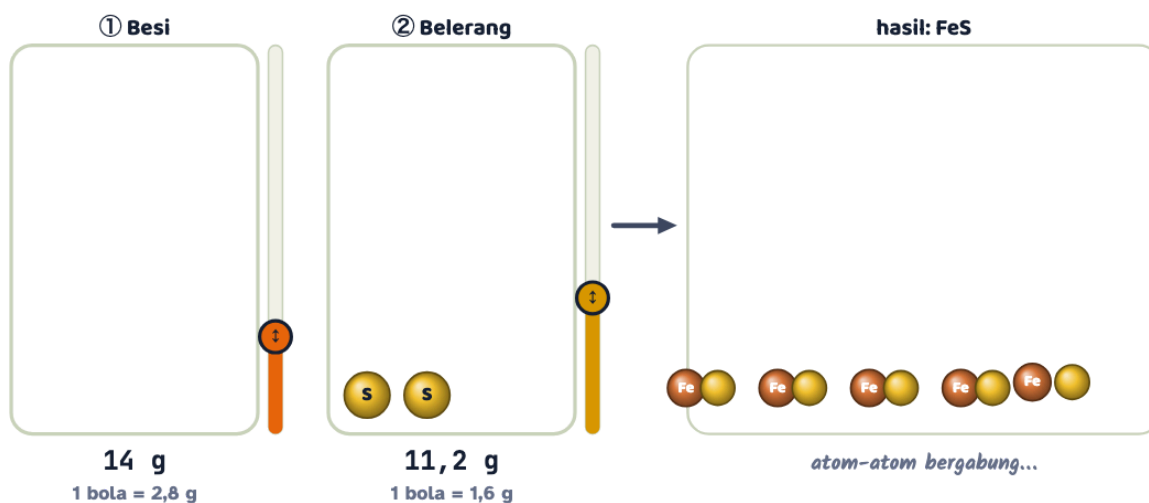
Satuan Nusantara: $\approx 1,2 \times$ satu sendok makan air $\cdot \approx 31\%$ dari 1 mol garam dapur (NaCl) $\cdot \approx 3,6 \times$ satu sendok teh gula pasir ($\pm$)

Cek satuan: g ✓ (massa sebelum = air + sisa)

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

Pabrik Proust • Besi(II) sulfida (FeS)

perbandingan massa Fe : S = 7 : 4



Massa hasil

—

Sisa unsur ①

—

Sisa unsur ②

—

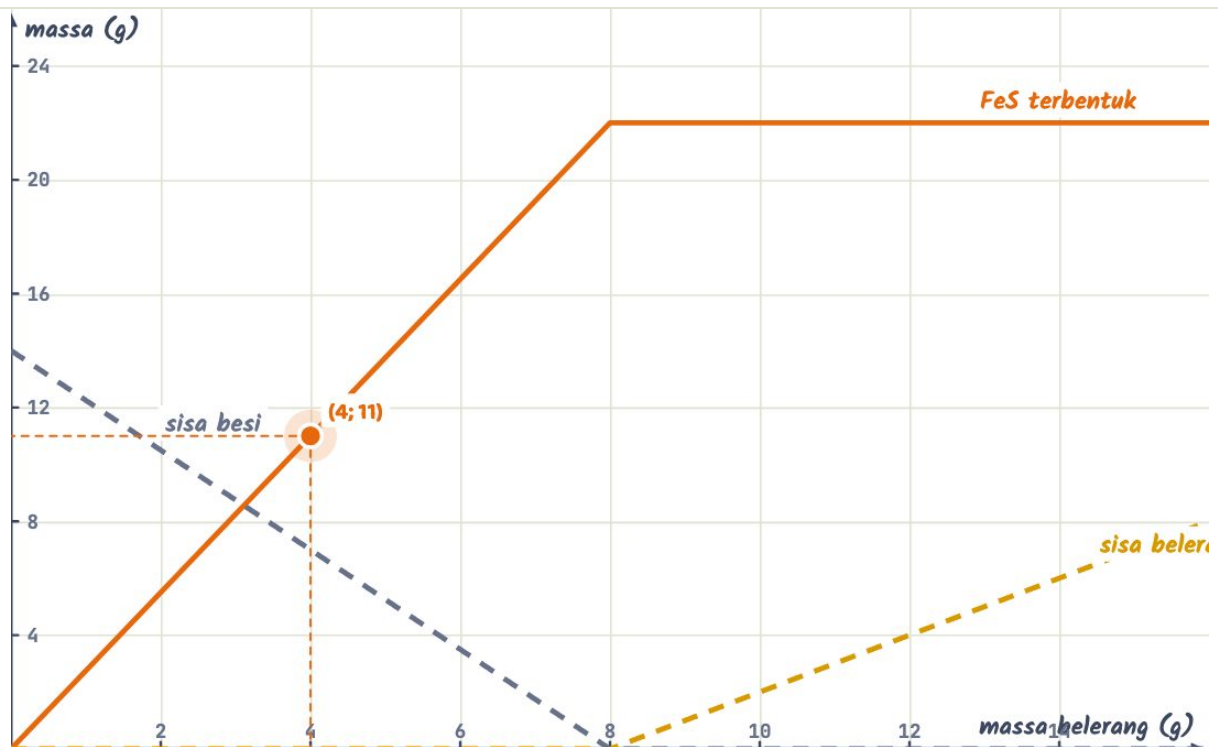
Kekekalan massa

sebelum: 25,2 g • tekan ▶

Pilih senyawa, lalu seret tumpukan ① dan ② ke atas atau ke bawah (atau pakai penggeser). Tekan ▶ Jalankan dan lihat atom-atom bergabung. Setiap bola mewakili takaran yang sama dari unsur itu. Berapa pun takaran yang kamu masukkan, perbandingan massa yang **bereaksi** selalu sama, dan kelebihanannya tersisa. Bandingkan CO dengan CO₂ untuk massa karbon yang sama!

$$m_{\text{FeS}} = \min \left(\frac{11}{4} m_{\text{S}}, 22 \right)$$

$$m_{\text{S}} = 4 \text{ g} \Rightarrow m_{\text{FeS}} = 11 \text{ g}$$



belerang habis; besi bersisa

FeS terbentuk

11 g

sisa besi

7 g

sisa belerang

0 g

Seret titik oranye. Garis FeS naik lurus selama belerang yang menentukan, lalu mendatar tepat di 8 g belerang: di situ besi 14 g habis. Grafik bertitik patah seperti ini adalah "sidik jari" perbandingan tetap.

Dalam magnesium oksida, perbandingan massa $\text{Mg} : \text{O} = 3 : 2$. Sebanyak 12 g pita magnesium dibakar dalam wadah berisi 10 g gas oksigen. Berapa gram magnesium oksida yang terbentuk, dan zat apa yang tersisa?

- 12 g Mg butuh oksigen $12 \times \frac{2}{3} = 8$ g. Oksigen tersedia 10 g, jadi cukup.
- Magnesium habis; oksigen tersisa $10 - 8 = 2$ g.
- Massa $\text{MgO} = 12 + 8 = 20$ g (hukum Lavoisier untuk zat yang bereaksi).

Terbentuk 20 g MgO dan tersisa 2 g oksigen. Cek: $12 + 10 = 20 + 2$ ✓



AWAS JEBAKAN

Perbandingan massa tidak sama dengan perbandingan jumlah atom. Dalam air, $\text{H} : \text{O} = 1 : 8$ menurut **massa**, tetapi $2 : 1$ menurut **jumlah atom**. Satu molekul air berisi 2 atom H (massa 2×1) dan 1 atom O (massa 16), sehingga perbandingan massanya $2 : 16 = 1 : 8$. Atom O memang 16 kali lebih berat daripada atom H.

Bagaimana bila dua unsur dapat membentuk **lebih dari satu** senyawa? Karbon dan oksigen membentuk karbon monoksida (CO , gas beracun dari pembakaran tak sempurna) dan karbon dioksida (CO_2 , gas yang kita embuskan). Untuk 12 g karbon, CO mengandung 16 g oksigen, sedangkan CO_2 mengandung 32 g oksigen. Perbandingannya $16 : 32 = 1 : 2$, bilangan bulat yang sederhana. John Dalton melihat pola ini pada 1803 dan menjadikannya bukti kuat bahwa materi tersusun atas atom-atom utuh.



HUKUM PERBANDINGAN BERGANDA (DALTON)

Bila dua unsur membentuk lebih dari satu senyawa, dan massa salah satu unsur dibuat tetap, maka massa unsur kedua dalam senyawa-senyawa itu berbanding sebagai **bilangan bulat sederhana**. Alasannya: atom hanya dapat bergabung utuh, satu, dua, atau tiga, tidak pernah "setengah atom".

Oksida nitrogen	Nama	Massa O per 14 g N	Perbandingan O
N_2O	dinitrogen monoksida ("gas tertawa", obat bius ringan)	8 g	1
NO	nitrogen monoksida	16 g	2
N_2O_3	dinitrogen trioksida	24 g	3

NO ₂	nitrogen dioksida (gas cokelat pencemar udara kota)	32 g	4
N ₂ O ₅	dinitrogen pentoksida	40 g	5



LANJUT • IB & OLIMPIADE

BERTHOLLIDA: SENYAWA YANG "MEMBANGKANG"

Sebagian padatan ionik ternyata **nonstoikiometri**. Contohnya wüstit, oksida besi yang rumusnya lebih tepat ditulis Fe_{1-x}O dengan x sekitar 0,05–0,15. Di dalam kisinya, sebagian tempat ion Fe²⁺ kosong; muatan tetap netral karena sebagian ion besi lain menjadi Fe³⁺ (setiap tiga Fe²⁺ diganti dua Fe³⁺ dan satu lubang). Senyawa seperti ini disebut *berthollida*, untuk menghormati Berthollet.

Isotop juga menggeser angka: dalam air berat, D₂O, perbandingan massa H : O kira-kira 1 : 4, bukan 1 : 8. Hukum Proust tetap berguna, asalkan diingat bahwa ia berlaku untuk senyawa molekuler biasa dengan campuran isotop alami.

16.5 Hukum Gay-Lussac & hipotesis Avogadro

Menimbang gas itu merepotkan. Jauh lebih mudah **mengukur volumenya**, misalnya dengan tabung berskala yang dibalik di atas air. Ketika kimiawan mulai mengukur volume gas yang bereaksi, mereka menemukan pola yang mengejutkan.



Tebak Dulu!

Pada suhu dan tekanan yang sama, 1 L gas hidrogen bereaksi tepat habis dengan 1 L gas klorin menjadi gas hidrogen klorida. Berapa volume hidrogen klorida yang terbentuk?

1 L, karena volume tidak bisa bertambah.

1,5 L, rata-rata dari kedua gas.

2 L.

Tidak bisa ditentukan tanpa menimbang gasnya.

Jawabannya: 2 L. Massa selalu kekal, tetapi **volume** gas tidak harus kekal. Volume bergantung pada *jumlah molekul*. Satu molekul H₂ dan satu molekul Cl₂ menghasilkan **dua** molekul HCl, sehingga volumenya menjadi dua kali.

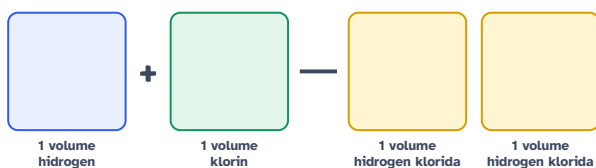


HUKUM PERBANDINGAN VOLUME (GAY-LUSSAC, 1808)

Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas-gas yang bereaksi dan volume gas hasil reaksi berbanding sebagai bilangan bulat sederhana. Contoh: 2 volume hidrogen + 1 volume oksigen → 2 volume uap air; 1 volume nitrogen + 3 volume hidrogen → 2 volume amonia.

Data Gay-Lussac sempat membingungkan Dalton. Jika gas hidrogen dan klorin tersusun atas atom tunggal, bagaimana 1 volume + 1 volume bisa menghasilkan 2 volume? Apakah atomnya harus dibelah dua? Jawabannya datang dari Italia.

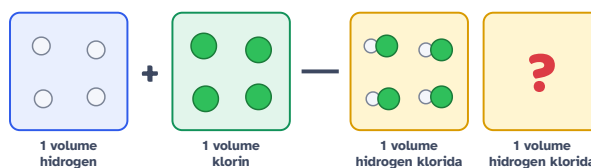
Data Gay-Lussac: 1 volume + 1 volume → 2 volume



Percobaan: 1 L hidrogen + 1 L klorin → 2 L hidrogen klorida
Kotak = volume yang sama besar. Apa isinya?

Langkah 1. Data Gay-Lussac: pada suhu dan tekanan sama, 1 volume hidrogen + 1 volume klorin menghasilkan **2 volume** hidrogen klorida. Setiap kotak menggambarkan volume yang sama besar.

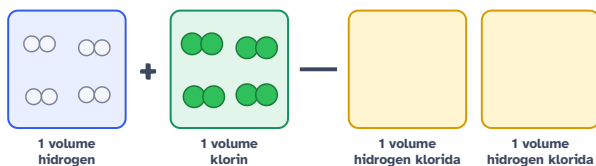
Dugaan Dalton: gas berupa atom tunggal? Tidak cocok!



4 atom H + 4 atom Cl hanya membuat 4 partikel HCl, cukup untuk 1 volume saja.
Agar menjadi 2 volume, atom H dan Cl harus dibelah dua. Mustahil!

Langkah 2. Bila gas berupa atom tunggal, 4 atom H dan 4 atom Cl hanya membentuk 4 partikel HCl, yaitu 1 volume saja. Untuk mengisi volume kedua, atom harus dibelah. Dalton menolak gagasan itu.

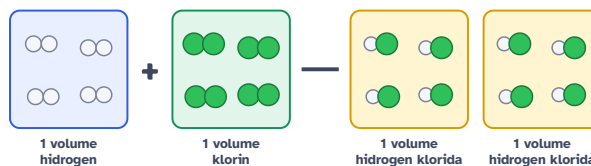
Gagasan Avogadro (1811): gas berupa molekul dwiatom



Avogadro: gas hidrogen = molekul H_2 , gas klorin = molekul Cl_2
Volume sama berisi jumlah molekul yang sama: 4 dan 4

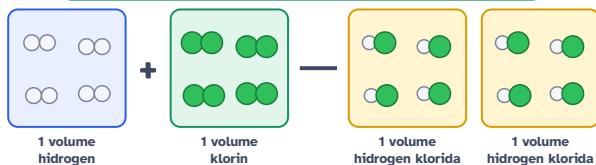
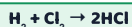
Langkah 3. Amedeo Avogadro (1811) mengusulkan dua hal: volume gas yang sama (pada suhu dan tekanan sama) berisi **jumlah molekul yang sama**, dan gas hidrogen serta klorin tersusun atas **molekul dwiatom**, H_2 dan Cl_2 .

Volume sama → jumlah molekul sama



4 molekul H_2 + 4 molekul Cl_2 → 8 molekul HCl = 4 molekul per volume ✓
Molekulnya yang dibelah, bukan atomnya.

Langkah 4. Setiap molekul H_2 bertemu satu molekul Cl_2 dan menjadi **dua** molekul HCl. Delapan molekul HCl mengisi tepat 2 volume, masing-masing 4 molekul. Cocok dengan percobaan!



perbandingan volume 1 : 1 : 2 = perbandingan jumlah molekul 1 : 1 : 2
Koefisien reaksi gas = perbandingan volumenya.

Langkah 5. Kesimpulan: $H_2(g) + Cl_2(g) \rightarrow 2HCl(g)$. Untuk gas pada suhu dan tekanan sama, perbandingan koefisien = perbandingan jumlah molekul = perbandingan volume.



HIPOTESIS AVOGADRO

Pada suhu dan tekanan yang sama, gas-gas yang volumenya sama mengandung jumlah molekul yang sama. Akibatnya, untuk reaksi gas:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\text{koefisien}_1}{\text{koefisien}_2}$$



TAMU DARI MASA LALU • ILMUWAN DI ATAS AWAN

Pada 1804, **Joseph Louis Gay-Lussac** naik balon berisi hidrogen sendirian sampai ketinggian sekitar 7.000 meter untuk mengambil contoh udara. Ternyata komposisi udara di sana sama dengan di permukaan tanah. Empat tahun kemudian ia menerbitkan hukum perbandingan volume. Hipotesis Avogadro (1811) hampir terlupakan selama setengah abad, sampai Stanislao Cannizzaro memperjuangkannya di kongres kimia internasional pertama di Karlsruhe (1860).

RUMUS HIDUP

Volume gas dari koefisien (Gay-Lussac)

$$V_{\text{dicari}} = \frac{k_{\text{dicari}}}{k_{\text{diketahui}}} \times V_{\text{diketahui}}$$

Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas berbanding lurus dengan koefisiennya dalam persamaan setara.

$V_{\text{diketahui}}$

Volume gas yang diketahui L

$k_{\text{diketahui}}$

Koefisien gas yang diketahui

k_{dicari}

Koefisien gas yang dicari

V_{dicari}

Volume gas yang dicari L

VOLUME GAS YANG DICARI

50

L

🔥 LPG: oksigen 5 kali volume propana

10 L gas berkoefisien **1** setara dengan **50 L** gas berkoefisien **5** (suhu dan tekanan sama).

Satuan Nusantara: $\approx 2,2 \times 1$ mol gas pada STP $\cdot \approx 2,6 \times$ galon air isi ulang $\cdot \approx 5\%$ dari satu meter kubik

Cek satuan: $(\text{koefisien} \div \text{koefisien}) \times \text{L} = \text{L} \checkmark$

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

COBA SENDIRI Berapa banyak udara untuk kompor?

Sebuah kompor membakar sempurna 6 L gas propana (diukur pada suhu dan tekanan kamar). Berapa liter oksigen yang diperlukan, berapa liter CO₂ yang terbentuk, dan berapa liter udara (21% volume oksigen) yang harus mengalir ke kompor?

- 1 Persamaan setara: $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g}) + 5 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 3 \text{CO}_2(\text{g}) + 4 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$. Perbandingan volume gas $\text{C}_3\text{H}_8 : \text{O}_2 : \text{CO}_2 = 1 : 5 : 3$.
- 2 Oksigen: $V = \frac{5}{1} \times 6 = 30 \text{ L}$. Karbon dioksida: $V = \frac{3}{1} \times 6 = 18 \text{ L}$.
- 3 Udara hanya mengandung 21% oksigen: $V_{\text{udara}} = \frac{30}{0,21} \approx 143 \text{ L}$.
- 4 Air yang terbentuk mengembun menjadi cairan, sehingga tidak dihitung dengan perbandingan volume gas.

Butuh 30 L oksigen (±143 L udara), terbentuk 18 L CO₂. Untuk 6 L gas, kompor menyedot udara hampir 24 kali volumenya!



AWAS JEBAKAN

Perbandingan volume hanya berlaku untuk zat **berwujud gas** yang diukur pada suhu dan tekanan yang sama. Air cair, endapan, dan padatan tidak ikut dihitung. Massa selalu kekal, tetapi volume gas boleh bertambah atau berkurang: pada $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$, 4 volume pereaksi menjadi hanya 2 volume amonia.



KIMIA NUSANTARA • API BIRU DI DAPUR

Tabung LPG 3 kg berisi campuran propana dan butana. Bila udara cukup, nyala kompor berwarna **biru**: pembakaran sempurna menghasilkan CO₂ dan air. Bila lubang udara kompor tersumbat, nyalanya menjadi kuning-merah dan berjelaga. Itu tanda pembakaran tidak sempurna yang juga menghasilkan karbon monoksida, $2 \text{C}_3\text{H}_8 + 7 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO} + 8 \text{H}_2\text{O}$. Gas CO tidak berwarna, tidak berbau, dan beracun. Karena itu dapur harus berventilasi, dan kompor yang apinya kuning perlu dibersihkan.

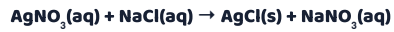
16.6 Jenis reaksi & persamaan ion bersih

Ada jutaan reaksi kimia, tetapi kebanyakan mengikuti beberapa pola. Mengenali polanya membantumu **menebak hasil reaksi** sebelum menuliskannya.

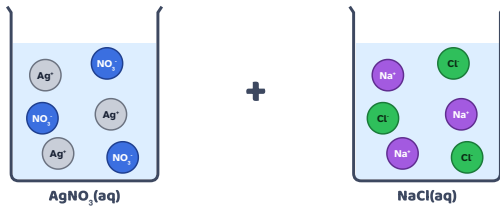
Bahasa sederhana • Pola reaksi mirip pola menari berpasangan. Ada yang bergabung (dua penari menjadi satu pasangan), ada yang berpisah, ada yang merebut pasangan orang lain, dan ada dua pasangan yang saling bertukar pasangan.

Jenis reaksi	Pola umum	Contoh	Di sekitar kita
Kombinasi (sintesis)	$A + B \rightarrow AB$	$\text{CaO (s)} + \text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 \text{ (s)}$	kapur tohor disiram air menjadi kapur sirih (terasa panas!)
Penguraian (dekomposisi)	$AB \rightarrow A + B$	$\text{CaCO}_3 \text{ (s)} \xrightarrow{\Delta} \text{CaO (s)} + \text{CO}_2 \text{ (g)}$	tobong kapur membakar batu gamping
Pembakaran	bahan bakar + $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$2 \text{C}_4\text{H}_{10} \text{ (g)} + 13 \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow 8 \text{CO}_2 \text{ (g)} + 10 \text{H}_2\text{O (l)}$	LPG, lilin, kayu bakar, bensin
Pendesakan tunggal	$A + BC \rightarrow AC + B$	$\text{Fe (s)} + \text{CuSO}_4 \text{ (aq)} \rightarrow \text{FeSO}_4 \text{ (aq)} + \text{Cu (s)}$	paku yang dicelup larutan terusi berlapis tembaga
Pertukaran ganda (metatesis, pengendapan)	$AB + CD \rightarrow AD + CB$	$\text{AgNO}_3 \text{ (aq)} + \text{NaCl (aq)} \rightarrow \text{AgCl (s)} + \text{NaNO}_3 \text{ (aq)}$	uji ion klorida di laboratorium
Netralisasi (asam + basa)	asam + basa $\rightarrow$ garam + air	$\text{Mg(OH)}_2 \text{ (s)} + 2 \text{HCl (aq)} \rightarrow \text{MgCl}_2 \text{ (aq)} + 2 \text{H}_2\text{O (l)}$	obat maag menetralkan asam lambung

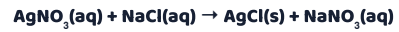
Banyak reaksi berlangsung di dalam larutan. Senyawa ion yang larut (dan asam kuat) terurai menjadi ion-ionnya. Ternyata sebagian ion hanya "menonton": mereka ada sebelum dan sesudah reaksi tanpa berubah sedikit pun. Ikuti animasi berikut.



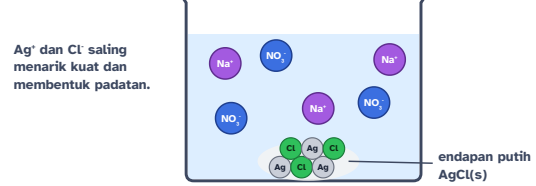
persamaan molekul: setiap zat ditulis sebagai senyawa utuh



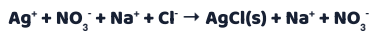
Langkah 1. Persamaan molekul: $\text{AgNO}_3(\text{aq}) + \text{NaCl}(\text{aq}) \rightarrow \text{AgCl}(\text{s}) + \text{NaNO}_3(\text{aq})$. Di dalam gelas, kedua larutan sebenarnya berisi ion-ion yang bergerak bebas: Ag^+ dan NO_3^- , serta Na^+ dan Cl^- .



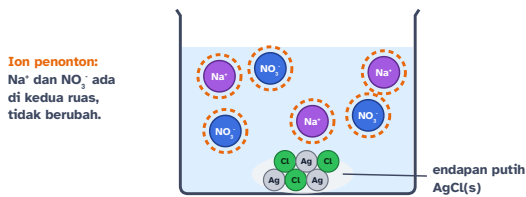
dicampur: ion Ag^+ dan Cl^- bertemu dan mengendap



Langkah 2. Saat dicampur, ion Ag^+ dan Cl^- saling menarik kuat dan membentuk padatan putih perak klorida yang mengendap. Ion Na^+ dan NO_3^- tetap melayang di larutan.



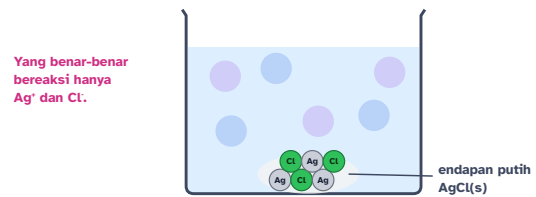
persamaan ion lengkap: zat (aq) ditulis sebagai ion-ionnya



Langkah 3. Persamaan ion lengkap: $\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^- + \text{Na}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl}(\text{s}) + \text{Na}^+ + \text{NO}_3^-$. Na^+ dan NO_3^- muncul sama persis di kedua ruas. Mereka disebut **ion penonton**.



persamaan ion bersih: ion penonton dicoret dari kedua ruas



Langkah 4. Coret ion penonton, tersisa **persamaan ion bersih**: $\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{AgCl}(\text{s})$. Persamaan ini berlaku untuk semua larutan berisi ion perak dan ion klorida, misalnya juga $\text{AgNO}_3 + \text{KCl}$.



DEFINISI · ION PENONTON & PERSAMAAN ION BERSIH

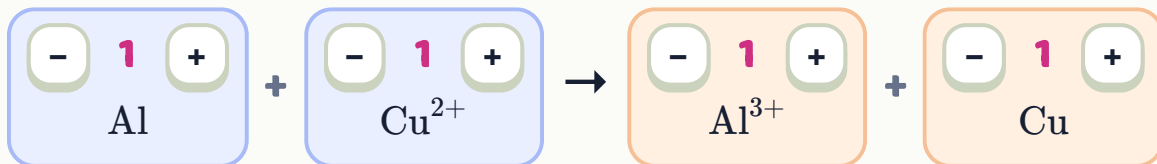
Ion penonton adalah ion yang ada di larutan sebelum dan sesudah reaksi tanpa berubah.

Persamaan ion bersih hanya memuat partikel yang benar-benar berubah. Cara menuliskannya: (1) pecah zat (aq) yang merupakan elektrolit kuat menjadi ion; (2) padatan, cairan, gas, air, dan asam lemah tetap ditulis sebagai rumus utuh; (3) coret ion yang sama di kedua ruas; (4) periksa bahwa **atom dan muatan** setara.



PENYETARA REAKSI

Persamaan ion: setarakan atom dan muatan



Unsur	Kiri	Kanan	
Al	1 	1 	✓
Cu	1 	1 	✓
muatan	+2	+3	✗



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

 Petunjuk

 Ulang

Persamaan berikutnya ►

Persamaan 1 dari 6 null

Pada persamaan ion, yang harus setara bukan hanya atom, tetapi juga **muatan**. Persamaan pertama sudah setara atomnya sejak awal. Lihat baris muatan di tabel: masih belum sama! Persamaan terakhir adalah reaksi kalium permanganat dengan ion besi(II), dipakai untuk menentukan kadar besi dalam titrasi.

COBA SENDIRI **Paku di dalam larutan terusi**

Paku besi dicelupkan ke larutan terusi (tembaga(II) sulfat) yang biru. Lama-kelamaan paku berlapis kemerahan dan warna biru larutan memudar. Tuliskan persamaan molekul, persamaan ion lengkap, dan persamaan ion bersihnya, lalu periksa muatannya.

1 Persamaan molekul (pendesakan tunggal): $\text{Fe(s)} + \text{CuSO}_4\text{(aq)} \rightarrow \text{FeSO}_4\text{(aq)} + \text{Cu(s)}$.

2 Pecah zat (aq) menjadi ion: $\text{Fe(s)} + \text{Cu}^{2+}\text{(aq)} + \text{SO}_4^{2-}\text{(aq)} \rightarrow \text{Fe}^{2+}\text{(aq)} + \text{SO}_4^{2-}\text{(aq)} + \text{Cu(s)}$.

3 SO_4^{2-} adalah ion penonton. Coret dari kedua ruas: $\text{Fe(s)} + \text{Cu}^{2+}\text{(aq)} \rightarrow \text{Fe}^{2+}\text{(aq)} + \text{Cu(s)}$.

4 Periksa: atom Fe 1 = 1, Cu 1 = 1; muatan kiri +2, kanan +2 ✓

$\text{Fe(s)} + \text{Cu}^{2+}\text{(aq)} \rightarrow \text{Fe}^{2+}\text{(aq)} + \text{Cu(s)}$. Lapisan merah adalah logam tembaga, dan warna biru memudar karena ion Cu^{2+} berkurang. Elektron berpindah dari besi ke tembaga; reaksi seperti ini disebut reaksi redoks (Bab 29).

Kimia di sekitarmu



Kompur LPG

Propana dan butana terbakar menjadi CO_2 dan air. Satu molekul propana butuh lima molekul oksigen, jadi kompor perlu aliran udara yang lancar.



Tapai dan tuak

Khamir mengubah glukosa menjadi etanol dan CO_2 . Itu sebabnya tapai beraroma "tajam" dan wadah tuak yang tertutup rapat bisa menggebu.



Karbit pematang buah

Karbit + air menghasilkan asetilena yang mempercepat pematangan. Cara ini tidak dianjurkan karena karbit teknis mengandung pengotor beracun. Cukup diketahui, jangan dicoba.



Kembang api

Bahan pengoksidasi melepaskan oksigen sehingga bahan bakar terbakar sangat cepat; garam logam memberi warna. Petasan berbahaya dan dilarang dibuat atau disulut sendiri.



Kapur sirih

Kapur tohor (CaO) yang disiram air menjadi kapur sirih, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sambil melepaskan panas. Ini reaksi kombinasi. Kapur sirih basa dan bisa melukai kulit serta mata.

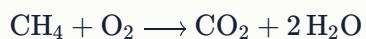
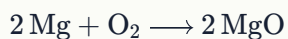
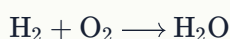


Kantong udara mobil

Saat tabrakan, natrium azida terurai sangat cepat:
 $2 \text{NaN}_3 \rightarrow 2 \text{Na} + 3 \text{N}_2$.
Dalam sekejap, gas nitrogen mengembangkan kantong udara yang melindungi pengemudi.

Cek Cepat

Persamaan manakah yang sudah setara?



Dalam wadah tertutup, 5 g zat A bereaksi habis dengan 3 g zat B, dan terbentuk gas. Berapa massa total isi wadah setelah reaksi?

8 g

2 g

15 g

kurang dari 8 g karena ada gas

Pada suhu dan tekanan sama, 2 L gas nitrogen bereaksi habis dengan hidrogen: $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{NH}_3$. Berapa volume amonia yang terbentuk?

1 L

2 L

6 L

4 L

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D



Tantangan Rumah: timbangan Lavoisier di dapur

Bahan: timbangan dapur digital (lebih baik yang teliti sampai 0,1 g), botol plastik bekas 600 mL, balon karet, cuka dapur, soda kue, sendok teh, corong dari kertas, gelas plastik, secarik kertas kecil.

1. Tuang ± 50 mL cuka ke dalam botol. Dengan corong kertas, masukkan $\frac{1}{2}$ sendok teh soda kue ke dalam balon.
2. Pasang mulut balon ke mulut botol tanpa menumpahkan soda kue (balon dibiarkan terkulai). Timbang semuanya dan catat.
3. Tegakkan balon agar soda kue jatuh ke cuka. Amati buih dan balon yang mengembang. Setelah buih berhenti, timbang lagi.
4. Ulangi dengan sistem terbuka: timbang gelas berisi 50 mL cuka bersama $\frac{1}{2}$ sendok teh soda kue di atas secarik kertas. Tuang soda kue ke cuka (kertasnya tetap di timbangan), lalu timbang lagi setelah buih berhenti.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa dan pakai kacamata. Jangan menambah soda kue lebih dari $\frac{1}{2}$ sendok teh dan jangan memakai botol kaca. Bila cuka terciprat ke mata, bilas dengan air mengalir. Jangan mencicipi campurannya; buang ke wastafel sambil dialiri air.

Pertanyaan: Sistem mana yang massanya berkurang? Jika timbanganmu sangat teliti, botol berbalon mungkin juga turun sedikit. Apakah massanya benar-benar hilang, atau balon yang menggembung "didorong ke atas" oleh udara seperti pelampung di air?



RINGKASAN KILAT

Bab 16 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menulis **persamaan reaksi** dari kalimat, lengkap dengan lambang wujud zat (s), (l), (g), (aq)
- **menyetarakan** persamaan reaksi dengan cara inspeksi dan cara aljabar, tanpa mengubah rumus zat
- menjelaskan dan memakai **hukum Lavoisier**, **hukum Proust**, dan **hukum Dalton** untuk mengolah data massa
- menghitung volume gas dengan **hukum Gay-Lussac** dan menjelaskannya dengan **hipotesis Avogadro**
- menggolongkan **jenis reaksi** dan menulis **persamaan ion bersih**



Istilah kunci

persamaan reaksi

pereaksi

hasil reaksi

setara

sistem tertutup

sistem terbuka

Ion penonton

Persamaan ion bersih



Rumus penting

$$m_{\text{gas}} = m_{\text{kayu}} + m_{\text{O}_2} - m_{\text{abu}}$$

Ke mana perginya massa kayu?. Massa sebelum sama dengan massa sesudah. Gas tak terlihat yang terbang ke udara membawa hampir seluruh massa kayu, ditambah oksigen yang diambil dari udara.

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \times \min \left(m_{\text{H}}, \frac{m_{\text{O}}}{8} \right)$$

Membuat air: hidrogen dan oksigen selalu 1 : 8.

Setiap 1 gram hidrogen bergabung dengan tepat 8 gram oksigen menjadi 9 gram air. Pereaksi yang kelebihan tidak ikut bereaksi; ia tersisa.

$$V_{\text{dicari}} = \frac{k_{\text{dicari}}}{k_{\text{diketahui}}} \times V_{\text{diketahui}}$$

Volume gas dari koefisien (Gay-Lussac). Pada suhu dan tekanan yang sama, volume gas berbanding lurus dengan koefisiennya dalam persamaan setara.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Koefisien mengalikan seluruh rumus di belakangnya, sedangkan indeks hanya berlaku untuk atom (atau kurung) tepat di depannya.
- Soda kue + cuka aman bila takarannya kecil: paling banyak ½ sendok teh soda kue untuk 50 mL cuka.
- Perbandingan massa tidak sama dengan perbandingan jumlah atom.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=16

🧩 Teka-teki untuk Bab 17

Persamaan $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ berkata "dua molekul hidrogen untuk satu molekul oksigen". Masalahnya, tidak ada yang bisa mengambil molekul satu per satu dengan pinset! Satu lusin = 12, satu kodi = 20, satu rim = 500. Kimiawan punya satuan hitung yang isinya 602 triliun miliar. Untuk apa satuan sebesar itu?

▼ Intip petunjuk

Satuan itu bernama **mol**. Dengan mol, kimiawan "menghitung molekul dengan menimbang": 2 mol H_2 (4 g) bereaksi tepat dengan 1 mol O_2 (32 g). Perhatikan, $4 : 32 = 1 : 8$, persis perbandingan Proust untuk air. Koefisien reaksi, hukum Proust, dan hukum Avogadro ternyata bertemu di satu konsep. Kita bongkar di Bab 17!

17 Konsep Mol: Menghitung Atom dengan Menimbang

Atom terlalu kecil untuk dihitung satu per satu, bahkan oleh komputer tercepat sekalipun. Kimiawan punya cara cerdik seperti pedagang kerupuk di pasar: menimbang. Kuncinya satu kata ajaib, yaitu mol.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **mol** sebagai satuan jumlah zat dan memakai **bilangan Avogadro**;
- menghitung **massa molar** (A_r dan M_r) dari rumus kimia;
- mengubah massa, jumlah partikel, dan volume gas melalui **jembatan mol**;
- menghitung **komposisi persen** unsur dalam senyawa, misalnya kadar nitrogen pupuk;
- menentukan **rumus empiris**, **rumus molekul**, dan jumlah air kristal dari data percobaan.

SERIBU KEPING KERUPUK

KOMIK · 4 PANEL

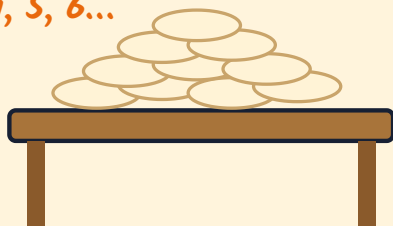
Minggu pagi, di sebuah pasar di Malang

BIMA

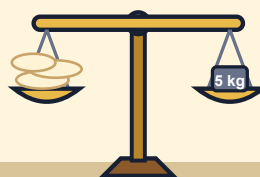
Bu, saya pesan 1.000 keping kerupuk untuk acara kelas. Saya hitung sendiri, ya... satu, dua, tiga...



...4, 5, 6...

**LARAS**

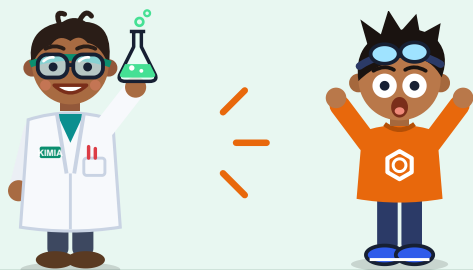
Kelamaan, Bim! Satu keping beratnya ± 5 gram. Berarti $1.000 \text{ keping} = 5.000 \text{ gram} = 5 \text{ kg}$. Tinggal ditimbang!



KAK TIRTA

Persis begitu cara kimiawan menghitung atom: tidak dihitung satu per satu, tetapi **ditimbangan!**

TING!



Kimo ikut nimbrung...

KIMO

Satu sendok makan air saja berisi $\pm 5 \times 10^{23}$ molekul. Dihitung satu per detik, butuh sejuta kali umur alam semesta!

BIMA

Kita butuh satuan hitung raksasa...



Tebak Dulu!

Kamu punya 1 gram emas dan 1 gram aluminium. Mana yang berisi lebih banyak atom?

Emas, karena emas lebih berharga dan lebih padat.

Aluminium, kira-kira tujuh kali lebih banyak.

Sama banyak, karena massanya sama-sama 1 gram.

Tidak bisa dibandingkan karena unsurnya berbeda.

Jawabannya: aluminium. Satu atom emas (Ar 197) kira-kira tujuh kali lebih berat daripada satu atom aluminium (Ar 27). Jadi dalam massa yang sama, atom aluminium yang lebih ringan jumlahnya ± 7 kali lebih banyak, persis seperti 1 kg kerupuk berisi jauh lebih banyak keping daripada 1 kg kelapa. Bab ini mengajarkan cara menghitungnya dengan tepat.

17.1 Lusin, kodi, rim... dan mol

Pedagang di pasar sudah lama memakai **satuan hitung** supaya tidak repot. Telur dibeli per lusin (12 butir), kain batik per kodi (20 lembar), dan kertas fotokopi per rim (500 lembar). Satuan seperti itu hanyalah "nama untuk sebuah bilangan".

Bahasa sederhana • Bayangkan sebuah kotak ajaib yang selalu berisi jumlah benda yang sama. Satu kotak telur berisi 12 butir. Satu "kotak" kimia, yang disebut **mol**, berisi 602 ribu miliar miliar partikel! Karena atom sangat kecil, kotaknya harus luar biasa besar supaya isinya cukup banyak untuk ditimbang di dapur.

Kimiawan butuh satuan hitung yang sangat besar, sebab atom sangat kecil. Satuan itu adalah **mol**.

Satuan hitung	Isinya	Dipakai untuk
1 lusin	12	telur, piring, gelas
1 kodi	20	kain batik, sarung
1 gros	144 (= 12 lusin)	pensil, kancing
1 rim	500	kertas
1 mol	602.214.076.000.000.000.000.000 $= 6,022 \times 10^{23}$	atom, molekul, ion, elektron



DEFINISI • MOL

Satu **mol** adalah jumlah zat yang mengandung tepat $6,02214076 \times 10^{23}$ partikel elementer (atom, molekul, ion, atau partikel lain yang disebutkan). Bilangan ini disebut **bilangan Avogadro**, N_A . Satuannya mol (lambang: mol).



AWAS JEBAKAN

Sebutkan dulu partikelnya! "1 mol oksigen" bisa berarti 1 mol *molekul* O_2 (massanya 32 g) atau 1 mol *atom* O (massanya 16 g). Satu mol molekul O_2 berisi **2 mol atom** O, sama seperti satu lusin pasang sepatu berisi dua lusin sepatu.

17.2 Seberapa besar bilangan Avogadro?

Angka $6,022 \times 10^{23}$ sulit dibayangkan. Coba ketuk angka-angka bergaris ini untuk membandingkannya dengan benda di sekitarmu: **6,022 × 10²³ partikel, 18 g air, 22,4 L gas**.

- Jika $6,022 \times 10^{23}$ butir beras ditumpahkan merata di seluruh daratan Indonesia ($\pm 1,9$ juta km^2), tumpukannya setinggi sekitar 8 kilometer, hampir dua kali tinggi Puncak Jaya (4.884 m).
- Jika setiap penduduk Bumi ($\pm 8,1$ miliar orang) menghitung satu atom per detik tanpa henti, mereka butuh lebih dari **2 juta tahun** untuk menghitung satu mol atom.

Hubungan jumlah partikel N dan jumlah mol n sederhana sekali: kalikan dengan isi "kotaknya".

$$N = n \times N_A \quad N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ partikel/mol}$$

$$N = n \times N_A$$

Jumlah partikel sama dengan banyaknya 'kotak mol' dikali isi setiap kotak.

 n

Jumlah zat mol

 N

Jumlah partikel partikel

JUMLAH PARTIKEL

$$1,204 \times 10^{24}$$

partikel

 $\geq 1 \text{ mol: lebih dari } 6 \times 10^{23} \text{ partikel}$

2 mol berisi $1,204 \times 10^{24}$ partikel. Itu $1,487 \times 10^{14}$ partikel untuk setiap penduduk Bumi!

Satuan Nusantara: $\approx 2 \times$ satu mol

Cek satuan: mol $\times$ (partikel/mol) = partikel ✓

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



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1811, **Amedeo Avogadro** dari Italia menduga bahwa gas-gas bervolume sama (pada suhu dan tekanan sama) berisi jumlah molekul yang sama. Ia sendiri tidak pernah tahu jumlahnya! Satu abad kemudian, **Jean Perrin** mengukurnya lewat gerak Brown dan menamai bilangan itu untuk menghormati Avogadro (Perrin meraih Nobel Fisika 1926). Sejak 20 Mei 2019, nilai N_A ditetapkan tepat $6,02214076 \times 10^{23}$ per mol, dan definisi mol tidak lagi bergantung pada massa karbon-12.

Massa (gram), skala logaritma: setiap garis kecil = $10\times$ lebih berat



Jumlah benda

$$6,022 \times 10^{23}$$

Massa total

$$1,325 \times 10^{16} \text{ ton}$$

Kira-kira setara

$$1,8 \times 10^{-4} \times \text{Bulan}$$

Pilih benda dan satuan hitungnya. Sebutir beras $\pm 0,022$ g, sebuah molekul air hanya $\pm 3 \times 10^{-23}$ g. Berapa massa **satu mol beras**? Bandingkan dengan Danau Toba, Bulan, dan Bumi!



TRIK KAK TIRTA

Untuk membayangkan $6,022 \times 10^{23}$, ingat "**6 - 0 - 2 - 2, pangkat 23**", seperti nomor rumah 6022 di Jalan 23. Satuan lain boleh lupa, angka ini jangan!

17.3

Massa molar: berat satu "kotak mol"

Satu lusin kerupuk dan satu lusin kelapa sama-sama berisi 12 buah, tetapi massanya sangat berbeda. Begitu pula satu mol zat yang berbeda: **jumlah partikelnya sama, massanya berbeda**.

Bahasa sederhana • Coba bayangkan: sekarung beras 25 kg berisi lebih dari satu juta butir. Pedagang tidak menghitung butirnya; ia menimbang. Kimiawan juga begitu: cukup tahu berat "satu butir" (satu partikel), lalu menimbang. Bedanya, butir kimia sangat-sangat kecil.

Kabar baiknya, kita tidak perlu menimbang satu mol di laboratorium. Massa satu mol suatu zat dalam gram sama dengan angka **massa atom relatif (A_r)** untuk unsur, atau **massa molekul relatif (M_r)** untuk senyawa. Massa ini disebut **massa molar (M)**, satuannya g/mol.



ATURAN • MENGHITUNG M_r

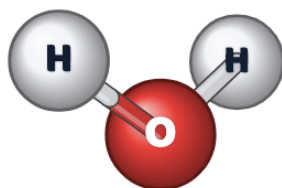
M_r adalah jumlah A_r semua atom dalam rumus kimia:

$$M_r = \sum (\text{jumlah atom} \times A_r)$$

Contoh: $M_r \text{ H}_2\text{O} = 2(1) + 16 = 18$, sehingga massa molar air = 18 g/mol. $M_r \text{ C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ (gula pasir) = $12(12) + 22(1) + 11(16) = 342$.

Ketuk lambang unsur ini untuk melihat kartunya: **H** **C** **N** **O** **Na** **Cl** **Fe** **Au**. Di buku ini kita memakai Ar yang dibulatkan seperti di buku sekolah (H 1, C 12, N 14, O 16, Na 23, Cl 35,5) kecuali soal memberi nilai lain.

MOLEKUL 3D Hitung atomnya, dapatkan Mr



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Air H2O

Mr $\approx$ 18,02

[PubChem](#) ↗

Molekul bengkok dengan sudut $\pm 104,5^\circ$. Dua pasang elektron bebas pada O membuatnya polar dan mampu berikatan hidrogen.

Pilih molekul, hitung atom setiap unsur (putar molekulnya supaya tidak ada yang tersembunyi!), lalu hitung Mr-nya sendiri. Cocokkan dengan label Mr di bawah gambar. Kafein dari kopi Gayo punya 24 atom: berapa C, H, N, dan O?

Dari massa molar, kita dapat menghubungkan massa dengan mol:

$$n = \frac{m}{M_r}$$

Jumlah mol = massa yang ditimbang dibagi massa satu mol.

 m

Massa zat g

 M_r

Massa molar g/mol

 n

Jumlah zat mol

JUMLAH ZAT

0,5

mol



ini air

9 g zat dengan M_r 18 = 0,5 mol, berisi $3,011 \times 10^{23}$ partikel.

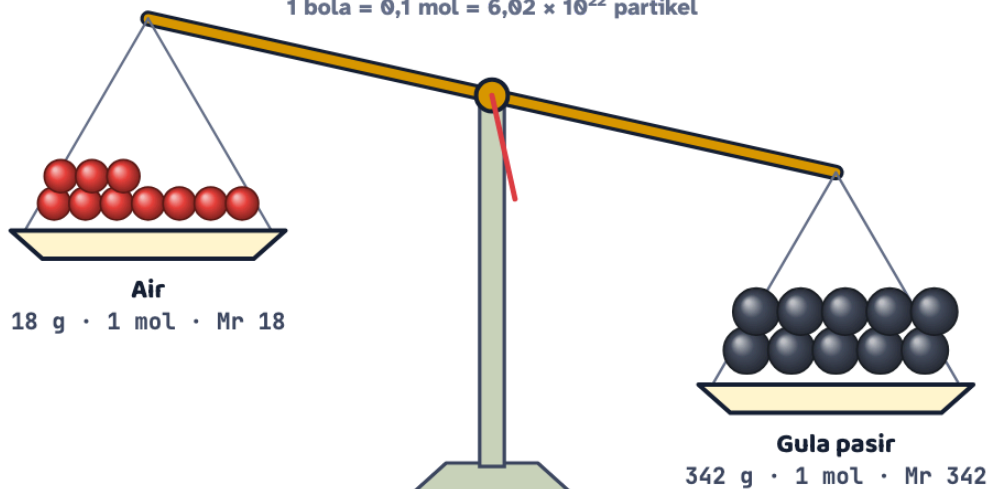
Satuan Nusantara: $\approx 50\%$ dari satu mol ($6,02 \times 10^{23}$ partikel) $\cdot \approx 9\%$ dari air dalam gelas 100 mL $\cdot \approx 179 \times$ aspirin dalam satu tablet 500 mg

Cek satuan: g $\div$ (g/mol) = mol ✓

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

Jumlah bola (partikel) sama → apakah massanya sama?

1 bola = 0,1 mol = $6,02 \times 10^{22}$ partikel



massa kiri

18 g

massa kanan

342 g

mol kiri

1 mol

mol kanan

1 mol

Timbangan

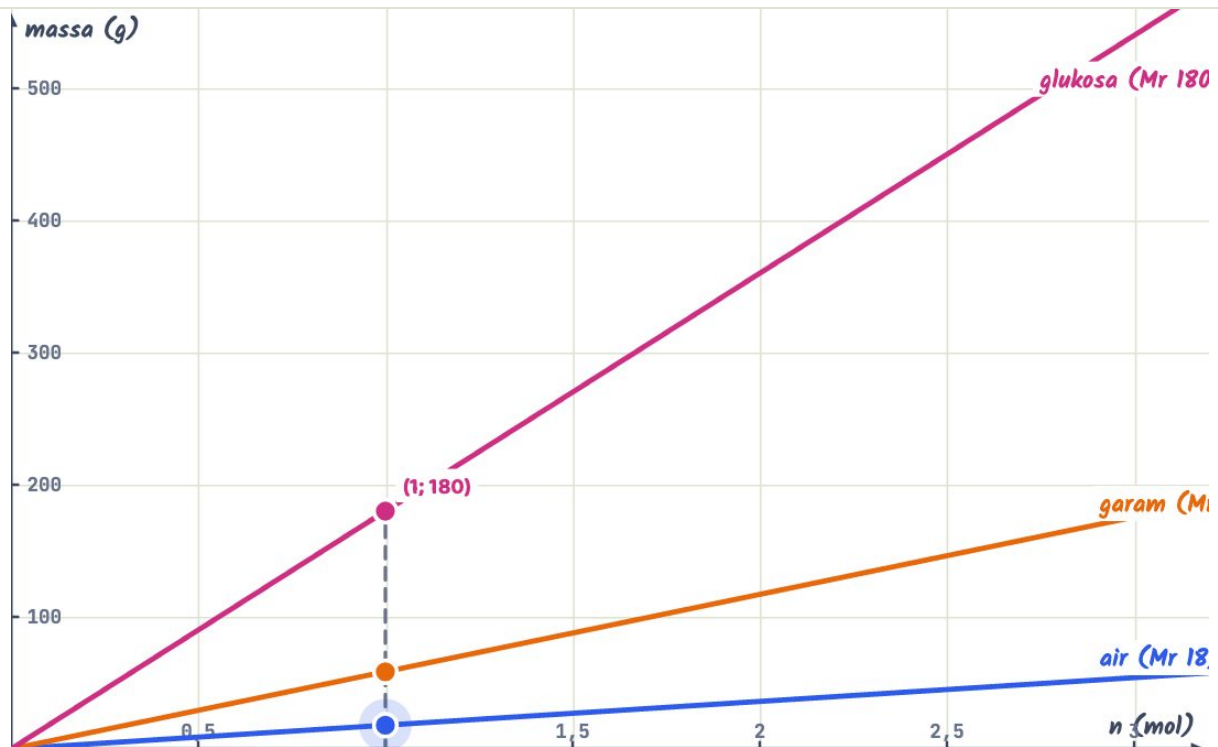
kanan lebih berat

Mode **mol sama**: kedua piring berisi jumlah partikel yang sama. Mengapa timbangan tetap miring? Mode

massa sama: timbangan seimbang, tetapi hitung bola-bolanya. Setiap bola mewakili 0,1 mol partikel.

$$m = M_r \times n$$

$$n = 1 \text{ mol: } m_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ g, } m_{\text{NaCl}} = 58,5 \text{ g, } m_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 180 \text{ g}$$



$n = 1 \text{ mol: massa} = M_r \text{ gram}$

massa air

18 g

massa garam

58,5 g

massa glukosa

180 g

Seret titik biru. Semua garis lewat titik (0, 0): tanpa zat, tanpa massa. Garis yang lebih curam milik zat dengan Mr lebih besar.

MITOS

"Satu mol semua zat massanya sama."

MITOS

"Mol hanya dipakai untuk gas."

FAKTA

Yang sama adalah **jumlah partikelnya**, bukan massanya. 1 mol air = 18 g, 1 mol gula pasir = 342 g, sama seperti selusin kerupuk lebih ringan daripada selusin kelapa.

FAKTA

Mol berlaku untuk zat apa saja: padat (garam), cair (air), gas (oksigen), bahkan ion dan elektron. Yang khusus untuk gas hanyalah **volume molar**.

MITOS

"Ar oksigen 16, jadi satu atom O bermassa 16 gram."

FAKTA

16 gram adalah massa **satu mol** atom O. Satu atom O hanya $16 / (6,022 \times 10^{23}) \approx 2,66 \times 10^{-23}$ gram.

17.4 Volume molar gas

Gas punya keistimewaan. Pada suhu dan tekanan yang sama, satu mol gas apa saja (hidrogen yang ringan maupun karbon dioksida yang berat) menempati **volume yang hampir sama**. Alasannya, partikel gas saling berjauhan, sehingga ukuran partikelnya sendiri hampir tidak berpengaruh. Yang menentukan volume hanyalah *berapa banyak* partikelnya.



Tebak Dulu!

Satu balon diisi 1 mol gas hidrogen (molekul paling ringan), balon lain diisi 1 mol karbon dioksida (22 kali lebih berat). Pada suhu dan tekanan yang sama, balon mana yang lebih besar?

Balon karbon dioksida, karena molekulnya lebih besar dan lebih berat.

Balon hidrogen, karena gas ringan selalu lebih mengembang.

Sama besar, karena jumlah molekulnya sama.

Tidak bisa ditentukan tanpa menimbang.

Jawabannya: sama besar. Molekul gas sangat berjauhan; ruang di antara mereka jauh lebih besar daripada ukuran molekulnya sendiri. Jadi volume gas hanya bergantung pada *berapa banyak* partikelnya (serta suhu dan tekanan), bukan jenisnya. Balon CO₂ memang jauh lebih berat, tetapi ukurannya sama.

Keadaan	Suhu & tekanan	Volume 1 mol gas
STP (standar, buku sekolah Indonesia)	0 °C, 1 atm	22,4 L
RTP (suhu kamar, dipakai IGCSE)	25 °C, 1 atm	24 L (= 24 dm ³)
Keadaan lain	T dan P sembarang	pakai $PV = nRT$ (Bab 14)

$$V = n \times 22,4$$

Setiap mol gas pada 0 °C dan 1 atm memakan tempat 22,4 liter, kira-kira sebanyak isi galon air isi ulang.

n Jumlah gas mol

V Volume gas (STP) L

VOLUME GAS (STP)

22,4

L

1 mol gas pada STP = **22,4 L** $\approx$ **1,179** galon air isi ulang (19 L).

Satuan Nusantara: $\approx 1 \times 1$ mol gas pada STP $\cdot \approx 1,2 \times$ galon air isi ulang $\cdot \approx 15 \times$ botol air mineral besar

Cek satuan: mol $\times$ (L/mol) = L ✓

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



AWAS JEBAKAN

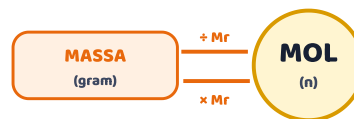
Volume 22,4 L/mol **hanya untuk gas**, dan hanya pada 0 °C dan 1 atm. Satu mol air cair hanya bervolume 18 mL (kira-kira satu sendok makan), bukan 22,4 L! Perhatikan juga: IUPAC kini memakai STP 0 °C dan 1 bar, yang memberi 22,7 L/mol. Ikuti nilai yang diberikan soal.

17.5 Jembatan mol

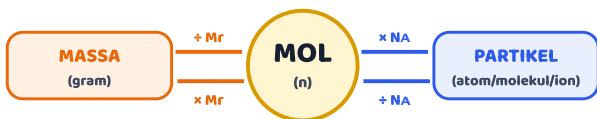
Semua perhitungan di bab ini dapat diringkas dalam satu peta. Mol adalah **stasiun pusat**: dari massa, jumlah partikel, atau volume gas, kita selalu lewat mol dulu, baru pergi ke tujuan.



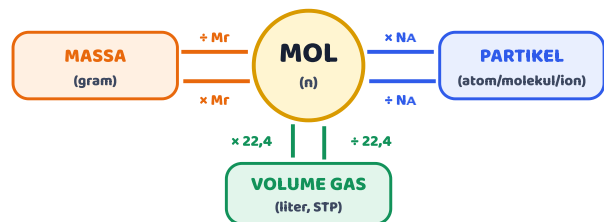
Langkah 1. Mol adalah stasiun pusat. Semua besaran lain terhubung ke sini.



Langkah 2. Dari **massa** ke mol: bagi dengan massa molar M_r . Dari mol ke massa: kalikan dengan M_r .

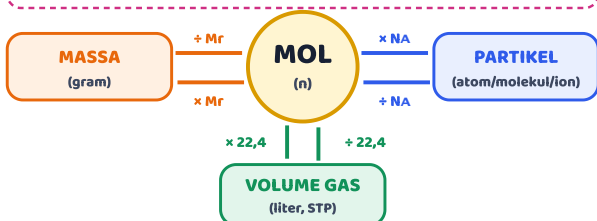


Langkah 3. Dari mol ke **jumlah partikel**: kalikan dengan $N_A = 6,022 \times 10^{23}$. Arah sebaliknya: bagi dengan N_A .



Langkah 4. Khusus gas: dari mol ke **volume** pada STP, kalikan dengan 22,4 L/mol. Sebaliknya, bagi dengan 22,4.

Contoh: 9 g air $\rightarrow$? molekul
 $9 \text{ g} \div 18 \text{ g/mol} = 0,5 \text{ mol} \rightarrow 0,5 \times 6,022 \times 10^{23} = 3,01 \times 10^{23} \text{ molekul}$



Langkah 5. Contoh perjalanan: $9 \text{ g air} \div 18 = 0,5 \text{ mol}$, lalu $\times N_A = 3,01 \times 10^{23} \text{ molekul}$. Selalu lewat mol!



TRIK KAK TIRTA

"Jangan pernah melompati stasiun pusat." Ingin dari gram ke liter? Gram $\rightarrow$ mol $\rightarrow$ liter. Ingin dari partikel ke gram? Partikel $\rightarrow$ mol $\rightarrow$ gram. Tulis satuan di setiap langkah: kalau satuannya tidak saling mencoret menjadi satuan yang diminta, pasti ada yang keliru.

CONTOH Dari massa ke partikel

Segelas air berisi 36 g air ($M_r = 18$). Berapa mol air dan berapa jumlah molekulnya?

1 Massa ke mol: $n = \frac{m}{M_r} = \frac{36 \text{ g}}{18 \text{ g/mol}} = 2 \text{ mol}$.

2 Mol ke partikel: $N = n \times N_A = 2 \times 6,022 \times 10^{23} = 1,204 \times 10^{24}$ molekul.

Ada 2 mol air, yaitu $1,2 \times 10^{24}$ molekul, dalam segelas kecil air.

KERJAKAN BERSAMA Napas karbon dioksida

Dalam 30 menit beristirahat, seseorang menghembuskan $\pm 11 \text{ g CO}_2$. Berapa volume gas itu pada STP, dan berapa molekulnya? (Ar C = 12, O = 16)

1 Hitung Mr: $M_r \text{ CO}_2 = 12 + 2(16) = 44$.

2 Massa ke mol: $n = 11/44 = 0,25 \text{ mol}$.

3 Mol ke volume (STP): $V = 0,25 \times 22,4 = 5,6 \text{ L}$.

4 Mol ke partikel: $N = 0,25 \times 6,022 \times 10^{23} = 1,5 \times 10^{23}$ molekul.

$\pm 5,6 \text{ L gas CO}_2$ (lebih dari isi botol air mineral besar) yang berisi $1,5 \times 10^{23}$ molekul. Itu sebabnya ruang kelas tertutup perlu ventilasi!

ADU CEPAT Massa $\rightarrow$ mol

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-17

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$n = m \div M_r$. Contoh: $29,25 \text{ g garam (} M_r 58,5) \rightarrow 0,5 \text{ mol}$.

17.6 Komposisi persen, rumus empiris, dan air kristal

Petani memilih pupuk berdasarkan kadar nitrogennya. Dari rumus kimia, kita bisa menghitung **komposisi persen** setiap unsur:

$$\% \text{ unsur} = \frac{\text{jumlah atom} \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

RUMUS HIDUP Kadar unsur dalam senyawa

$$\%X = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Bagian massa yang 'disumbangkan' unsur X dari seluruh massa molar.

k Jumlah atom X
 A_r Ar unsur X
 M_r Mr senyawa
 $\%X$ Kadar X %

KADAR X
46,67
 %

 **kadar N pupuk urea**

Dalam 100 kg senyawa ada **46,67** kg unsur X.

Cek satuan: tanpa satuan: g/g $\times 100\%$

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



KIMIA NUSANTARA • PUPUK UNTUK SAWAH

Pabrik pupuk di Bontang, Gresik, dan Palembang mengubah nitrogen udara menjadi **urea**, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, dengan kadar N 46,7%. Amonium sulfat, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, hanya 21,2% N. Jadi untuk memberi 46 kg nitrogen ke satu hektar sawah, petani cukup menebar ± 100 kg urea, tetapi butuh ± 217 kg amonium sulfat. Hitungan mol menghemat ongkos angkut!

Rumus empiris adalah perbandingan atom paling sederhana, sedangkan **rumus molekul** adalah jumlah atom sebenarnya dalam satu molekul. Glukosa $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ punya rumus empiris CH_2O ; rumus molekulnya adalah $(\text{CH}_2\text{O})_6$.

Senyawa misteri: C 40% · H 6,7% · O 53,3%

Langkah 1. Data analisis biasanya berupa persen massa. Misterinya: C 40%, H 6,7%, O 53,3%.

Senyawa misteri: C 40% · H 6,7% · O 53,3%

C 40 g
dari 100 g sampel

H 6,7 g

O 53,3 g

Langkah 2. Anggap sampelnya 100 g, sehingga persen langsung menjadi gram.

Senyawa misteri: C 40% · H 6,7% · O 53,3%

C 40 g
dari 100 g sampel

H 6,7 g

O 53,3 g

$$40 \div 12 = 3,33 \text{ mol}$$

$$6,7 \div 1 = 6,7 \text{ mol}$$

$$53,3 \div 16 = 3,33 \text{ mol}$$

Langkah 3. Ubah setiap massa menjadi mol dengan membagi Ar-nya (C 12, H 1, O 16).

Senyawa misteri: C 40% · H 6,7% · O 53,3%

C 40 g
dari 100 g sampel

H 6,7 g

O 53,3 g

$$40 \div 12 = 3,33 \text{ mol}$$

$$6,7 \div 1 = 6,7 \text{ mol}$$

$$53,3 \div 16 = 3,33 \text{ mol}$$

$$\div 3,33 \rightarrow 1$$

$$\div 3,33 \rightarrow 2$$

$$\div 3,33 \rightarrow 1$$

Langkah 4. Bagi semua jumlah mol dengan yang terkecil (3,33) untuk mendapat perbandingan bilangan bulat.

Senyawa misteri: C 40% · H 6,7% · O 53,3%

C 40 g
dari 100 g sampel

H 6,7 g

O 53,3 g

$$40 \div 12 = 3,33 \text{ mol}$$

$$6,7 \div 1 = 6,7 \text{ mol}$$

$$53,3 \div 16 = 3,33 \text{ mol}$$

$$\div 3,33 \rightarrow 1$$

$$\div 3,33 \rightarrow 2$$

$$\div 3,33 \rightarrow 1$$

Rumus empiris: CH₂O

Langkah 5. Perbandingan C : H : O = 1 : 2 : 1, jadi rumus empirisnya CH₂O. Glukosa, asam asetat, dan formaldehida semuanya punya rumus empiris ini!

Analisis vitamin C memberi: C 40,9%, H 4,55%, dan O 54,5% (massa). Mr-nya 176. Tentukan rumus empiris dan rumus molekulnya. (Ar C = 12, H = 1, O = 16)

- 1 Anggap ada 100 g sampel: C 40,9 g, H 4,55 g, O 54,5 g.
- 2 Ubah ke mol: $C = 40,9/12 = 3,41$; $H = 4,55/1 = 4,55$; $O = 54,5/16 = 3,41$.
- 3 Bagi dengan yang terkecil (3,41): $C : H : O = 1 : 1,33 : 1$.
- 4 Kalikan 3 supaya bulat: $C : H : O = 3 : 4 : 3$. Rumus empiris $C_3H_4O_3$ (Mr empiris = 88).
- 5 $176/88 = 2$, jadi rumus molekul = $(C_3H_4O_3)_2 = C_6H_8O_6$.

Rumus empiris $C_3H_4O_3$, rumus molekul $C_6H_8O_6$ (asam askorbat). Cek: $6(12) + 8(1) + 6(16) = 176$ ✓

Beberapa kristal garam mengikat molekul air di dalam kisinya, disebut **air kristal** atau **hidrat**. Terusi (tembaga(II) sulfat pentahidrat, $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$) yang biru cerah berubah menjadi serbuk putih $CuSO_4$ saat dipanaskan karena airnya menguap. Dengan menimbang sebelum dan sesudah pemanasan, kita bisa menghitung jumlah air kristal x .

Sebanyak 4,99 g kristal biru $CuSO_4 \cdot x H_2O$ dipanaskan sampai beratnya tetap, tersisa 3,19 g serbuk putih $CuSO_4$. Tentukan x . (Mr $CuSO_4 = 159,5$; $H_2O = 18$)

- 1 Massa air yang hilang: $4,99 - 3,19 = 1,80$ g.
- 2 Mol $CuSO_4 = 3,19/159,5 = 0,0200$ mol; mol $H_2O = 1,80/18 = 0,100$ mol.
- 3 Perbandingan $H_2O : CuSO_4 = 0,100 : 0,0200 = 5 : 1$.

$x = 5$, jadi rumusnya $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$, terusi yang dijual untuk membersihkan kolam ikan.

**ANALISIS PEMBAKARAN: MEMBACA RUMUS DARI ASAP**

Bagaimana kimiawan menemukan komposisi senyawa organik yang baru? Sampel dibakar sempurna dalam oksigen. Semua C menjadi CO_2 dan semua H menjadi H_2O , lalu keduanya ditangkap dan ditimbang. Oksigen dihitung dari selisih.

Contoh: 0,230 g senyawa C, H, O menghasilkan 0,440 g CO_2 dan 0,270 g H_2O .

- $\text{mol C} = \text{mol CO}_2 = 0,440/44 = 0,0100 \text{ mol} \rightarrow 0,120 \text{ g C}$
- $\text{mol H} = 2 \times \text{mol H}_2\text{O} = 2 \times 0,270/18 = 0,0300 \text{ mol} \rightarrow 0,0300 \text{ g H}$
- $\text{massa O} = 0,230 - 0,120 - 0,0300 = 0,0800 \text{ g} \rightarrow 0,00500 \text{ mol O}$

$\text{C} : \text{H} : \text{O} = 0,0100 : 0,0300 : 0,00500 = 2 : 6 : 1$, sehingga rumus empirisnya $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$. Bila spektrometri massa (Bab 39) memberi Mr 46, rumus molekulnya juga $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$: etanol atau dimetil eter. Untuk membedakan keduanya, kita butuh spektrum IR atau NMR!

Kimia di sekitarmu**Dosis obat**

Satu tablet parasetamol 500 mg (Mr 151) berisi 3,3 mmol obat, sekitar 2×10^{21} molekul. Dokter dan apoteker menghitung dosis dengan mol.

**Takaran pupuk**

Kadar N, P, dan K pada karung pupuk dihitung dari rumus kimianya. Petani yang paham hitungan mol tidak membeli pupuk berlebih.

**Tabung LPG 3 kg**

Isinya sekitar 60 mol campuran propana-butana. Bila semuanya menjadi gas pada suhu kamar, volumenya ± 1.400 liter!

**Oralit & infus**

Cairan oralit dan infus diracik dalam milimol per liter supaya jumlah ion natrium dan kalium tepat untuk tubuh.

**Pabrik semen**

Insinyur menghitung berapa ton kapur, CaCO_3 , yang dibutuhkan untuk membuat sekian ton kapur tohor, CaO , lewat perbandingan mol.

**Cek Cepat**

Berapa mol 4 g gas hidrogen, H_2 ? (Ar H = 1)

4 mol

2 mol

1 mol

0,5 mol

Manakah yang berisi jumlah partikel paling banyak?

1 mol gula pasir

1 mol air

1 mol besi

Ketiganya sama banyak

Pada STP, 11,2 L gas oksigen berisi berapa mol O_2 ?

0,5 mol

1 mol

2 mol

16 mol

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: satu mol di dapurku

Bahan: timbangan dapur digital, garam, gula pasir, air, gelas, sendok makan, kertas label.

1. Hitung massa 1 mol garam (NaCl, Mr 58,5), 1 mol gula pasir (C₁₂H₂₂O₁₁, Mr 342), dan 1 mol air (Mr 18).
2. Timbang masing-masing di atas kertas atau gelas (jangan lupa kurangi massa wadahnya).
3. Jajarkan ketiganya dan beri label "1 mol · 6,022 × 10²³ partikel".
4. Hitung berapa sendok makan yang dibutuhkan untuk setiap "satu mol".

Pertanyaan: Ketiga tumpukan berisi jumlah partikel yang sama. Mengapa ukurannya sangat berbeda? Tumpukan mana yang partikelnya paling "gemuk"?

RINGKASAN KILAT Bab 17 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **mol** sebagai satuan jumlah zat dan memakai **bilangan Avogadro**
- menghitung **massa molar** (Ar dan Mr) dari rumus kimia
- mengubah massa, jumlah partikel, dan volume gas melalui **jembatan mol**
- menghitung **komposisi persen** unsur dalam senyawa, misalnya kadar nitrogen pupuk
- menentukan **rumus empiris**, **rumus molekul**, dan jumlah air kristal dari data percobaan

Istilah kunci

mol

bilangan Avogadro

massa atom relatif (Ar)

massa molekul relatif (Mr)

massa molar

komposisi persen

Rumus empiris

rumus molekul

air kristal

hidrat

Rumus penting

$$N = n \times N_A$$

Jumlah partikel dari mol. Jumlah partikel sama dengan banyaknya 'kotak mol' dikali isi setiap kotak.

$$n = \frac{m}{M_r}$$

Mol dari massa. Jumlah mol = massa yang ditimbang dibagi massa satu mol.

$$V = n \times 22,4$$

Volume gas pada STP. Setiap mol gas pada 0 °C dan 1 atm memakan tempat 22,4 liter, kira-kira sebanyak isi galon air isi ulang.

$$\%X = \frac{k \times A_r}{M_r} \times 100\%$$

Kadar unsur dalam senyawa. Bagian massa yang 'disumbangkan' unsur X dari seluruh massa molar.

Jangan sampai terjebak

- Sebutkan dulu partikelnya!
- Volume 22,4 L/mol hanya untuk gas, dan hanya pada 0 °C dan 1 atm.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=17

Teka-teki untuk Bab 18

Resep martabak manis Kak Tirta: 2 butir telur dan 1 bungkus tepung untuk satu adonan. Di dapur ada 7 butir telur dan 3 bungkus tepung. Berapa adonan paling banyak yang bisa dibuat, dan bahan apa yang tersisa? Kimiawan menghadapi teka-teki yang sama setiap kali mereaksikan zat.

▼ **Intip petunjuk**

Telur cukup untuk $7/2 = 3,5$ adonan, tepung untuk 3 adonan. Yang habis lebih dulu (tepung) menentukan hasil: 3 adonan, sisa 1 telur. Di Bab 18 "tepung" ini disebut **pereaksi pembatas**, dan hitungannya memakai mol.

18 Stoikiometri: Resep Rahasia Setiap Reaksi

Setiap reaksi kimia punya resep, persis seperti martabak dan es teh manis. Kalau kamu bisa membaca resepnya, kamu bisa meramal berapa ton pupuk keluar dari pabrik, bahan mana yang habis duluan, dan berapa banyak yang terbuang.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membaca **koefisien** persamaan setara sebagai perbandingan mol, lalu menghitung massa produk dari massa pereaksi;
- menentukan **pereaksi pembatas** dan **sisa pereaksi** dengan tabel mula-mula, reaksi, sisa;
- menghitung **hasil teoretis**, **rendemen**, dan **kemurnian** pada proses nyata seperti pabrik semen dan pupuk;
- menerapkan stoikiometri pada **gas** (volume molar) dan **larutan** (molaritas sebagai pengantar);
- menyelesaikan reaksi berurutan dan analisis campuran, serta menilai **ekonomi atom** suatu proses.

ES TEH UNTUK SATU KELAS

KOMIK • 4 PANEL

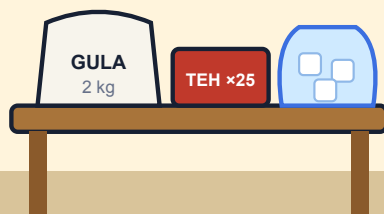
Persiapan class meeting, di kantin sekolah

BIMA

Es teh manis untuk 32 teman sekelas! Aku sudah beli 2 kg gula, 25 kantong teh celup, dan sekantong besar es batu. Pasti cukup!

KANTIN

es teh manis



LARAS

Resepnya: 1 gelas = 1 kantong teh + 25 g gula + 5 kubus es. Gula cukup untuk 80 gelas, tapi teh hanya untuk 25 gelas. Tujuh teman tidak kebagian!

teh habis di gelas ke-25



KAK TIRTA

Teh celup habis duluan, jadi teh adalah **pereaksi pembatas**. Gula sebanyak apa pun tidak akan menambah satu gelas es teh lagi!

JRENG!

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

Reaksi kimia juga punya resep, namanya koefisien! $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ artinya dua "kantong" H_2 untuk satu "kantong" O_2 .

BIMA

Berarti martabak Kak Tirta... 7 telur, 3 tepung... tepungnya yang membatasi!

**Tebak Dulu!**

Kamu mereaksikan 3 g gas hidrogen dengan 16 g gas oksigen menjadi air. Pereaksi mana yang habis lebih dulu?

Hidrogen, karena massanya jauh lebih kecil.

Oksigen, walaupun massanya lebih dari lima kali massa hidrogen.

Keduanya habis bersamaan, karena hukum kekekalan massa.

Tidak bisa ditentukan tanpa mengetahui volume wadahnya.

Jawabannya: oksigen. Massa menipu! 3 g H_2 berisi 1,5 mol molekul, sedangkan 16 g O_2 hanya 0,5 mol. Resepnya $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$: 0,5 mol O_2 cukup bereaksi dengan 1 mol H_2 , lalu habis. Masih tersisa 0,5 mol H_2 (1 g). Pembatas ditentukan oleh *mol dibagi koefisien*, bukan oleh massa.

18.1 Koefisien adalah resep dalam satuan mol

Resep martabak manis Kak Tirta berbunyi: 2 butir telur + 1 bungkus tepung $\rightarrow$ 1 adonan. Resep itu tidak menyebutkan gram, tetapi **jumlah satuan**. Persamaan reaksi yang setara bekerja dengan cara yang sama. Koefisien di depan setiap rumus menyatakan berapa **partikel**, atau berapa **mol** partikel, yang bereaksi.

Bahasa sederhana • Bayangkan dua molekul hidrogen bertemu satu molekul oksigen. Atom-atomnya bertukar pasangan dan menjadi dua molekul air. Kalau kamu punya dua lusin molekul hidrogen dan satu lusin molekul oksigen, hasilnya dua lusin molekul air. Kalau punya 2 mol hidrogen dan 1 mol oksigen, hasilnya 2 mol air. Resepnya sama, hanya "kotaknya" yang lebih besar.



DEFINISI • STOIKIOMETRI

Stoikiometri adalah perhitungan jumlah zat (massa, mol, jumlah partikel, volume) yang bereaksi dan yang terbentuk dalam suatu reaksi kimia, berdasarkan persamaan reaksi yang setara. Namanya berasal dari bahasa Yunani *stoicheion* (unsur) dan *metron* (ukuran).

Mari membaca persamaan pembentukan air pada beberapa tingkat sekaligus:

Dibaca sebagai	2H_2	$+ \text{O}_2$	$\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Partikel	2 molekul	1 molekul	2 molekul
Mol	2 mol	1 mol	2 mol
Massa (Ar H = 1, O = 16)	4 g	32 g	36 g
Volume gas (T dan P sama)	2 volume	1 volume	2 volume (bila air berupa uap)

Perhatikan baris massa: $4\text{ g} + 32\text{ g} = 36\text{ g}$. Massa total tetap (Hukum Lavoisier, Bab 16), tetapi **perbandingan massanya 4 : 32 : 36, bukan 2 : 1 : 2**. Koefisien hanya sama dengan perbandingan mol, partikel, dan (untuk gas) volume.



ATURAN • PERBANDINGAN KOEFISIEN

Untuk reaksi setara $a\text{A} + b\text{B} \rightarrow c\text{C} + d\text{D}$:

$$n_{\text{A}} : n_{\text{B}} : n_{\text{C}} : n_{\text{D}} = a : b : c : d \quad \Rightarrow \quad n_{\text{C}} = n_{\text{A}} \times \frac{c}{a}$$

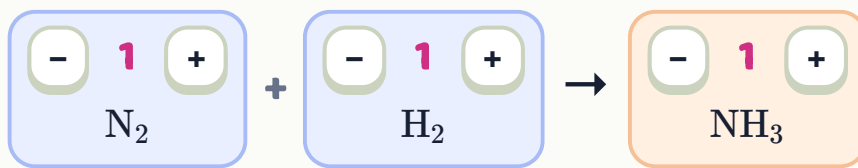
Artinya: **mol yang dicari = mol yang diketahui $\times$ (koefisien yang dicari $\div$ koefisien yang diketahui)**.



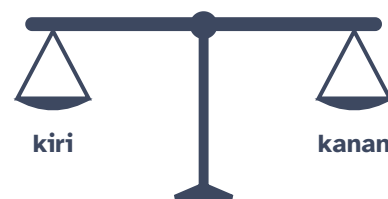
AWAS JEBAKAN

Koefisien adalah perbandingan mol, bukan perbandingan massa. Pada $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, 2 g hidrogen tidak bereaksi dengan 1 g oksigen; 2 *mol* hidrogen (4 g) bereaksi dengan 1 *mol* oksigen (32 g). Selalu ubah massa ke mol dulu sebelum memakai koefisien.

Semua hitungan di bab ini berdiri di atas satu syarat: **persamaannya harus setara**. Koefisien yang salah membuat seluruh pabrik salah takar. Pemanasan dulu dengan reaksi-reaksi industri yang menghidupi Indonesia:

**PENYETARA REAKSI****Setarakan reaksi-reaksi industri Nusantara**

Unsur	Kiri	Kanan	
N	2 ●●	1 ●	×
H	2 ○○	3 ○○○	×

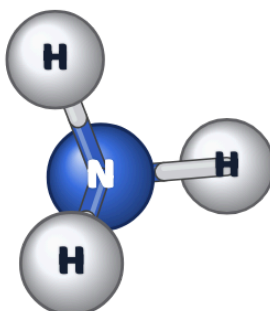


Ubah koefisien sampai jumlah setiap atom di kiri = di kanan. Ingat: yang boleh diubah hanya koefisien, bukan indeks!

**Petunjuk****Ulang****Persamaan berikutnya ▶**

Persamaan 1 dari 7 null

Berturut-turut: proses Haber (amonia), pembuatan pupuk urea, pembentukan alit (mineral utama klinker semen), pembakaran LPG (propana), reduksi nikel oksida dengan karbon (disederhanakan), tanur tinggi besi, dan pembakaran bensin (oktana). Setelah setara, baca koefisiennya sebagai resep mol: berapa mol O_2 untuk setiap mol propana?

MOLEKUL 3D**Atom-atom yang bertukar pasangan di pabrik urea**

Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Amonia H_3N **Mr** ≈ 17,03**PubChem** ➤

Piramida trigonal ($\pm 107^\circ$). Bahan baku pupuk urea; berbau menyengat seperti bau pesing.

Reaksinya $2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$. Hitung atom N, H, C, dan O pada dua molekul amonia ditambah satu molekul karbon dioksida, lalu bandingkan dengan satu molekul urea ditambah satu molekul air. Tidak ada atom yang hilang, hanya pasangannya yang berganti!



TAMU DARI MASA LALU

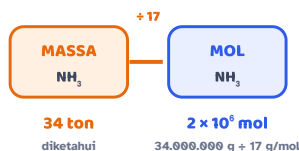
Pada 1792, kimiawan Jerman **Jeremias Benjamin Richter** memperkenalkan kata *stoikiometri*. Ia menimbang dengan sabar berapa bagian asam yang tepat menetralkan sekian bagian basa, dan menemukan bahwa perbandingannya selalu tetap. Kala itu banyak ilmuwan belum percaya pada atom, tetapi "resep" reaksi sudah bisa diukur dengan neraca!

18.2 Dari massa pereaksi ke massa produk

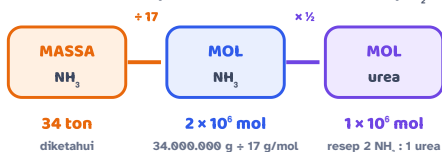
Pabrik tidak menghitung molekul; pabrik menimbang dalam ton. Untungnya, Bab 17 sudah memberi kita jembatan mol. Jalan stoikiometri selalu terdiri atas tiga langkah: **massa** $\rightarrow$ **mol**, lalu **mol** $\rightarrow$ **mol** memakai koefisien, lalu **mol** $\rightarrow$ **massa**.



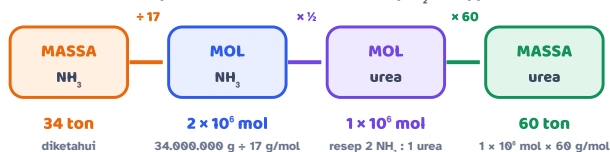
Langkah 1. Mulai dari persamaan setara dan massa yang diketahui: 34 ton NH_3 ($M_r = 17$).



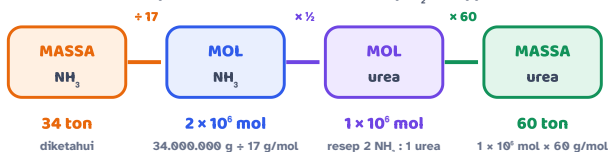
Langkah 2. Massa $\rightarrow$ mol: $34 \times 10^6 \text{ g} \div 17 \text{ g/mol} = 2 \times 10^6 \text{ mol } \text{NH}_3$.



Langkah 3. Mol $\rightarrow$ mol lewat koefisien: $n_{\text{urea}} = 2 \times 10^6 \times \frac{1}{2} = 1 \times 10^6 \text{ mol}$. Inilah satu-satunya langkah yang memakai persamaan reaksi.



Langkah 4. Mol $\rightarrow$ massa: $1 \times 10^6 \text{ mol} \times 60 \text{ g/mol} = 6 \times 10^7 \text{ g} = 60 \text{ ton urea}$.



Cek Lavoisier: CO_2 yang dipakai 44 ton, air yang terbentuk 18 ton
 $34 \text{ t} + 44 \text{ t} = 60 \text{ t} + 18 \text{ t} = 78 \text{ t} \checkmark$

Langkah 5. Cek kewajaran dengan kekekalan massa: massa pereaksi ($34 + 44$) sama dengan massa produk ($60 + 18$). Hitunganmu konsisten!



TRIK KAK TIRTA

Hafalkan jalur **G-M-M-G**: Gram $\rightarrow$ Mol $\rightarrow$ Mol $\rightarrow$ Gram. Koefisien hanya boleh dipakai di tengah, pada langkah mol $\rightarrow$ mol. Kalau kamu mengalikan koefisien dengan gram, berhentilah: itu tanda kamu melompati stasiun mol. Bonus: satuan ton dan kilogram boleh langsung dipakai asalkan konsisten (1 kmol amonia = 17 kg).

$$m_B = \frac{m_A}{M_A} \times \frac{b}{a} \times M_B$$

Ubah massa A ke mol, kalikan dengan perbandingan koefisien (reseponya), lalu ubah mol B kembali ke massa.

 m_A

Massa pereaksi A g

 M_A

Mr pereaksi A g/mol

 a

Koefisien A

 b

Koefisien B

 M_B

Mr produk B g/mol

 m_B

Massa produk B g

MASSA PRODUK B

60

g

 **34 g amonia → 60 g urea**

34 g A = 2 mol A → 1 mol B → 60 g B.

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

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

CONTOH Batu kapur menjadi kapur tohor

Kapur tohor (CaO) untuk pengolahan air dan pembuatan semen dibuat dengan memanaskan batu kapur: $\text{CaCO}_3(\text{s}) \xrightarrow{\Delta} \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$. Berapa kg CaO dan berapa kg CO_2 yang terbentuk dari 200 kg CaCO_3 murni? (Ar Ca = 40, C = 12, O = 16)

- 1 Mr: $\text{CaCO}_3 = 100$, $\text{CaO} = 56$, $\text{CO}_2 = 44$.
- 2 Massa $\rightarrow$ mol: $n_{\text{CaCO}_3} = 200 \text{ kg} \div 100 \text{ kg/kmol} = 2 \text{ kmol}$.
- 3 Mol $\rightarrow$ mol: koefisien 1 : 1 : 1, jadi $n_{\text{CaO}} = n_{\text{CO}_2} = 2 \text{ kmol}$.
- 4 Mol $\rightarrow$ massa: $\text{CaO} = 2 \times 56 = 112 \text{ kg}$; $\text{CO}_2 = 2 \times 44 = 88 \text{ kg}$.

112 kg CaO dan 88 kg CO_2 . Cek: $112 + 88 = 200 \text{ kg}$ ✓. Hampir separuh massa batu kapur lepas ke udara sebagai gas!



KIMIA NUSANTARA • DARI GAS ALAM KE KARUNG UREA

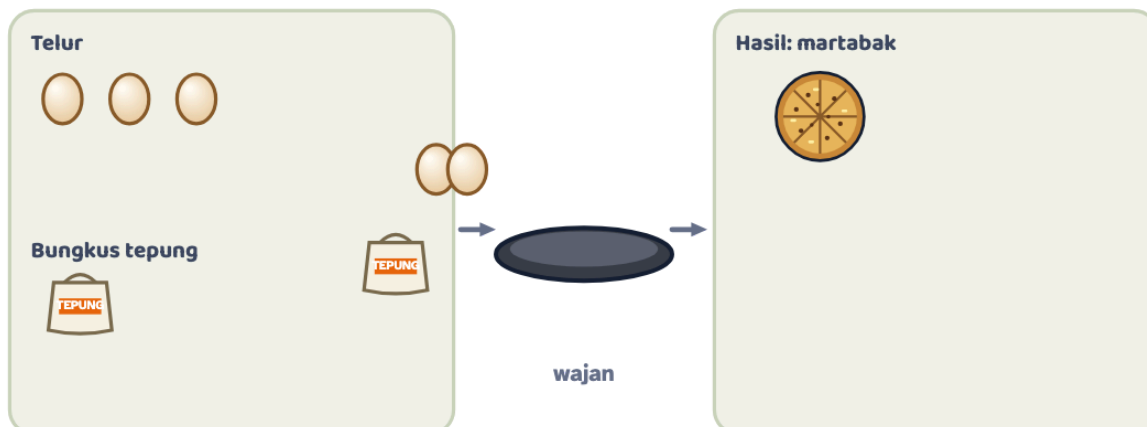
Di pabrik pupuk di Bontang, Gresik, Palembang, dan Cikampek, gas alam (metana) diolah menjadi hidrogen, lalu hidrogen digabung dengan nitrogen udara menjadi amonia: $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$. Karbon dioksida yang ikut terbentuk saat membuat hidrogen tidak dibuang begitu saja, tetapi direaksikan dengan amonia menjadi urea. Dengan stoikiometri, insinyur tahu bahwa setiap 60 ton urea membutuhkan 34 ton amonia dan 44 ton CO_2 . Satu karung urea 50 kg di sawah adalah hasil dari ribuan hitungan mol!

18.3 Pereaksi pembatas dan sisa pereaksi

Ingat teka-teki di akhir Bab 17? Resepnya 2 telur + 1 bungkus tepung $\rightarrow$ 1 adonan martabak, dan di dapur ada 7 telur serta 3 bungkus tepung. Telur cukup untuk $7 \div 2 = 3,5$ adonan, tepung hanya cukup untuk $3 \div 1 = 3$ adonan. Jadi hasilnya **3 adonan**, dan tersisa **1 telur**. Tepung adalah bahan pembatas, walaupun jumlah bungkusnya lebih sedikit dan "terlihat" tidak penting.

Bahasa sederhana • Dalam reaksi kimia, biasanya salah satu pereaksi habis lebih dulu. Begitu ia habis, reaksi berhenti, sebanyak apa pun pereaksi lain yang masih ada. Pereaksi yang habis duluan itu menentukan berapa banyak produk yang bisa dibuat.

Resep: 2 telur + 1 bungkus tepung → 1 martabak



Resep ke-2 dari 3 sedang berlangsung...

	telur	tepung	martabak
Mula-mula	7	3	0
Reaksi	-2	-1	+1
Sisa	5	2	1

Hasil

3 martabak

Sisa A

1 telur

Sisa B

0 tepung

Pereaksi pembatas

tepung

Mode **dapur**: atur jumlah telur dan bungkus tepung, lalu tekan ►. Mode **molekul**: bahan yang sama menjadi molekul H_2 dan O_2 yang bergabung membentuk H_2O . Coba buat 8 molekul H_2 dan 3 molekul O_2 : siapa yang tersisa? Lalu cari kombinasi yang membuat *tidak ada* sisa sama sekali.



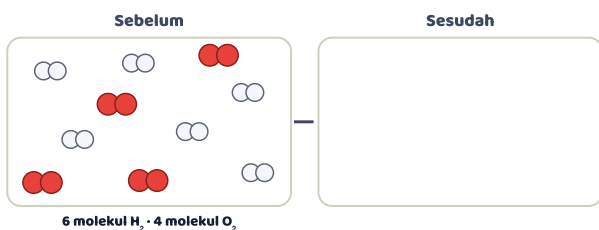
DEFINISI • PEREAKSI PEMBATAS

Pereaksi pembatas adalah pereaksi yang habis lebih dulu dalam reaksi, sehingga menentukan jumlah maksimum produk. Pereaksi lain yang masih tersisa disebut **pereaksi berlebih**, dan jumlah yang tidak ikut bereaksi disebut **sisa pereaksi**.

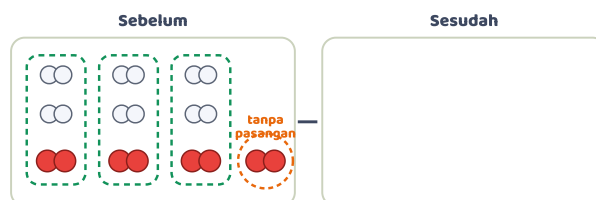


ATURAN • MENEMUKAN PEREAKSI PEMBATAS

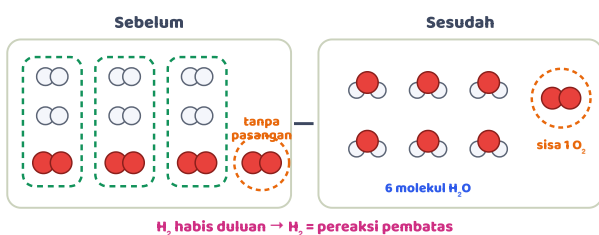
1. Ubah jumlah setiap pereaksi menjadi mol.
2. Bagi mol setiap pereaksi dengan koefisiennya: $\frac{n_A}{a}$ dan $\frac{n_B}{b}$.
3. **Hasil bagi terkecil = pereaksi pembatas**. Semua jumlah produk dan sisa dihitung dari pereaksi ini.



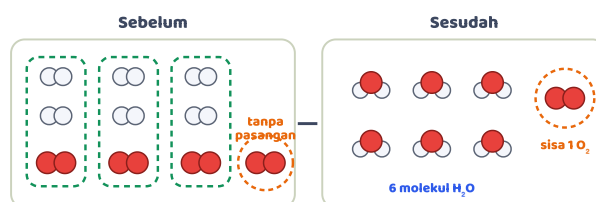
Langkah 1. Campuran berisi 6 molekul H_2 dan 4 molekul O_2 . Hidrogen lebih banyak, jadi pasti oksigen yang habis duluan... benarkah?



Langkah 2. Kelompokkan sesuai resep $2\text{H}_2 + \text{O}_2$: setiap O_2 butuh dua H_2 . Molekul H_2 hanya cukup untuk 3 kelompok, sehingga satu O_2 tidak kebagian pasangan.



Langkah 3. Terbentuk 6 molekul H_2O dan 1 molekul O_2 tersisa. H_2 habis duluan: H_2 **adalah pereaksi pembatas**, padahal jumlahnya lebih banyak! Cek: $6/2 = 3$ lebih kecil daripada $4/1 = 4$.



	2H_2	O_2	→	$2\text{H}_2\text{O}$
M (mula-mula)	6	4		0
R (reaksi)	-6	-3		+6
S (sisa)	0	1		6

Langkah 4. Catat dalam **tabel M-R-S** (Mula-mula, Reaksi, Sisa). Baris R selalu sebanding dengan koefisien: $6 : 3 : 6 = 2 : 1 : 2$. Tabel ini bekerja persis sama untuk mol.

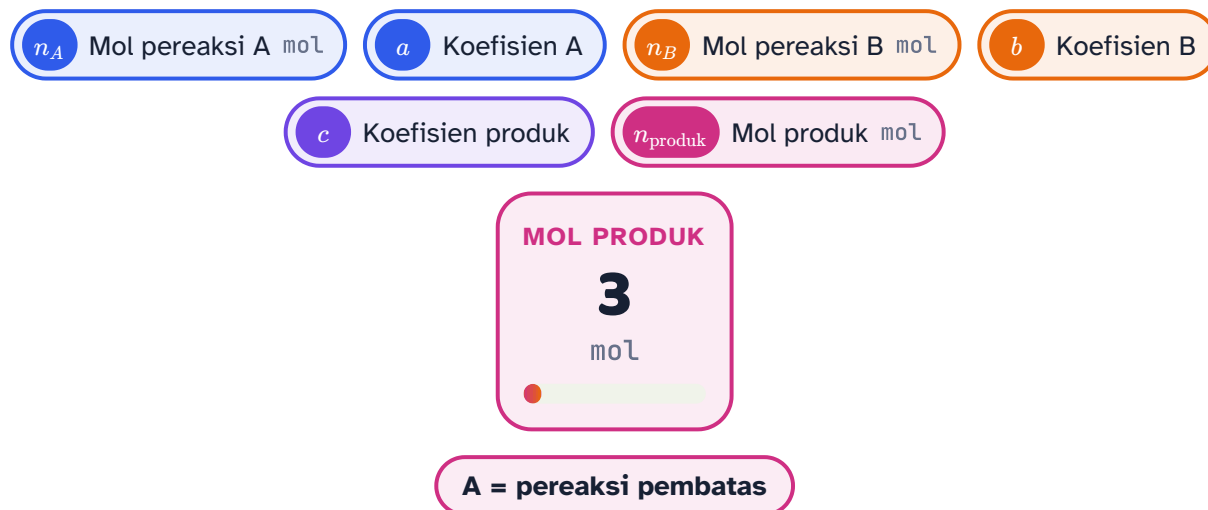


AWAS JEBAKAN

Pereaksi dengan massa terkecil, atau dengan jumlah mol terkecil, belum tentu pembatas. Yang dibandingkan adalah **mol dibagi koefisien**. Pada langkah di atas, H_2 punya mol lebih besar ($6 > 4$), tetapi koefisiennya 2, sehingga ia tetap habis duluan.

$$n_{\text{produk}} = c \times \min\left(\frac{n_A}{a}, \frac{n_B}{b}\right)$$

Hitung berapa kali 'resep' bisa dijalankan oleh setiap pereaksi. Yang paling sedikit menentukan jumlah produk.



A cukup untuk **1,5** kali resep, B cukup untuk **2** kali resep. Pembatas: **A**. Sisa A = **0** mol, sisa B = **0,5** mol.

Cek satuan: mol ÷ koefisien × koefisien = mol ✓

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

Sebuah reaktor uji diisi 68 kg NH_3 dan 66 kg CO_2 . Reaksinya $2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$. Tentukan pereaksi pembatas, massa urea maksimum, dan massa pereaksi yang tersisa. (Mr $\text{NH}_3 = 17$, $\text{CO}_2 = 44$, urea = 60, $\text{H}_2\text{O} = 18$)

1 Massa $\rightarrow$ mol: $\text{NH}_3 = 68/17 = 4$ kmol; $\text{CO}_2 = 66/44 = 1,5$ kmol.

2 Bagi dengan koefisien: $\text{NH}_3: 4/2 = 2$; $\text{CO}_2: 1,5/1 = 1,5$. Terkecil: $\text{CO}_2 = \text{pembatas}$.

3 Tabel M-R-S (dalam kmol):

	2NH_3	CO_2	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	H_2O
Mula-mula	4	1,5	0	0
Reaksi	-3	-1,5	+1,5	+1,5
Sisa	1	0	1,5	1,5

4 Mol $\rightarrow$ massa: urea = $1,5 \times 60 = 90$ kg; sisa $\text{NH}_3 = 1 \times 17 = 17$ kg; air = $1,5 \times 18 = 27$ kg.

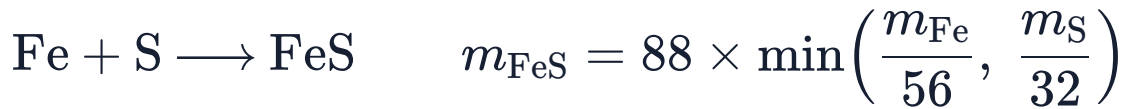
CO_2 pembatas; terbentuk 90 kg urea dan tersisa 17 kg NH_3 . Cek: $68 + 66 = 134$ kg = $90 + 27 + 17$ ✓



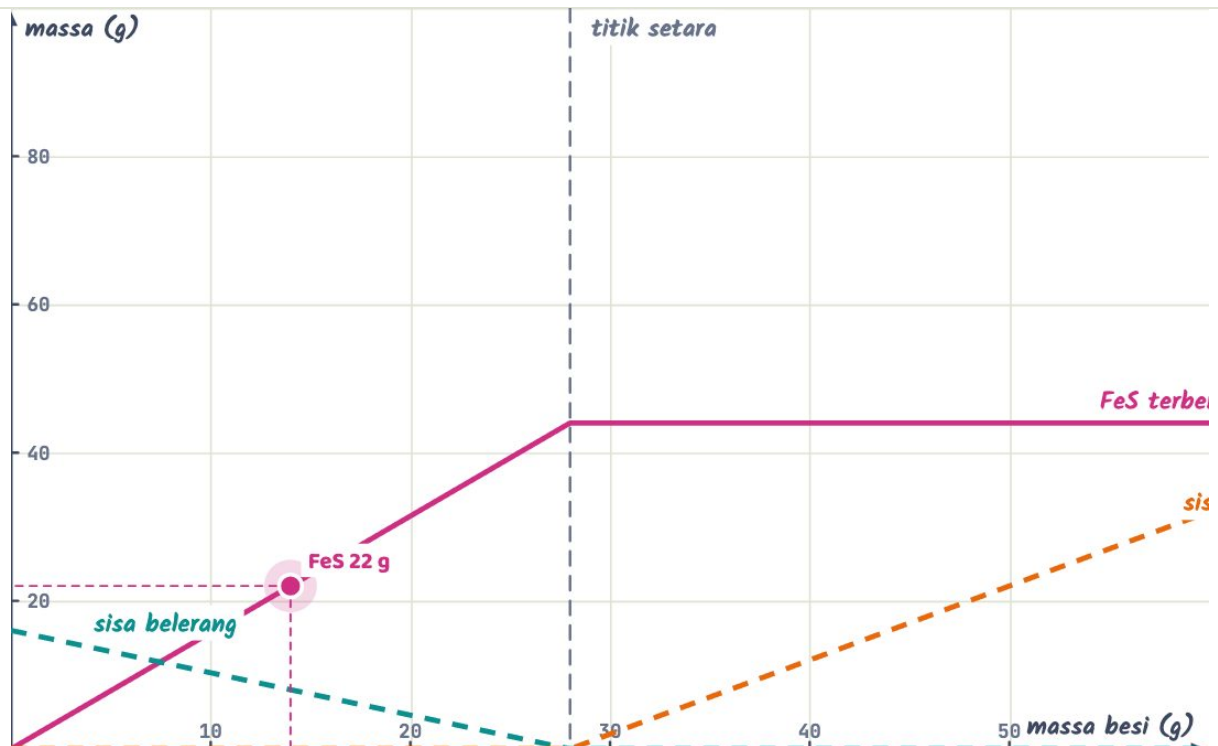
PEMBATAS YANG DISENGAJA

Pabrik urea sungguhan justru sengaja memberi amonia berlebih, kira-kira 3 sampai 4 mol NH_3 untuk setiap mol CO_2 , lebih banyak dari resep 2 : 1. Dengan begitu, CO_2 menjadi pembatas dan lebih banyak yang berubah menjadi urea. Amonia sisanya dipisahkan lalu dialirkan kembali ke reaktor. Memilih pereaksi pembatas adalah keputusan teknik dan ekonomi!

Apa yang terjadi bila satu pereaksi terus ditambah, sementara yang lain tetap? Di laboratorium sekolah, serbuk besi dan belerang dipanaskan bersama (oleh guru, di ruang berventilasi) membentuk besi(II) sulfida. Belerangnya boleh jadi berasal dari kawah Ijen! Seret titiknya dan perhatikan di mana grafik produk berhenti naik.



$$m_{\text{Fe}} = 14 \text{ g}, \quad m_{\text{S}} = 16 \text{ g} \Rightarrow m_{\text{FeS}} = 22 \text{ g}$$



besi habis duluan: Fe = pembatas, belerang bersisa

mol Fe

0,25 mol

mol S

0,5 mol

massa FeS

22 g

pembatas

besi

Sebelum titik setara, menambah besi menambah FeS (garis magenta naik). Sesudahnya, belerang sudah habis, sehingga besi tambahan hanya menjadi sisa (garis oranye putus-putus naik) dan FeS mendatar. Ubah massa belerang: ke mana titik patahnya bergeser? Mengapa letaknya selalu di $m_{\text{Fe}} = 1,75 \times m_{\text{S}}$?

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Bagi mol dengan koefisien ($\text{H}_2 \div 2$, $\text{O}_2 \div 1$). Yang terkecil adalah pembatas; mol $\text{H}_2\text{O} = 2 \times$ hasil bagi terkecil.

**Tebak Dulu!**

Laras mengendapkan kalsium karbonat dan memperoleh 10,8 g endapan, padahal menurut hitungan stoikiometri hasil maksimumnya 10,0 g (rendemen 108%). Apa penjelasan yang paling masuk akal?

Laras beruntung; reaksinya berjalan "lebih dari sempurna".

Sebagian atom produk tercipta dari panas reaksi.

Endapannya belum kering atau masih tercampur zat lain.

Hasil teoretis hanya perkiraan kasar, jadi wajar sering terlampaui.

Jawabannya: endapan belum kering atau tidak murni. Hasil teoretis adalah batas atas yang dihitung dari pereaksi pembatas; atom tidak bisa muncul dari ketiadaan. Massa berlebih hampir selalu berasal dari air yang belum menguap atau pengotor yang ikut terendapkan. Solusinya: keringkan sampai massanya tetap, lalu timbang ulang.

Hitungan stoikiometri memberi **hasil teoretis**: jumlah produk maksimum bila semua pereaksi pembatas berubah sempurna menjadi produk. Di dunia nyata, hasilnya hampir selalu lebih kecil. Penyebabnya antara lain:

- reaksi tidak berjalan tuntas atau mencapai kesetimbangan (Bab 22);
- terjadi reaksi samping yang membuat produk lain;
- sebagian produk hilang saat disaring, dipindahkan, atau dimurnikan;
- pereaksi tidak murni, sehingga zat yang benar-benar bereaksi lebih sedikit dari yang ditimbang.

**DEFINISI • RENDEMEN DAN KEMURNIAN**

Hasil teoretis adalah massa produk maksimum menurut stoikiometri; **hasil nyata** adalah massa produk yang benar-benar diperoleh. **Rendemen** (persen hasil) membandingkan keduanya:

$$\% \text{ rendemen} = \frac{\text{hasil nyata}}{\text{hasil teoretis}} \times 100\% \quad \% \text{ kemurnian} = \frac{\text{massa zat murni}}{\text{massa sampel}} \times 100\%$$

Kemurnian menyatakan bagian zat yang diinginkan di dalam bahan yang kita timbang.

$$\% \text{ rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{m_{\text{teoretis}}} \times 100\%$$

Dari setiap 100 bagian produk yang seharusnya terbentuk, berapa bagian yang benar-benar kamu dapatkan?

 m_{nyata}

Hasil nyata g

 m_{teoretis}

Hasil teoretis g

 $\% \text{ rendemen}$

Rendemen %

RENDEMEN

84

%

Dari setiap 100 g produk yang seharusnya terbentuk, kamu memperoleh **84 g**.

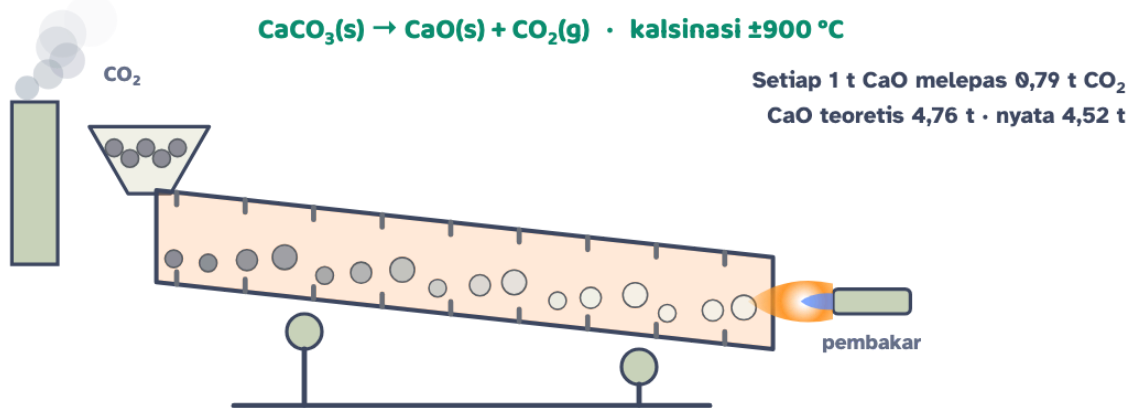
Cek satuan: $\text{g} \div \text{g} \times 100\% = \% \checkmark$

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

**AWAS JEBAKAN**

Rendemen tidak mungkin melebihi 100% bila produknya murni dan kering. Angka di atas 100% adalah tanda bahaya: produk masih mengandung air, pelarut, atau pengotor, atau ada kesalahan menimbang. Jangan pula menghitung hasil teoretis dari pereaksi berlebih; hasilnya akan terlalu besar.

Bahan alam hampir tidak pernah murni. Batu kapur dari tambang mengandung tanah liat dan pasir, bijih nikel bercampur besi dan batuan. Karena itu, sebelum memakai stoikiometri, kalikan dulu massa bahan dengan kemurniannya. Coba atur tanur di bawah ini dan perhatikan neraca massanya.



1 karung = 1 t CaO

Masuk	CaCO ₃ 8,5	10 t
Keluar	CaO 4,5 CO ₂ 3,6	10 t

CaCO₃ murni
8,5 t

CaO teoretis
4,76 t

CaO nyata
4,52 t

CO₂ ke udara
3,55 t

Total keluar
10 t

Atur massa batu kapur, kemurnian, dan rendemen. Bandingkan dua batang di bawah: massa yang **masuk** selalu sama dengan massa yang **keluar** (kapur tohor + CO₂ + batu kapur yang belum terurai + pengotor). Berapa ton CO₂ yang dilepas untuk setiap ton kapur tohor?



KIMIA NUSANTARA • SEMEN DAN NIKEL

Pabrik semen di Tuban, Padang, Pangkep, dan Bogor memanaskan batu kapur bersama tanah liat hingga sekitar 1.450°C menjadi klinker. Batu kapurnya tidak 100% CaCO_3 , jadi kadarnya diperiksa setiap hari di laboratorium pabrik. Di Sulawesi dan Maluku Utara, bijih nikel laterit hanya berkadar sekitar 1,5–2% nikel. Untuk memperoleh satu ton nikel, smelter harus mengolah puluhan ton bijih. Hitungan kemurnian menentukan untung atau rugi!

Sebanyak 10,0 ton batu kapur berkadar 85% CaCO_3 dipanaskan dan menghasilkan 4,50 ton CaO . Hitung hasil teoretis CaO dan rendemennya. ($M_r \text{ CaCO}_3 = 100$, $\text{CaO} = 56$)

- 1 Massa CaCO_3 murni $= 85\% \times 10,0 = 8,50$ ton.
- 2 Mol $\text{CaCO}_3 = 8,50 \times 10^6 \text{ g} \div 100 = 8,50 \times 10^4 \text{ mol} = \text{mol CaO (1 : 1)}$.
- 3 Hasil teoretis $\text{CaO} = 8,50 \times 10^4 \times 56 = 4,76 \times 10^6 \text{ g} = 4,76$ ton.
- 4 Rendemen $= \frac{4,50}{4,76} \times 100\% = 94,5\%$.

Hasil teoretis 4,76 ton CaO , rendemen 94,5%. Perhatikan: kalau kemurnian dilupakan, hasil teoretis menjadi 5,60 ton dan rendemen tampak hanya 80%. Pengotor bukan kesalahan reaksi!



TAMU DARI MASA LALU · ROTI DARI UDARA

Pada 1909, **Fritz Haber** berhasil membuat amonia dari nitrogen udara dan hidrogen di laboratoriumnya. **Carl Bosch** lalu membesarkan prosesnya menjadi pabrik raksasa yang mulai beroperasi pada 1913. Keduanya meraih Hadiah Nobel Kimia (Haber 1918, Bosch 1931). Pupuk dari proses Haber-Bosch kini ikut memberi makan miliaran orang; diperkirakan sekitar separuh atom nitrogen di tubuh manusia pernah melewati pabrik amonia.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

RENDEMEN SEKALI LEWAT VS RENDEMEN KESELURUHAN

Reaksi $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3$ adalah reaksi kesetimbangan. Pada kondisi pabrik (sekitar 400–450 °C dan 150–250 atm dengan katalis besi), hanya sekitar 15% campuran gas berubah menjadi amonia dalam *satu kali lewat* reaktor. Pabrik lalu mendinginkan gas sehingga NH_3 mencair dan terpisah, sedangkan N_2 dan H_2 yang belum bereaksi dikembalikan ke reaktor berulang-ulang.

Dengan daur ulang ini, rendemen keseluruhan bisa lebih dari 95%. Pelajarannya: rendemen per tahap yang rendah tidak selalu berarti boros, asalkan pereaksi yang belum bereaksi bisa dipakai lagi. Untuk reaksi berurutan tanpa daur ulang, rendemen keseluruhan adalah **hasil kali** rendemen tiap tahap (subbab 18.6).

MITOS

"Pereaksi yang massanya paling kecil pasti habis duluan."

MITOS

"Kalau satu pereaksi ditambah terus, produknya ikut bertambah terus."

FAKTA

Yang menentukan adalah mol dibagi koefisien. 3 g H_2 (1,5 mol) justru bersisa ketika direaksikan dengan 16 g O_2 (0,5 mol).

FAKTA

Hanya sampai pereaksi lain habis. Setelah titik setara, tambahan pereaksi hanya menjadi sisa. Lihat grafik besi–belerang yang mendatar.

MITOS

"Rendemen bisa lebih dari 100% kalau sedang beruntung."

MITOS

"Rendemen 100% berarti prosesnya ramah lingkungan."

FAKTA

Atom tidak bisa diciptakan. Rendemen di atas 100% berarti produk masih basah, tercampur pengotor, atau ada kesalahan menimbang.

FAKTA

Belum tentu. Kalsinasi batu kapur dengan rendemen 100% tetap membuang 44% massa pereaksinya sebagai CO_2 . Ukuran lainnya adalah ekonomi atom (18.6).



ADU CEPAT

Rendemen kilat

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$$\text{Rendemen} = \text{hasil nyata} \div \text{hasil teoretis} \times 100\%.$$

18.5 Stoikiometri gas dan larutan

Gas dan larutan jarang ditimbang; gas diukur volumenya, larutan diukur volume dan konsentrasinya. Jembatan mol tetap sama, hanya pintu masuknya yang berbeda.

$$n = \frac{m}{M_r} \quad n_{\text{gas}} = \frac{V}{22,4 \text{ L/mol}} \text{ (STP) atau } \frac{V}{24 \text{ L/mol}}$$

Untuk reaksi yang semua zatnya gas pada suhu dan tekanan yang sama, ada jalan pintas dari Hukum Gay-Lussac (Bab 16): **perbandingan volume = perbandingan koefisien**. Kita tidak perlu mengubah ke mol sama sekali!

KERJAKAN BERSAMA

Kompore LPG butuh berapa banyak udara?

Sebuah kompor membakar sempurna 1,2 L gas propana (anggap LPG = propana). Berapa liter oksigen yang dibutuhkan dan berapa liter udara yang harus mengalir ke api? Udara mengandung $\pm 21\%$ oksigen (volume), semua volume diukur pada suhu dan tekanan yang sama.

- 1 Persamaan setara: $\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \longrightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$.
- 2 Perbandingan volume = koefisien: $V_{\text{O}_2} = 1,2 \times 5 = 6,0 \text{ L}$.
- 3 Udara: $V_{\text{udara}} = 6,0 \div 0,21 \approx 28,6 \text{ L}$.
- 4 Bonus: $V_{\text{CO}_2} = 1,2 \times 3 = 3,6 \text{ L}$ gas karbon dioksida dilepas ke dapur.

Butuh 6,0 L oksigen, kira-kira 29 L udara, untuk setiap 1,2 L propana. Jika udara kurang, pembakaran menjadi tidak sempurna: api menguning dan terbentuk gas CO yang beracun. Dapur perlu ventilasi!

Untuk larutan, kita memakai **molaritas** (M), yaitu jumlah mol zat terlarut dalam setiap liter larutan. Larutan HCl 0,1 M berisi 0,1 mol HCl per liter. Jadi mol zat dalam sejumlah larutan adalah $n = M \times V$ (dengan V dalam liter).



MOLARITAS SEKILAS

Cuka dapur berkadar 5% berisi sekitar 5 g asam asetat (CH_3COOH , Mr 60) dalam 100 mL, yaitu 50 g/L. Molaritasnya $50 \div 60 \approx 0,83 \text{ mol/L}$. Konsentrasi larutan akan kamu alami di Bab 23.

CONTOH Tablet antasida melawan asam lambung

Satu tablet antasida mengandung 0,232 g magnesium hidroksida, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (Mr 58). Berapa mL asam lambung (anggap HCl 0,1 M) yang dapat dinetralkan? $\text{Mg}(\text{OH})_2 + 2 \text{HCl} \longrightarrow \text{MgCl}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

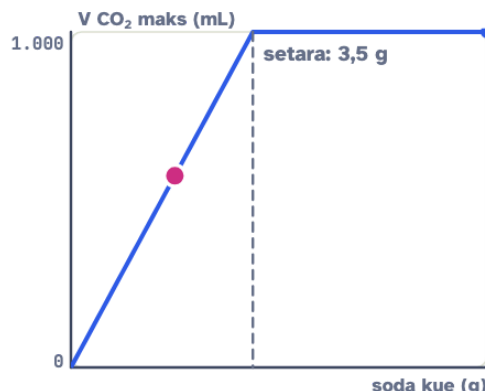
- 1 Massa $\rightarrow$ mol: $n_{\text{Mg}(\text{OH})_2} = 0,232 \div 58 = 0,004 \text{ mol}$.
- 2 Mol $\rightarrow$ mol: $n_{\text{HCl}} = 0,004 \times 2 = 0,008 \text{ mol}$.
- 3 Mol $\rightarrow$ volume larutan: $V = n \div M = 0,008 \div 0,1 = 0,08 \text{ L}$.

Satu tablet menetralkan 80 mL asam lambung 0,1 M. Itu sebabnya dosis antasida diatur: terlalu sedikit tidak meredakan perih, terlalu banyak bisa membuat lambung terlalu basa.

Sekarang gabungkan semuanya: padatan (soda kue), larutan (cuka), dan gas (karbon dioksida) dalam satu reaktor sederhana yang bisa kamu buat di dapur.

LAB MINI Reaktor Balon: soda kue + cukaLAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18

50 mL cuka 5%



Cuka: 0,0417 mol asam asetat
cukup untuk 3,5 g soda kue

Pembatas: soda kue

Soda kue ditambah? Balon membesar.

mol NaHCO_3
0,0238 mol

mol CH_3COOH
0,0417 mol

Pembatas
soda kue

CO_2 (suhu kamar)
571 mL

Sisa

1,07 g asam asetat

Atur massa soda kue di dalam balon, volume cuka, dan kadarnya, lalu tekan ► untuk menuang soda kue ke dalam botol. Pada massa soda kue berapa balon berhenti membesar? Lihat grafik di kanan: titik patahnya adalah tempat soda kue dan asam asetat tepat habis bersamaan.

**AWAS JEBAKAN**

Perbandingan volume sama dengan perbandingan koefisien hanya untuk zat berwujud gas pada suhu dan tekanan yang sama. Air cair, padatan, dan zat terlarut tidak ikut aturan ini. Volume larutan juga bukan "volume molar": 1 mol zat terlarut tidak menempati 22,4 L larutan!

**ADU CEPAT****Volume gas kilat: $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$** ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-18**Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.**

Untuk gas, volume ÷ koefisien seperti mol ÷ koefisien. $\text{N}_2 \div 1$, $\text{H}_2 \div 3$; yang terkecil dikali 2.

18.6 Lanjut: reaksi berurutan, analisis campuran, dan ekonomi atom

Banyak produk dibuat lewat beberapa reaksi berturut-turut. Kapur sirih yang dioleskan pada daun sirih, misalnya, adalah kalsium hidroksida yang dibuat dari batu kapur dalam dua tahap:



Kuncinya: **mol produk tahap pertama menjadi mol pereaksi tahap kedua**. Karena perbandingannya 1 : 1 dan 1 : 1, setiap mol CaCO_3 akhirnya menjadi satu mol Ca(OH)_2 : 100 g batu kapur murni menghasilkan paling banyak 74 g kapur sirih. Bila rendemen tahap pertama 90% dan tahap kedua 95%, rendemen keseluruhannya $0,90 \times 0,95 = 85,5\%$.

COBA SENDIRI Nitrogen udara untuk satu ton urea

Urea dibuat lewat dua tahap: $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{NH}_3$, lalu $2 \text{NH}_3 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CO(NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$. Berapa ton N_2 dibutuhkan untuk membuat 1,00 ton urea, jika rendemen tahap amonia 95% dan tahap urea 98%? (M_r urea = 60, N_2 = 28)

- 1 Mol urea: $1,00 \times 10^6 \text{ g} \div 60 = 1,667 \times 10^4 \text{ mol}$.
- 2 Rantai koefisien: $1 \text{ urea} \leftarrow 2 \text{ NH}_3 \leftarrow 1 \text{ N}_2$. Jadi tanpa kehilangan, $n_{\text{N}_2} = n_{\text{urea}} = 1,667 \times 10^4 \text{ mol} \rightarrow 0,467 \text{ ton}$.
- 3 Rendemen keseluruhan = $0,95 \times 0,98 = 0,931$.
- 4 N_2 yang dibutuhkan = $0,467 \div 0,931 = 0,501 \text{ ton}$.

Sekitar 0,50 ton N_2 . Cek: urea berkadar N 46,7% (Bab 17), jadi 1 ton urea memang berisi 0,467 ton nitrogen; sisanya menutup kehilangan di kedua tahap.



ANALISIS CAMPURAN: MEMBONGKAR BATU DOLOMIT

Batu dolomit dari Gresik dan Madura dipakai sebagai kapur pertanian. Isinya campuran CaCO_3 (Mr 100) dan MgCO_3 (Mr 84). Bagaimana mengetahui komposisinya? Panaskan sampai massanya tetap; kedua karbonat melepas CO_2 :



Misalkan 9,20 g sampel kehilangan 4,40 g (= 0,100 mol CO_2). Jika massa $\text{CaCO}_3 = x$ g, maka

$$\frac{x}{100} + \frac{9,20 - x}{84} = 0,100 \Rightarrow x = 5,00 \text{ g}$$

Jadi sampel berisi 5,00 g CaCO_3 (0,0500 mol) dan 4,20 g MgCO_3 (0,0500 mol): perbandingan mol 1 : 1, persis seperti mineral dolomit, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Strateginya selalu sama: satu persamaan untuk massa total, satu persamaan untuk mol hasil yang diukur, lalu selesaikan.

Rendemen menjawab "berapa banyak produk yang kudapat?", tetapi tidak menjawab "berapa banyak atom yang terbangun?". Untuk itu, kimia hijau memakai **ekonomi atom**: persentase massa semua pereaksi yang berakhir di produk yang diinginkan.

$$\% \text{ ekonomi atom} = \frac{\text{massa molar total produk yang d}}{\text{massa molar total semua per}}$$

Reaksi (produk yang diinginkan ditebalkan)	Perhitungan	Ekonomi atom
Haber: $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \longrightarrow 2\text{NH}_3$	$34 \div (28 + 6)$	100%
Urea: $2 \text{NH}_3 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$	$60 \div (34 + 44)$	76,9%
Bioetanol dari tetes tebu: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \longrightarrow 2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2 \text{CO}_2$	$92 \div 180$	51,1%
Kapur tohor: $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	$56 \div 100$	56%

$$\% \text{ EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{pereaksi}}} \times 100\%$$

Dari semua atom yang kita masukkan, berapa persen yang benar-benar menjadi produk yang kita inginkan?

M_{produk} Massa molar produk yang diinginkan ($\times$ koefisien) g/mol

M_{pereaksi} Jumlah massa molar semua pereaksi ($\times$ koefisien) g/mol

$\% \text{ EA}$ Ekonomi atom %

EKONOMI ATOM

76,9

%

 pabrik urea: 76,9%

Dari setiap 100 kg pereaksi, **76,9** kg berakhir di produk yang diinginkan.

Cek satuan: (g/mol) $\div$ (g/mol) $\times$ 100% = % ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-STOI-EKONOMI-ATOM](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-stoi-ekonomi-atom)



TRIK KAK TIRTA · RENDEMEN VS EKONOMI ATOM

Rendemen menilai **kerja di laboratorium**: seberapa dekat hasilmu dengan batas teoretis. Ekonomi atom menilai **rancangan reaksinya** di atas kertas: seberapa banyak atom yang terbuang sebagai produk samping, sebelum reaksi dijalankan. Proses yang hebat punya keduanya tinggi.

Kimia di sekitarmu



Pabrik pupuk

Insinyur pabrik urea menakar amonia dan CO_2 dalam satuan kilomol per jam. Salah takar berarti ribuan ton bahan mahal terbuang setiap tahun.



Semen dan CO_2

Setiap ton kapur tohor yang dibuat dari batu kapur melepas $\pm 0,79$ ton CO_2 dari reaksinya saja ($44 \div 56$). Karena itu industri semen berlomba mengurangi kadar klinker.



Nikel Sulawesi

Bijih laterit berkadar $\pm 1,8\%$ nikel berarti satu ton bijih berisi paling banyak sekitar 18 kg nikel. Bahan baku baterai kendaraan listrik dimulai dari hitungan kemurnian.



Motor injeksi

Sensor oksigen di knalpot menjaga perbandingan udara : bensin dekat $\pm 14,7 : 1$ (massa), yaitu campuran stoikiometris agar bensin terbakar habis dan emisinya rendah.



Kantong udara mobil

Pada kantong udara jenis lama, sekitar 100 g natrium azida terurai,
 $2 \text{NaN}_3 \rightarrow 2 \text{Na} + 3 \text{N}_2$,
menghasilkan ± 55 L gas nitrogen dalam waktu sekitar 0,03 detik.



Tempe

Pengrajin tempe menakar ragi sesuai banyaknya kedelai. Ragi terlalu sedikit membuat fermentasi lambat; ragi berlebih hanya membuang uang. Itulah "pereaksi pembatas" versi dapur.

Cek Cepat

Pada reaksi $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$, berapa mol H_2 yang diperlukan untuk membuat 4 mol NH_3 ?

2 mol

4 mol

6 mol

12 mol

Sebanyak 10 g zat A direaksikan dengan 10 g zat B. Manakah pereaksi pembatasnya?

A

B

Keduanya habis bersamaan karena massanya sama

Belum bisa ditentukan sebelum massa diubah ke mol dan dibagi koefisien

Hasil teoretis suatu percobaan 20 g, tetapi produk kering yang diperoleh 15 g. Berapa rendemennya?

75%

133%

25%

15%

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. D · 3. A



Tantangan Rumah: balon soda kue, kapan berhenti membesar?

Bahan: 4 botol plastik bekas sejenis (± 600 mL), 4 balon karet yang sama, soda kue, cuka dapur ($\pm 5\%$), sendok teh, corong kertas, gelas takar, meteran jahit, kaca mata (kacamata renang atau kaca mata biasa).

1. Isi setiap botol dengan 50 mL cuka. Jika label cuka menulis 25%, encerkan dulu: 1 bagian cuka + 4 bagian air.
2. Dengan corong kertas, isi balon dengan $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, dan 2 sendok teh soda kue (satu takaran per balon).
3. Pasang mulut balon ke mulut botol tanpa menumpahkan soda kuenya, lalu tegakkan balon agar soda kue jatuh ke cuka.
4. Setelah gelembung berhenti, ukur keliling balon di bagian terlebar dan perhatikan apakah ada serbuk putih yang tersisa di dasar botol.

Keselamatan: Lakukan bersama orang dewasa dan pakai kaca mata, karena cipratan cuka terasa perih di mata. Gunakan botol plastik, bukan botol kaca, dan jangan menutup botol dengan tutup ulir. Jangan menghirup atau meniup gas dari balon, dan jangan mencicipi campurannya. Buang cairan sisa ke wastafel sambil dialiri banyak air, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Mengapa balon berisi 1 sendok teh dan 2 sendok teh soda kue hampir sama besar? Di botol mana cuka menjadi pereaksi pembatas, dan apa buktinya? (Petunjuk: 50 mL cuka 5% hanya cukup untuk $\pm 3,5$ g soda kue, kira-kira $\frac{3}{4}$ sendok teh.)



RINGKASAN KILAT

Bab 18 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membaca **koefisien** persamaan setara sebagai perbandingan mol, lalu menghitung massa produk dari massa pereaksi
- menentukan **pereaksi pembatas** dan **sisa pereaksi** dengan tabel mula-mula, reaksi, sisa
- menghitung **hasil teoretis**, **rendemen**, dan **kemurnian** pada proses nyata seperti pabrik semen dan pupuk
- menerapkan stoikiometri pada **gas** (volume molar) dan **larutan** (molaritas sebagai pengantar)
- menyelesaikan reaksi berurutan dan analisis campuran, serta menilai **ekonomi atom** suatu proses



Istilah kunci

Stoikiometri

Pereaksi pembatas

pereaksi berlebih

sisa pereaksi

Hasil teoretis

hasil nyata

Rendemen

Kemurnian

molaritas

ekonomi atom



Rumus penting

$$m_B = \frac{m_A}{M_A} \times \frac{b}{a} \times M_B$$

Massa produk dari massa pereaksi. Ubah massa A ke mol, kalikan dengan perbandingan koefisien (resenya), lalu ubah mol B kembali ke massa.

$$n_{\text{produk}} = c \times \min\left(\frac{n_A}{a}, \frac{n_B}{b}\right)$$

Pereaksi pembatas: bagi dengan koefisien.

Hitung berapa kali 'resep' bisa dijalankan oleh setiap pereaksi. Yang paling sedikit menentukan jumlah produk.

$$\% \text{ rendemen} = \frac{m_{\text{nyata}}}{m_{\text{teoretis}}} \times 100\%$$

Rendemen (persen hasil). Dari setiap 100 bagian produk yang seharusnya terbentuk, berapa bagian yang benar-benar kamu dapatkan?

$$\% \text{ EA} = \frac{M_{\text{produk}}}{M_{\text{pereaksi}}} \times 100\%$$

Ekonomi atom. Dari semua atom yang kita masukkan, berapa persen yang benar-benar menjadi produk yang kita inginkan?

⚠ Jangan sampai terjebak

- Koefisien adalah perbandingan mol, bukan perbandingan massa.
- Pereaksi dengan massa terkecil, atau dengan jumlah mol terkecil, belum tentu pembatas.
- Rendemen tidak mungkin melebihi 100% bila produknya murni dan kering.

📄 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=18

🧩 Teka-teki untuk Bab 19

Kantong kompres dingin instan cukup dipencet, lalu dalam beberapa detik terasa se dingin es, tanpa kulkas dan tanpa listrik. Dari mana "dingin" itu datang? Dan mengapa kantong berisi dua kali lebih banyak bahan bisa menyerap kalor dua kali lebih banyak?

▼ Intip petunjuk

Di dalamnya ada air dan padatan seperti amonium nitrat, bahkan urea! Saat padatan itu larut, prosesnya **menyerap kalor** dari sekitarnya, termasuk dari kulitmu (endoterm). Banyaknya kalor sebanding dengan jumlah mol zat yang larut. Stoikiometri bertemu energi di Bab 19, Termokimia.

19 Termokimia: Kalor yang Bersembunyi di Dalam Ikatan

Kantong kecil di saku pendaki Semeru bisa hangat sendiri, sedangkan kompres dingin bisa sedingin es tanpa kulkas. Keduanya tidak menciptakan panas atau dingin: mereka hanya memindahkan energi yang tersimpan di dalam ikatan kimia. Di bab ini kamu akan belajar mengukur energi itu sampai satuan joule.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **sistem** dan **lingkungan**, serta reaksi **eksoterm** dan **endoterm**, dengan diagram tingkat energi dan profil energi;
- menulis **persamaan termokimia** dan memakai jenis-jenis ΔH standar;
- menghitung kalor dengan $q = mc\Delta T$ dan ΔH reaksi dari data **kalorimeter**;
- menghitung ΔH dengan **hukum Hess**, **entalpi pembentukan standar**, dan **energi ikatan** rata-rata;
- membandingkan **nilai kalor** bahan bakar (LPG, bensin, biodiesel sawit, kayu) dan menjelaskan mengapa melarutkan garam bisa terasa panas atau dingin.

PANAS DI KIRI, DINGIN DI KANAN

KOMIK • 4 PANEL

Malam di Ranu Kumbolo, kaki Gunung Semeru

LARAS

Brr, dinginnya menusuk tulang! Untung aku bawa kantong penghangat. Buka, kocok... nah, mulai hangat!

**BIMA**

Aduh! Kakiku terkilir kena batu. Mulai bengkok, nih...

KAK TIRTA

Tenang. Ini kompres dingin instan: tekan sampai kantong air di dalamnya pecah, kocok, lalu tempelkan.



BIMA
Dingin banget, padahal tidak ada es! Jadi kantong Laras membuat panas, kantongku membuat dingin?

KAK TIRTA
Hampir! Kantongmu **menyerap** kalor dari kakimu. Kantong Laras **melepas** kalor ke tangannya.

Esok paginya, di dalam tenda

KIMO
Fakta Kimo: penghangat berisi serbuk besi yang berkarat super cepat. Kompres dingin berisi kristal yang menyerap kalor saat larut!

LARAS
Energi tidak muncul atau hilang, hanya berpindah. Aku mau mengukurnya!

Tebak Dulu!

Kompres dingin instan ditempelkan ke kakimu yang terkilir dan terasa sangat dingin. Apa yang sebenarnya terjadi?

Kompres mengalirkan "dingin" ke dalam kulitmu.

Kompres menyerap kalor dari kulitmu, sehingga kulitmu kehilangan energi.

Kompres tidak bertukar energi; saraf kulitmu saja yang tertipu.

Air di dalam kompres membeku menjadi es.

Jawabannya: kompres menyerap kalor dari kulitmu. "Dingin" bukan zat dan tidak bisa mengalir. Yang mengalir selalu *kalor*, dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah. Kristal di dalam kompres larut sambil menyerap kalor, sehingga isi kantong menjadi lebih dingin daripada kulit. Lalu kalor dari kulitmu mengalir masuk ke kantong, dan kulitmu terasa dingin.

19.1 Sistem, lingkungan, dan arah aliran kalor

Untuk membicarakan energi, kimiawan selalu membagi dunia menjadi dua. Bagian yang sedang kita amati disebut **sistem**, biasanya zat-zat yang bereaksi. Segala sesuatu di luarnya disebut **lingkungan**: air pelarut, gelas,

udara, bahkan tanganmu.

Bahasa sederhana • Bayangkan kantong penghangat sebagai "dompet energi". Saat serbuk besi di dalamnya berkarat, dompet itu membayar energi ke tanganmu, sehingga tanganmu hangat. Kompres dingin kebalikannya: ia "menagih" energi dari kulitmu, sehingga kulitmu terasa dingin. Energinya tidak pernah hilang. Ia hanya berpindah dompet.

Jenis sistem	Materi keluar-masuk?	Energi keluar-masuk?	Contoh
Terbuka	ya	ya	panci sayur asem tanpa tutup: uap air dan kalor keluar
Tertutup	tidak	ya	kaleng minuman bersoda yang didinginkan di kulkas
Terisolasi	tidak	tidak (ideal)	termos berisi teh panas (hampir terisolasi)



DEFINISI • EKSOTERM DAN ENDOTERM

Reaksi eksoterm melepaskan kalor dari sistem ke lingkungan, sehingga lingkungan menjadi lebih hangat; perubahan entalpinya negatif ($\Delta H < 0$). **Reaksi endoterm** menyerap kalor dari lingkungan ke sistem, sehingga lingkungan menjadi lebih dingin; perubahan entalpinya positif ($\Delta H > 0$).

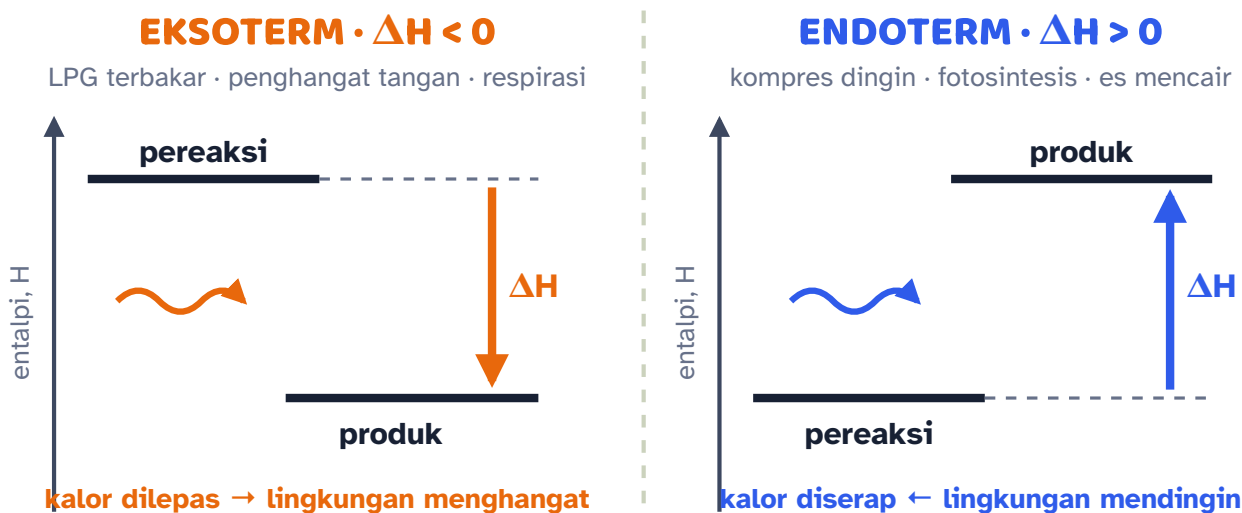


Diagram tingkat energi. Panah ΔH selalu berangkat dari pereaksi dan berakhir di produk: ke bawah berarti eksoterm (ΔH negatif), ke atas berarti endoterm (ΔH positif).

Mengapa reaksi bisa melepas atau menyerap kalor? Di tingkat partikel, energi kimia tersimpan sebagai **energi potensial**: tarik-menarik antara inti atom dan elektron di dalam ikatan. Bila ikatan-ikatan di produk lebih kuat daripada ikatan lama, selisih energinya dilepas dan membuat partikel di sekitarnya bergerak lebih cepat. Gerak partikel yang makin cepat itulah yang kita rasakan sebagai suhu yang naik. Pada reaksi endoterm terjadi

kebalikannya: energi gerak partikel di sekitarnya "dipinjam" untuk membangun produk yang berenergi lebih tinggi, sehingga partikel lingkungan melambat dan suhu turun.



AWAS JEBAKAN

Endoterm tidak berarti "tidak butuh kalor"; justru reaksi endoterm terus-menerus menyerap kalor. Penguraian batu kapur di tungku kapur langsung berhenti begitu apinya padam. Satu lagi: dalam kalorimeter, zat yang bereaksi adalah sistem, sedangkan air pelarutnya termasuk lingkungan. Jadi larutan yang menjadi dingin menandakan reaksi **endoterm**, bukan eksoterm.

MITOS

"Kalor dan suhu itu sama saja."

MITOS

"Es batu mengalirkan dingin ke dalam teh."

FAKTA

Suhu mengukur rata-rata gerak partikel; kalor adalah energi yang berpindah. Seember air hangat untuk mandi menyimpan jauh lebih banyak kalor daripada setetes air mendidih, walaupun suhunya lebih rendah.

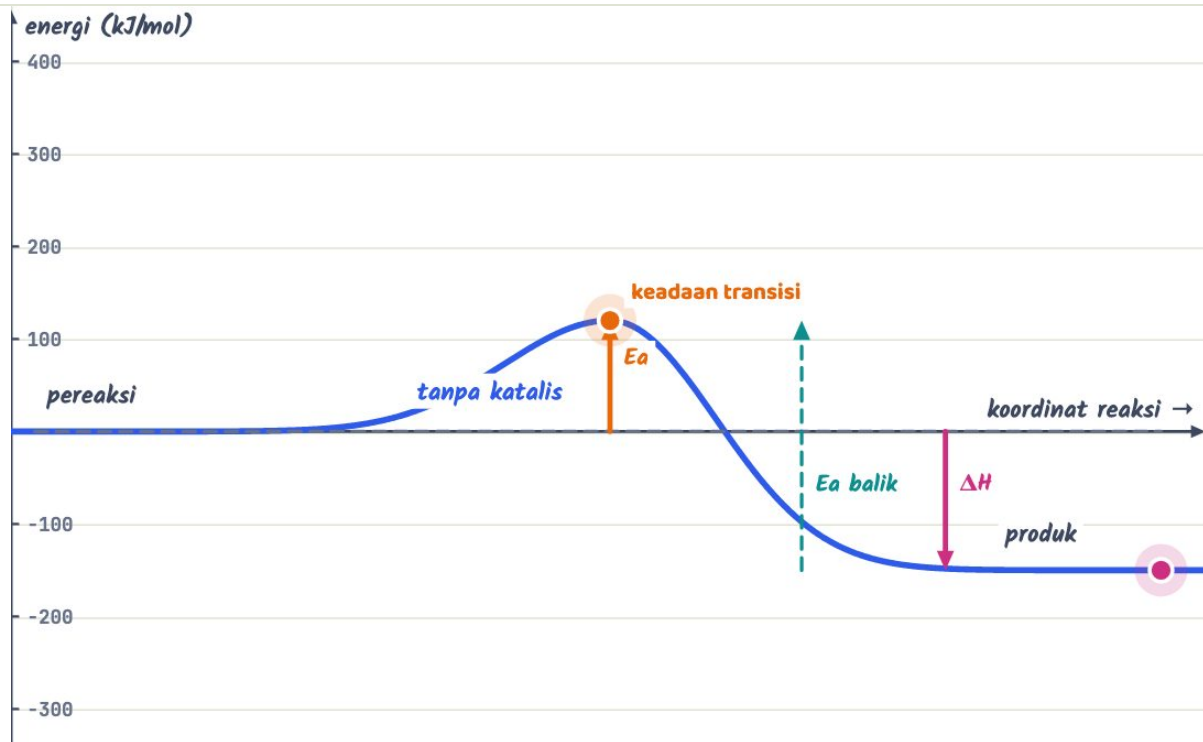
FAKTA

Yang mengalir adalah kalor, dari teh yang lebih hangat ke es. Es memakai kalor itu untuk mencair, sehingga teh kehilangan energi dan menjadi dingin.

Diagram tingkat energi hanya menunjukkan keadaan awal dan akhir. Kenyataannya, partikel harus "mendaki bukit" dulu: ikatan lama harus meregang sebelum ikatan baru terbentuk. Tinggi bukit itu disebut **energi aktivasi** (E_a). Itulah sebabnya LPG tidak menyala sendiri walaupun pembakarannya sangat eksoterm. Kompor butuh percikan pemantik untuk membawa molekul pertama melewati bukit; sesudah itu, kalor dari reaksi sendiri yang mendorong molekul berikutnya.

$$E_{a,\text{balik}} = E_a - \Delta H$$

$$\Delta H = -150, E_a = 120, E_{a,\text{balik}} = 270 \text{ (kJ/mol)}$$



eksoterm: produk lebih rendah, kalor dilepas ke lingkungan

 ΔH **-150 kJ/mol** E_a maju**120 kJ/mol** E_a balik**270 kJ/mol**

jenis

eksoterm

Seret titik oranye (puncak bukit) dan titik magenta (produk). Buat reaksi endoterm: apa yang terjadi pada tanda ΔH ? Lalu geser katalis ke 1: bukit mana yang turun, dan apakah ΔH ikut berubah? (Bab 21 akan membahas bukit ini lebih jauh.)

19.2 Entalpi dan persamaan termokimia

Kebanyakan reaksi di dapur dan di laboratorium sekolah terjadi di wadah terbuka, pada tekanan udara yang tetap. Kalor yang dipertukarkan pada tekanan tetap diberi nama khusus, yaitu **perubahan entalpi** (ΔH).



DEFINISI • ENTALPI

Entalpi (H) adalah kandungan energi total suatu zat pada tekanan tetap. Nilai mutlaknya tidak dapat diukur, tetapi perubahannya dapat:

$$\Delta H = H_{\text{produk}} - H_{\text{pereaksi}} = q_p$$

q_p adalah kalor yang diserap sistem pada tekanan tetap. Satuan ΔH adalah kJ (untuk persamaan yang ditulis) atau kJ/mol (per mol zat tertentu).

Mirip tinggi gunung: kita tidak tahu "tinggi mutlak" sebuah titik di alam semesta, tetapi kita sepakat mengukurnya dari permukaan laut. Puncak Semeru 3.676 m di atas permukaan laut. Yang penting adalah *selisih*-nya.

Persamaan reaksi yang dilengkapi ΔH disebut **persamaan termokimia**. Contohnya pembakaran gas alam (metana):

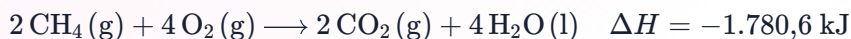


Artinya: setiap 1 mol metana yang bereaksi dengan 2 mol oksigen membentuk 1 mol CO_2 dan 2 mol air cair sambil melepaskan 890,3 kJ kalor.

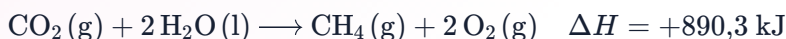


ATURAN • MEMBACA DAN MENGUBAH PERSAMAAN TERMOKIMIA

1. **Wujud zat wajib ditulis** (s, l, g, aq), karena ΔH bergantung pada wujud.
2. **Koefisien dikali, ΔH ikut dikali.**



3. **Persamaan dibalik, tanda ΔH dibalik.**





Tebak Dulu!

Hidrogen dibakar menjadi air. Kapan kalor yang dilepas per mol hidrogen lebih besar?

Bila airnya terbentuk sebagai uap, karena uap lebih panas.

Bila airnya terbentuk sebagai cairan.

Sama saja, karena reaksinya sama.

Tidak bisa diketahui tanpa kalorimeter.

Jawabannya: air cair. $\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$ melepas 285,8 kJ, sedangkan bila produknya uap hanya 241,8 kJ. Selisihnya, 44 kJ, adalah kalor yang dilepas saat uap mengembun. Itu sebabnya uap dari panci bisa melukai kulit lebih parah daripada air mendidih: uap melepas kalor tambahan saat mengembun di kulitmu.

Agar data dari seluruh dunia bisa dibandingkan, kimiawan menyepakati beberapa jenis ΔH **standar**, masing-masing untuk 1 mol zat tertentu:

Jenis	Lambang	Untuk 1 mol ...	Contoh	ΔH (kJ/mol)
Pembentukan	ΔH_f°	senyawa dibentuk dari unsur-unsurnya	$\text{C}(\text{s}) + 2 \text{H}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{CH}_4(\text{g})$	-74,8
Penguraian	ΔH_d°	senyawa diurai menjadi unsurnya	$\text{CH}_4(\text{g}) \longrightarrow \text{C}(\text{s}) + 2 \text{H}_2(\text{g})$	+74,8
Pembakaran	ΔH_c°	zat dibakar sempurna dengan O_2	$\text{C}_3\text{H}_8(\text{g}) + 5 \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow 3 \text{CO}_2(\text{g}) + 4 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	-2.220

Penetralkan	ΔH_n	air terbentuk dari asam + basa	$\text{H}^+(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	≈ -57
Pelarutan	ΔH_{sol}	zat dilarutkan dalam air	$\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s}) \longrightarrow \text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{NO}_3^-(\text{aq})$	+25,7
Penguapan	ΔH_{vap}	cairan menjadi gas (25 °C)	$\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	+44,0
Atomisasi	ΔH_{at}	atom gas terbentuk dari unsurnya	$\frac{1}{2} \text{H}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{H}(\text{g})$	+218



APA ARTI TANDA °?

Tanda ° (dibaca "standar") berarti diukur pada keadaan standar: suhu 298 K (25 °C), tekanan 1 bar (banyak buku sekolah memakai 1 atm; selisihnya sangat kecil), dan larutan 1 mol/L. Setiap unsur berada dalam wujud paling stabilnya, misalnya karbon sebagai grafit dan oksigen sebagai gas O_2 .



TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1782–1783 di Paris, **Antoine Lavoisier** dan **Pierre-Simon Laplace** membuat kalorimeter es. Seekor marmut dimasukkan ke ruang yang dikelilingi es, lalu air lelehan esnya ditimbang. Mereka mendapati bahwa kalor dari tubuh marmut kira-kira sama dengan kalor dari membakar arang yang menghasilkan jumlah CO_2 yang sama. Kesimpulan mereka: bernapas adalah sejenis pembakaran yang lambat!

19.3

Kalorimetri: mengukur kalor dengan termometer

Kita tidak bisa menempelkan termometer pada sebuah ikatan. Yang bisa kita ukur adalah akibatnya: perubahan suhu lingkungan, biasanya air. Alat untuk itu disebut **kalorimeter**, dan ilmunya disebut **kalorimetri**.



RUMUS • KALOR YANG DISERAP ATAU DILEPAS ZAT

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

q = kalor (J); m = massa zat yang suhunya berubah (g); c = **kalor jenis** ($\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$); $\Delta T = T_{\text{akhir}} - T_{\text{awal}}$ ($^\circ\text{C}$, sama besarnya dengan K). Kalor jenis air $4,18 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$: menaikkan suhu 1 g air sebesar 1°C membutuhkan 4,18 J.

Zat	Kalor jenis (J/g·°C)	Artinya di dapur
air	4,18	lama mendidih, lama pula dinginya
es	±2,1	lebih mudah berubah suhu daripada air cair
etanol	2,44	cepat hangat di tangan
minyak goreng	±2,0	wajan berisi minyak cepat panas
aluminium (panci)	0,90	panci tipis cepat panas
besi (wajan, cobek baja)	0,45	sangat cepat panas
pasir, batu	±0,8	pantai cepat panas di siang hari

RUMUS HIDUP Kalor yang diserap atau dilepas zat

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

Kalor sama dengan massa dikali kalor jenis dikali perubahan suhu. Zat yang banyak dan 'sulit panas' membutuhkan kalor besar.

m Massa zat g

c Kalor jenis J/(g·°C)

ΔT Perubahan suhu °C

q Kalor J

KALOR

76.285

J

ini air

q positif: zat menyerap kalor (suhunya naik)

250 g zat dengan $c = 4,18$ J/(g·°C) berubah suhu **73 °C**: $q = 76.285$ J = **76,285 kJ**.

Satuan Nusantara: $\approx 18 \times 1$ kkal (kalori makanan) $\cdot \approx 3\%$ dari sepiring nasi goreng (± 600 kkal) $\cdot \approx 2\%$ dari 1 kWh token listrik

Cek satuan: $g \times J/(g \cdot ^\circ C) \times ^\circ C = J$ ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-TERMO-Q-MCDT](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-termo-q-mcdt)



KIMIA NUSANTARA • ANGIN DARAT DAN PERAHU NELAYAN

Pada siang hari, daratan (pasir dan batu, $c \approx 0,8$) cepat panas, sedangkan laut (air, $c = 4,18$) lambat panas. Udara panas di atas daratan naik dan digantikan udara sejuk dari laut: **angin laut**. Malam hari terjadi kebalikannya. Daratan cepat dingin, laut masih hangat, dan angin bertiup dari darat ke laut: **angin darat**. Nelayan tradisional di banyak pantai Nusantara memanfaatkan angin darat untuk berangkat melaut pada malam atau dini hari, lalu pulang bersama angin laut.

CONTOH Air untuk segelas teh

Laras memanaskan 250 g air dari 27 °C sampai mendidih (100 °C). Berapa kalor yang diserap air? ($c = 4,18 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$)

1 Perubahan suhu: $\Delta T = 100 - 27 = 73 \text{ }^\circ\text{C}$.

2 $q = mc\Delta T = 250 \times 4,18 \times 73 = 76.285 \text{ J}$.

Air menyerap $\pm 76,3 \text{ kJ}$, kira-kira 18 kkal. Itu baru untuk airnya; panci dan udara di sekitarnya juga ikut "mencuri" kalor dari kompor.

Kalorimeter paling sederhana bisa kamu buat sendiri: dua gelas plastik yang ditumpuk (supaya kalor tidak mudah bocor), tutup karton, termometer, dan pengaduk. Zat-zat yang bereaksi adalah **sistem**; larutan (sebagian besar air) adalah **lingkungan**. Bila reaksi melepas kalor, larutan menerimanya, sehingga q_{larutan} positif dan suhu naik. Kalor reaksi sama besar tetapi berlawanan tanda: $q_{\text{reaksi}} = -q_{\text{larutan}}$.

$$\Delta H = \frac{q_{\text{reaksi}}}{n} = - \frac{m c \Delta T}{n}$$

$$\Delta H = - \frac{m \times 4,18 \times \Delta T}{n}$$

Kalor yang diterima larutan berasal dari reaksi, jadi tandanya dibalik, lalu dibagi jumlah mol zat yang bereaksi.

m Massa larutan di kalorimeter g

ΔT Perubahan suhu larutan °C

n Jumlah zat yang bereaksi mol

ΔH Perubahan entalpi kJ/mol

PERUBAHAN ENTALPI

-56,8

kJ/mol

🔥 eksoterm: suhu naik, ΔH negatif

mirip penetralan asam kuat oleh basa kuat (≈ -57 kJ/mol)

Larutan menerima $q = 2.842,4$ J, sehingga $\Delta H = -56,8$ kJ per mol zat.

Cek satuan: $\text{g} \times \text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) \times ^\circ\text{C} \div \text{mol} = \text{J/mol}$, lalu $\div 1.000 = \text{kJ/mol}$ ✓

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



TRIK KAK TIRTA

"Termometer **NAIK**, ΔH **NEGATIF**. Termometer **TURUN**, ΔH **POSITIF**." Bayangkan ΔH sebagai saldo dompet sistem: kalau lingkungan jadi hangat, berarti sistem baru saja membayar, jadi saldonya berkurang. Jangan lupa mengubah J menjadi kJ (bagi 1.000).



AWAS JEBAKAN

Massa dalam $q = mc\Delta T$ adalah massa larutan yang suhunya berubah, bukan massa zat yang bereaksi. Pada penetralan 50 mL HCl dengan 50 mL NaOH, $m = 100$ g (massa jenis larutan dianggap 1 g/mL), sedangkan n adalah mol air yang terbentuk, bukan jumlah mol semua zat.

Sebanyak 50 mL HCl 1,0 M dicampur dengan 50 mL NaOH 1,0 M dalam kalorimeter gelas plastik. Suhu naik dari 27,0 °C menjadi 33,8 °C. Hitung ΔH penetralan per mol air. ($c = 4,18 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$; massa jenis larutan 1 g/mL)

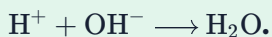
1 Persamaan: $\text{HCl(aq)} + \text{NaOH(aq)} \longrightarrow \text{NaCl(aq)} + \text{H}_2\text{O(l)}$.

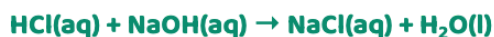
2 $q_{\text{larutan}} = 100 \times 4,18 \times 6,8 = 2.842 \text{ J}$.

3 Mol air = $0,050 \times 1,0 = 0,050 \text{ mol}$.

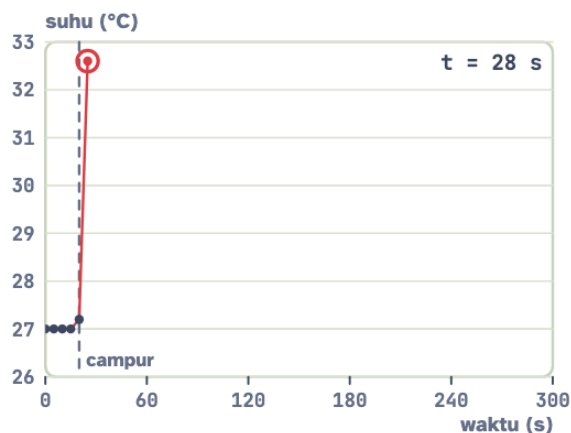
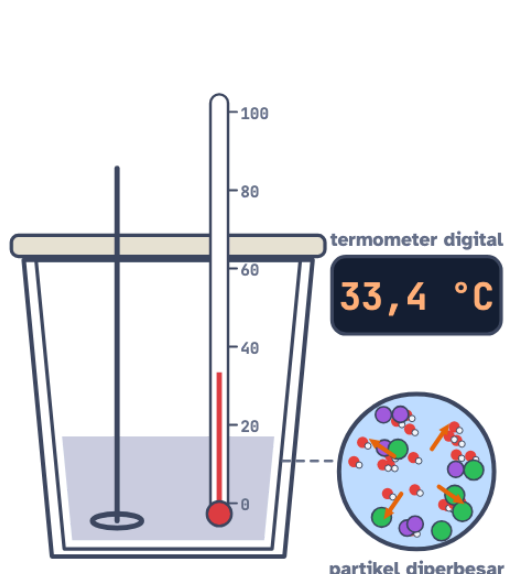
4 $\Delta H = -\frac{2.842 \text{ J}}{0,050 \text{ mol}} = -56.840 \text{ J/mol} \approx -56,8 \text{ kJ/mol}$.

$\Delta H \approx -56,8 \text{ kJ/mol}$, dekat dengan nilai buku $\pm -57 \text{ kJ/mol}$. Semua penetralan asam kuat oleh basa kuat memberi nilai yang hampir sama, karena reaksinya sebenarnya sama:





50 mL HCl 1,0 M + 50 mL NaOH 1,0 M • suhu awal 27,0 °C



Suhu NAIK → eksoterm → ΔH negatif

$$q = m \cdot c \cdot \Delta T = 100 \text{ g} \times 4,18 \times 5,60 \text{ °C} = 2.341 \text{ J}$$

Menunggu garis pendinginan untuk ekstrapolasi...

Suhu

33,4 °C

 ΔT (koreksi)

5,6 °C

q larutan

2.341 J

 ΔH percobaan

-

 ΔH literatur

-57,1 kJ/mol

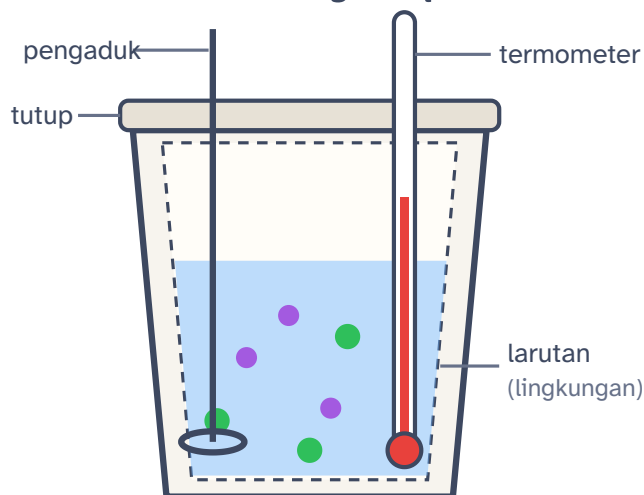
Pilih proses, lalu tekan ►. Suhu dicatat tiap 5 detik dan zat dicampur pada detik ke-20. Bandingkan penetralan, NaOH, dan CaCl_2 (penyerap lembap) dengan amonium nitrat (isi kompres dingin). Matikan isolasi: mengapa suhu puncaknya lebih rendah, dan bagaimana garis ekstrapolasi (putus-putus) membantu? Arahkan atau ketuk grafik untuk membaca datanya.

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$q = m \times 4,18 \times \Delta T$ dalam joule, lalu bagi 1.000 untuk kJ. Contoh: 100 g, naik 10 °C → 4.180 J = 4,18 kJ.

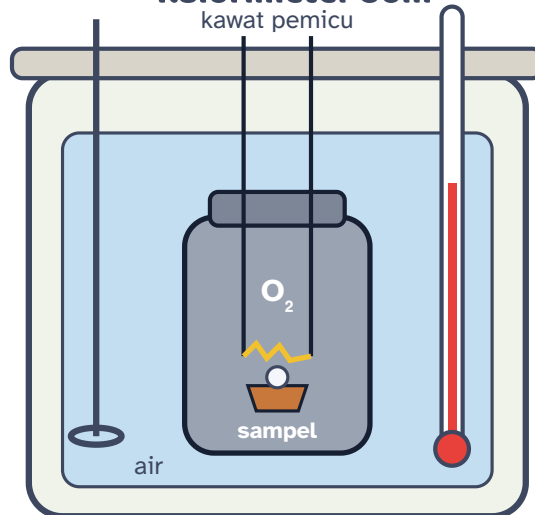
Untuk reaksi pembakaran (bahan bakar, makanan), kimiawan memakai **kalorimeter bom**: sampel dibakar dalam wadah baja tertutup berisi oksigen bertekanan, dan wadah itu direndam dalam air. Karena kapasitas kalor seluruh alat (C_{kal} , dalam kJ/°C) sudah diketahui dari kalibrasi, kalornya cukup dihitung dari $q = C_{\text{kal}} \times \Delta T$. Angka "kkal" pada label gizi makananmu berasal dari alat seperti ini.

Kalorimeter gelas plastik



dua gelas bertumpuk = isolasi murah

Kalorimeter bom



$$q = C(\text{kalorimeter}) \times \Delta T$$

Kiri: kalorimeter gelas plastik untuk reaksi dalam larutan (tekanan tetap, langsung memberi ΔH). Kanan: kalorimeter bom untuk pembakaran; sampel dinyalakan dengan kawat listrik di dalam bom baja berisi oksigen.

ADU CEPAT Kilat ΔH dari kalorimeter

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-19

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$\Delta H = -(m \times 4,18 \times \Delta T) \div n \div 1.000$. Suhu naik $\rightarrow \Delta H$ negatif; suhu turun $\rightarrow \Delta H$ positif.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

EKSTRAPOLASI KURVA SUHU-WAKTU DAN ΔU DI KALORIMETER BOM

Kalorimeter nyata selalu bocor kalor. Karena itu suhu dicatat secara berkala sebelum dan sesudah pencampuran, lalu garis pendinginan diperpanjang (diekstrapolasi) kembali ke saat pencampuran. ΔT hasil ekstrapolasi lebih besar daripada kenaikan maksimum yang terbaca dan lebih mendekati ΔT tanpa kebocoran. Lab Mini di atas melakukannya otomatis (garis putus-putus magenta).

Kalorimeter bom bervolume tetap, sehingga yang terukur adalah perubahan energi dalam, ΔU , bukan ΔH . Keduanya dihubungkan oleh $\Delta H = \Delta U + \Delta n_{\text{gas}} RT$. Untuk pembakaran oktana,



$\Delta n_{\text{gas}} = 8 - 12,5 = -4,5$, sehingga $\Delta H - \Delta U = -4,5 \times 8,314 \times 298 \approx -11 \text{ kJ/mol}$. Sangat kecil dibandingkan $\Delta H_c = -5.470 \text{ kJ/mol}$, tetapi penting dalam soal olimpiade.

19.4 Hukum Hess: jalan memutar, hasil sama

Ada reaksi yang ΔH -nya mustahil diukur langsung. Contohnya pembentukan karbon monoksida. Membakar arang dengan oksigen terbatas selalu menghasilkan campuran CO dan CO_2 , sehingga kalor yang terukur bukan milik

satu reaksi saja. Lalu bagaimana? Jawabannya ditemukan seorang kimiawan di Sankt Peterburg pada tahun 1840.

Bahasa sederhana • Bayangkan kamu naik dari Desa Ngadisari ke puncak Gunung Bromo. Kamu boleh lewat jalan aspal yang landai, lewat tangga yang curam, atau berputar-putar dulu di lautan pasir. Jalannya berbeda-beda, tetapi selisih ketinggian dari desa ke puncak selalu sama. Perubahan entalpi juga begitu: hanya bergantung pada titik awal dan titik akhir.



HUKUM HESS

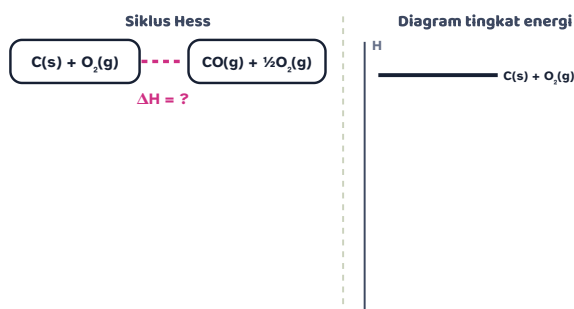
Perubahan entalpi suatu reaksi hanya bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir, tidak bergantung pada jalan atau tahap yang ditempuh. Bila sebuah reaksi dapat ditulis sebagai jumlah beberapa tahap, maka

$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots$$

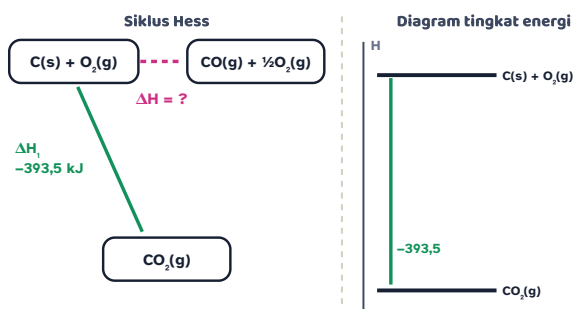
▼ Mengapa begitu? Mesin energi gratis yang mustahil

Andaikan jalan A menuju produk melepas 400 kJ, sedangkan jalan B (kebalikannya) hanya butuh 300 kJ untuk kembali ke pereaksi. Kita bisa berputar terus: maju lewat A, mundur lewat B, dan setiap putaran mendapat 100 kJ gratis tanpa mengubah zat apa pun. Mesin seperti itu melanggar hukum kekekalan energi (hukum I termodinamika). Jadi ΔH pasti sama untuk semua jalan. Besaran yang hanya bergantung pada keadaan, seperti entalpi dan ketinggian, disebut **fungsi keadaan**.

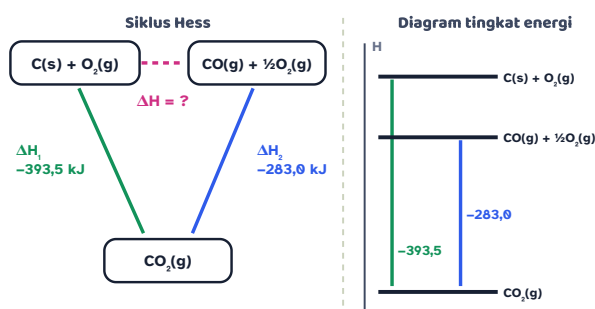




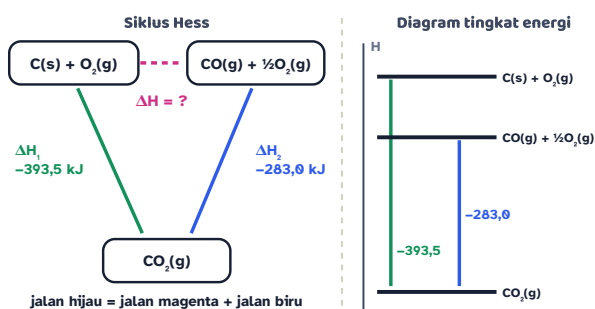
Langkah 1. Kita ingin ΔH untuk $C(s) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow CO(g)$. Sayangnya, membakar arang dengan oksigen terbatas selalu menghasilkan campuran CO dan CO_2 . Tidak bisa diukur langsung!



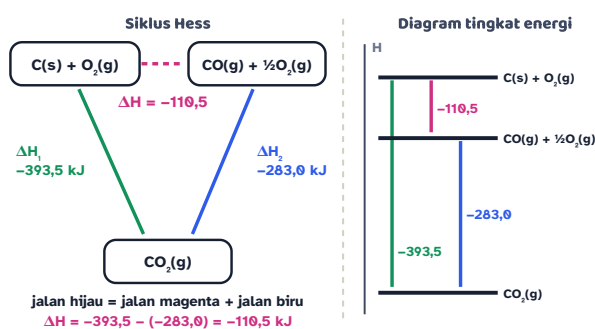
Langkah 2. Jalan memutar, tahap 1: bakar karbon sempurna menjadi CO_2 . Ini mudah diukur dengan kalorimeter bom: $\Delta H_1 = -393,5 \text{ kJ}$.



Langkah 3. Tahap 2: bakar CO menjadi CO_2 , juga mudah diukur: $\Delta H_2 = -283,0 \text{ kJ}$. Di diagram, CO berada di antara C dan CO_2 .



Langkah 4. Hukum Hess: dari $C + O_2$ ke CO_2 , lewat CO ataupun langsung, perubahan entalpinya sama. Jadi $\Delta H_1 = \Delta H + \Delta H_2$.



Langkah 5. Hasilnya: $\Delta H = -393,5 - (-283,0) = -110,5 \text{ kJ/mol}$. Inilah ΔH_f° CO, diperoleh tanpa pernah mengukurnya langsung!



TRIK KAK TIRTA

Soal Hess itu seperti menyusun puzzle. (1) Lihat zat di persamaan target: harus di kiri atau di kanan? (2) **Balik** persamaan bila zatnya berada di sisi yang salah (tanda ΔH ikut berbalik). (3) **Kalikan** supaya koefisiennya cocok (ΔH ikut dikali). (4) Jumlahkan semuanya dan coret zat yang muncul di kiri dan kanan. Bila yang tersisa persis persamaan target, jumlahkan ΔH -nya.

Etanol untuk campuran bensin dibuat dengan fermentasi tetes tebu. Hitung ΔH_f° etanol, $2\text{C(s)} + 3\text{H}_2\text{(g)} + \frac{1}{2}\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH(l)}$, dari data pembakaran berikut (kJ/mol): C $-393,5$; H_2 $-285,8$; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH(l)}$ -1.367 .

- (1) $\text{C(s)} + \text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2\text{(g)}$, $-393,5$ kJ. Target butuh 2C di kiri $\rightarrow$ kalikan 2: $-787,0$ kJ.
- (2) $\text{H}_2\text{(g)} + \frac{1}{2}\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{H}_2\text{O(l)}$, $-285,8$ kJ. Target butuh 3 H_2 $\rightarrow$ kalikan 3: $-857,4$ kJ.
- (3) $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH(l)} + 3\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow 2\text{CO}_2\text{(g)} + 3\text{H}_2\text{O(l)}$, -1.367 kJ. Etanol harus di kanan $\rightarrow$ balik: $+1.367$ kJ.
- Jumlahkan: 2 CO_2 dan 3 H_2O tercoret; oksigen tersisa $2 + \frac{3}{2} - 3 = \frac{1}{2}$ mol di kiri, cocok dengan target.
- $\Delta H_f^\circ = -787,0 - 857,4 + 1.367 = -277,4$ kJ/mol.

ΔH_f° etanol ≈ -277 kJ/mol (nilai tabel $-277,7$; selisih kecil karena pembulatan data).



TAMU DARI MASA LALU

Germain Henri Hess (1802-1850) lahir di Jenewa, Swiss, tetapi besar dan bekerja di Sankt Peterburg, Rusia. Setelah mengukur kalor banyak reaksi, pada 1840 ia menyimpulkan bahwa kalor total selalu sama, berapa pun tahap yang ditempuh. Hukumnya terbit beberapa tahun sebelum hukum kekekalan energi dirumuskan dengan jelas oleh Mayer, Joule, dan Helmholtz. Jadi Hess termasuk perintis termodinamika!

19.5 Entalpi pembentukan standar dan energi ikatan

Menulis siklus Hess untuk setiap reaksi itu melelahkan. Kimiawan lalu menyusun satu tabel besar berisi "ketinggian" setiap senyawa diukur dari unsur-unsurnya. Dengan tabel itu, ΔH reaksi apa pun bisa dihitung dalam satu baris.



DEFINISI • ENTALPI PEMBENTUKAN STANDAR

Entalpi pembentukan standar (ΔH_f°) adalah perubahan entalpi saat 1 mol senyawa dibentuk dari unsur-unsurnya dalam wujud standar, pada 298 K dan 1 bar. ΔH_f° unsur dalam wujud standarnya, misalnya $\text{O}_2\text{(g)}$, $\text{H}_2\text{(g)}$, C (grafit), dan Fe(s), adalah **nol**.

Zat

 ΔH_f° (kJ/mol)

Zat

 ΔH_f° (kJ/mol)

H ₂ O (l)	-285,8	C ₂ H ₅ OH (l)	-277,7
H ₂ O (g)	-241,8	C ₆ H ₁₂ O ₆ (s) glukosa	-1.273,3
CO ₂ (g)	-393,5	NH ₃ (g)	-46,1
CO (g)	-110,5	NaCl (s)	-411,2
CH ₄ (g)	-74,8	CaO (s)	-635,1
C ₂ H ₆ (g)	-84,7	Ca(OH) ₂ (s)	-986,1
C ₃ H ₈ (g) propana	-103,8	CaCO ₃ (s)	-1.206,9
C ₄ H ₁₀ (g) butana	-125,6	Fe ₂ O ₃ (s)	-824,2
C ₂ H ₄ (g) etena	+52,3	C ₂ H ₂ (g) etuna	+226,7



ATURAN • ΔH REAKSI DARI ENTALPI PEMBENTUKAN

$$\Delta H_{\text{reaksi}}^{\circ} = \sum n \Delta H_f^{\circ}(\text{produk}) - \sum m \Delta H_f^{\circ}(\text{pereaksi})$$

n dan m adalah koefisien reaksi. Ingat: "produk dikurangi pereaksi".

▼ Mengapa begitu? Jalan memutar lewat unsur-unsur

Bayangkan pereaksi diurai dulu menjadi unsur-unsurnya ($\Delta H = - \sum m \Delta H_f^{\circ}$ pereaksi, karena penguraian adalah kebalikan pembentukan), lalu unsur-unsur itu disusun menjadi produk ($\Delta H = + \sum n \Delta H_f^{\circ}$ produk). Menurut hukum Hess, jumlah kedua tahap sama dengan ΔH reaksi langsung.

KERJAKAN BERSAMA

Gas di kompor portabel

Kompor portabel untuk berkemah memakai gas butana. Hitung ΔH pembakaran 1 mol butana,
 $\text{C}_4\text{H}_{10}(\text{g}) + \frac{13}{2} \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 4 \text{CO}_2(\text{g}) + 5 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$, dengan data tabel di atas.

1 Produk: $4(-393,5) + 5(-285,8) = -1.574,0 - 1.429,0 = -3.003,0 \text{ kJ}$.

2 Pereaksi: $-125,6 + \frac{13}{2}(0) = -125,6 \text{ kJ}$ (oksigen adalah unsur).

3 $\Delta H = -3.003,0 - (-125,6) = -2.877,4 \text{ kJ}$.

ΔH_c butana $\approx -2.877 \text{ kJ/mol}$. Dibagi M_r 58, setiap gram butana melepas $\pm 49,5 \text{ kJ}$.

Cara kedua memandang reaksi dari dalam: **ikatan apa yang putus dan ikatan apa yang terbentuk?**



DEFINISI • ENERGI IKATAN

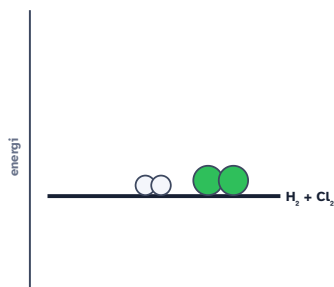
Energi ikatan adalah energi yang dibutuhkan untuk memutus 1 mol ikatan tertentu dalam molekul berwujud gas. Nilainya selalu positif. Karena ikatan C-H dalam metana sedikit berbeda dari C-H dalam etanol, tabel memberi **energi ikatan rata-rata** dari banyak senyawa.

Ikatan	kJ/mol	Ikatan	kJ/mol	Ikatan	kJ/mol
H-H	436	C-C	347	O-H	463
C-H	413	C=C	614	O=O	498
N-H	391	C≡C	839	C-O	358
N≡N	945	C=O (dalam CO ₂)	805	Cl-Cl	242
H-Cl	431	C=O (senyawa lain)	±745	H-Br	366



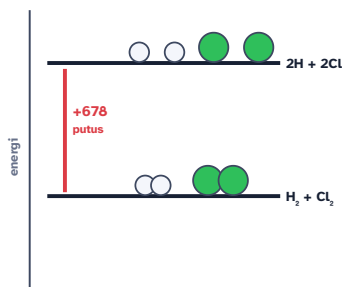
AWAS JEBAKAN

Memutus ikatan selalu **menyerap** energi; membentuk ikatan selalu **melepas** energi. Banyak orang mengira "memutus ikatan melepaskan energi" karena reaksi pembakaran memanaskan. Sebenarnya kalor itu datang dari ikatan baru yang lebih kuat di CO₂ dan H₂O, bukan dari ikatan yang putus.



Neraca energi ikatan

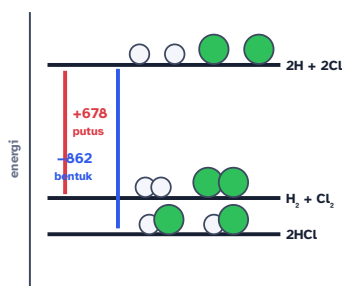
Langkah 1. Pereaksi: satu molekul H_2 (putih) dan satu molekul Cl_2 (hijau). Ikatan adalah tarikan yang menahan dua atom tetap berpasangan.



Neraca energi ikatan

putus H-H: +436 kJ
putus Cl-Cl: +242 kJ
diserap: +678 kJ

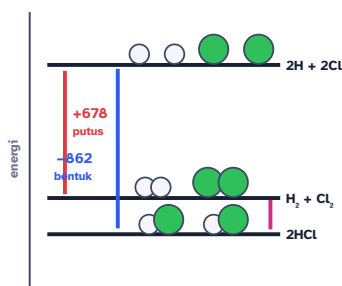
Langkah 2. Memutus ikatan selalu **menyerap** energi, seperti menarik lepas dua magnet yang menempel. Atom-atom bebas berada jauh di atas: $+436 + 242 = +678$ kJ.



Neraca energi ikatan

putus H-H: +436 kJ
putus Cl-Cl: +242 kJ
diserap: +678 kJ
bentuk 2 H-Cl: 2×431
dilepas: -862 kJ

Langkah 3. Membentuk ikatan selalu **melepas** energi, seperti dua magnet yang saling menyambar. Dua ikatan H-Cl melepas $2 \times 431 = 862$ kJ.



Neraca energi ikatan

putus H-H: +436 kJ
putus Cl-Cl: +242 kJ
diserap: +678 kJ
bentuk 2 H-Cl: 2×431
dilepas: -862 kJ
 $\Delta H = 678 - 862$
 $= -184$ kJ (eksoterm)

Langkah 4. Neraca: $\Delta H = +678 - 862 = -184$ kJ. Ikatan baru lebih kuat daripada ikatan lama, jadi reaksinya eksoterm. Data kalorimeter: $2 \times (-92,3) = -184,6$ kJ. Cocok!

$$\Delta H = \sum E_{\text{ikatan yang diputus}} - \sum E_{\text{ikatan yang dibentuk}}$$



TRIK KAK TIRTA

Dua rumus, dua arah! Dengan ΔH_f° : produk – pereaksi ("kanan – kiri"). Dengan **energi ikatan**: putus – bentuk, artinya pereaksi – produk ("kiri – kanan"). Kalau tertukar, tanda jawabanmu terbalik. Hitung jumlah ikatan dengan menggambar rumus strukturnya dulu.

$$\Delta H = \underbrace{4E_{\text{C-H}} + 2E_{\text{O=O}}}_{\text{diputus}} - \underbrace{(2E_{\text{C=O}} + 4E_{\text{O-H}})}_{\text{dibentuk}}$$

Energi untuk memutus semua ikatan pereaksi dikurangi energi yang dilepas saat ikatan produk terbentuk.

$E_{\text{C-H}}$ Energi ikatan C-H kJ/mol

$E_{\text{O=O}}$ Energi ikatan O=O kJ/mol

$E_{\text{C=O}}$ Energi ikatan C=O dalam CO₂ kJ/mol

$E_{\text{O-H}}$ Energi ikatan O-H kJ/mol

ΔH ΔH pembakaran (air berwujud gas) kJ/mol

**ΔH PEMBAKARAN (AIR
BERWUJUD GAS)**

-814

kJ/mol

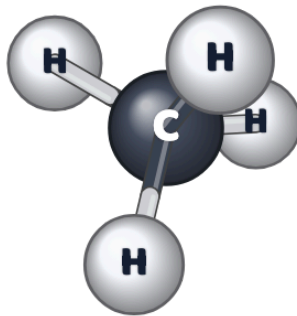
eksoterm: ikatan baru lebih kuat

nilai buku **-814**; data eksperimen **-802** (air berwujud gas)

Diputus **2.648** kJ, dibentuk **3.462** kJ, jadi $\Delta H = \mathbf{-814}$ kJ per mol metana.

Cek satuan: kJ/mol – kJ/mol = kJ/mol ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-TERMO-ENERGI-
IKATAN](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-termo-energi-ikatan)



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 ikatannya. Metana punya 4 ikatan C–H; berapa ikatan C–H dan C–C di propana? Etanol punya satu ikatan O–H: temukan! Ketuk dua atom untuk mengukur panjang ikatan: ikatan C=O di CO₂ lebih pendek dan lebih kuat daripada C–O tunggal.

MITOS

"Memutus ikatan melepaskan energi, makanya kayu terbakar jadi panas."

MITOS

"ATP menyimpan energi dalam 'ikatan berenergi tinggi' yang melepas energi saat diputus."

FAKTA

Memutus ikatan selalu butuh energi. Kayu terbakar menjadi panas karena ikatan baru di CO₂ dan H₂O jauh lebih kuat; selisihnya keluar sebagai kalor dan cahaya.

FAKTA

Energi dilepas oleh **reaksi hidrolisis** ATP secara keseluruhan: ikatan yang terbentuk dengan air dan ion fosfat yang lebih stabil melepas energi lebih besar daripada energi pemutusan ikatannya.

Margarin dibuat dengan hidrogenasi ikatan C=C dalam minyak sawit memakai katalis nikel.

Perkirakan ΔH untuk setiap ikatan C=C yang dihidrogenasi, memakai model kecil

$\text{CH}_2=\text{CH}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{CH}_3-\text{CH}_3(\text{g})$ dan tabel energi ikatan.

- 1 Ikatan diputus: 1 C=C (614) + 1 H-H (436) = 1.050 kJ. Empat ikatan C-H etena tidak berubah, jadi boleh diabaikan.
- 2 Ikatan dibentuk: 1 C-C (347) + 2 C-H baru ($2 \times 413 = 826$) = 1.173 kJ.
- 3 $\Delta H = 1.050 - 1.173 = -123$ kJ.
- 4 Cek dengan ΔH_f° : $-84,7 - (+52,3 + 0) = -137$ kJ. Perkiraan energi ikatan meleset $\pm 10\%$ karena memakai nilai rata-rata.

Setiap ikatan C=C yang dihidrogenasi melepas $\pm 120\text{--}140$ kJ/mol. Pabrik margarin harus mendinginkan reaktornya supaya suhunya tidak melonjak.

19.6 Nilai kalor bahan bakar: dari kayu bakar sampai biodiesel

Dapur Indonesia sudah beberapa kali berganti bahan bakar: kayu bakar dan arang, lalu minyak tanah, dan sejak program konversi tahun 2007 kebanyakan rumah memakai LPG tabung 3 kg yang hijau. Mengapa LPG? Salah satu alasannya bisa dihitung, yaitu seberapa banyak kalor yang keluar dari setiap gram bahan bakar.



DEFINISI • NILAI KALOR

Nilai kalor bahan bakar adalah kalor yang dilepas pada pembakaran sempurna 1 gram (atau 1 kg) bahan bakar. Satuannya kJ/g atau MJ/kg (angkanya sama). Dari entalpi pembakaran:

$$\text{nilai kalor} = \frac{|\Delta H_c|}{M_r}$$

Bahan bakar	Zat utama	ΔH_c (kJ/mol)	Nilai kalor (kJ/g)	Catatan
hidrogen	H_2	-285,8	142	juara per gram, tetapi sulit disimpan
gas alam, biogas	CH_4	-890	55,5	biogas dari kotoran sapi di desa

LPG	$C_3H_8 + C_4H_{10}$	-2.220 / -2.877	±50	tabung 3 kg dan 12 kg
bensin	C_8H_{18} (model)	-5.470	±48	nilai oktana tidak sama dengan nilai kalor!
lilin parafin	$C_{25}H_{52}$ (±)	—	±46	sering berjelaga
biodiesel sawit	$C_{17}H_{34}O_2$ (metil palmitat)	±-10.680	±40	dicampur ke solar (B35)
arang batok kelapa	C	-393,5	±33	bara sate
etanol, spiritus	C_2H_5OH	-1.367	29,7	nyala bersih, lampu laboratorium
kayu kering	selulosa	—	±16	banyak asap bila basah

$$\text{nilai kalor} = \frac{|\Delta H_c|}{M_r}$$

Berapa kilojoule yang didapat dari setiap gram bahan bakar yang terbakar sempurna.

$|\Delta H_c|$ Kalor pembakaran per mol kJ/mol

M_r Massa molar g/mol

nilai kalor Nilai kalor kJ/g

NILAI KALOR

50,5

kJ/g

🔥 propana (LPG): ± 50 kJ/g

Setiap gram melepas **50,5** kJ. Satu tabung LPG 3 kg berbahan ini menyimpan **151,364** MJ, cukup untuk mendidihkan $\pm 165,349$ panci berisi 1,5 L air (efisiensi kompor 50%).

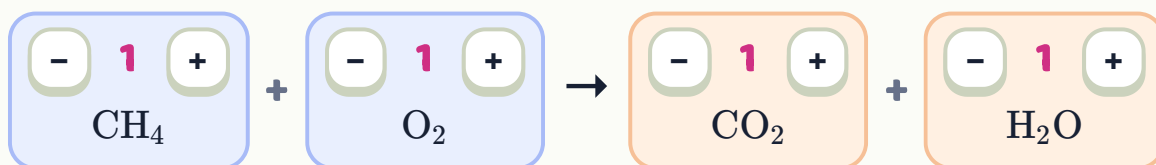
Cek satuan: kJ/mol $\div$ g/mol = kJ/g ✓

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

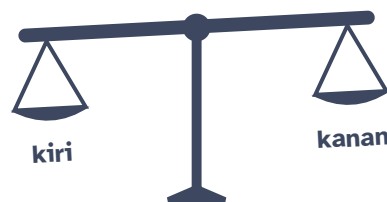
Sebelum menghitung kalor pembakaran, persamaannya harus setara. Coba setarakan bahan bakar-bahan bakar berikut, termasuk metil palmitat dari minyak sawit yang koefisiennya cukup menantang:

PENYETARA REAKSI

Setarakan pembakaran bahan bakar Nusantara



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



Unsur	Kiri	Kanan
O	2 ●●	3 ●●● ✗

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

Petunjuk

Ulang

Persamaan berikutnya ▶

Persamaan 1 dari 8 null

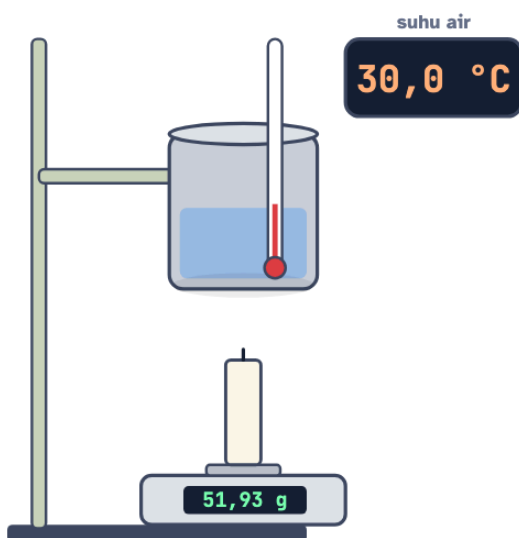
Berturut-turut: biogas (metana), LPG (propana dan butana), etanol dari tetes tebu, bensin (oktana), biodiesel sawit (metil palmitat), glukosa dalam respirasi, dan pembakaran tidak sempurna propana yang menghasilkan gas CO beracun. Bandingkan banyaknya O_2 yang dibutuhkan per mol bahan bakar: mana yang paling "rakus" oksigen?

LAB MINI Kalorimeter Kaleng: adu nilai kalor

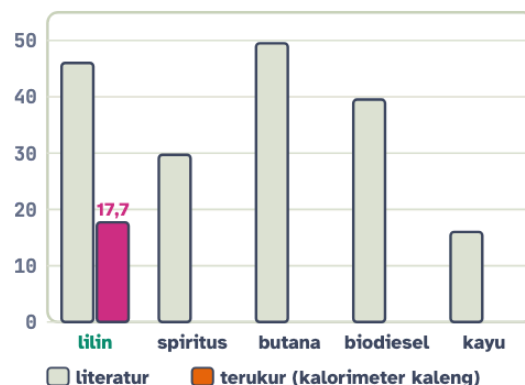
LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-19

Lilin (parafin) • literatur ± 46 kJ/g

Panaskan 100 g air sampai naik 20 °C, lalu hitung kJ per gram.



Nilai kalor (kJ/g)



$$q = 100 \text{ g} \times 4,18 \times 3,0 \text{ °C} = 1,25 \text{ kJ}$$

terbakar 0,07 g → nilai kalor = 17,7 kJ/g

efisiensi $\pm 39\%$: sisanya hilang ke udara dan kaleng
waktu nyata: 0 menit 35 detik

Massa terbakar
0,07 g

ΔT air
3 °C

Nilai kalor terukur
17,7 kJ/g

Literatur
46 kJ/g

Efisiensi
39 %

Pilih bahan bakar, tekan ▶, dan amati neraca serta termometernya. Percobaan berhenti saat air naik sesuai target. Uji kelima bahan bakar: diagram batang di kanan menyimpan hasilmu. Mengapa nilai terukur selalu lebih kecil daripada literatur? Nyalakan perisai angin dan ulangi. Siapa yang paling berjelaga?



KIMIA NUSANTARA • BIODIESEL B35 DARI SAWIT

Indonesia adalah penghasil minyak sawit terbesar di dunia. Minyak sawit direaksikan dengan metanol menjadi metil ester (biodiesel), misalnya metil palmitat $C_{17}H_{34}O_2$. Sejak 2023, solar di SPBU wajib dicampur 35% biodiesel (B35), dan kadarnya terus dinaikkan. Nilai kalor biodiesel (± 40 kJ/g) sedikit di bawah solar (± 45 kJ/g) karena molekulnya sudah mengandung atom oksigen, seolah sudah "setengah terbakar". Imbalannya, karbon di dalamnya baru saja diambil pohon sawit dari udara, dan asap knalpotnya lebih sedikit jelaga.

KERJAKAN BERSAMA

Berapa gram LPG untuk sepanci air?

Laras merebus 1,5 L air (1.500 g) dari 28 °C sampai mendidih (100 °C) di kompor LPG. Nilai kalor LPG ± 50 kJ/g dan efisiensi kompor $\pm 50\%$. Berapa gram LPG yang terbakar?

- 1 Kalor untuk air: $q = 1.500 \times 4,18 \times 72 = 451.440 \text{ J} \approx 451 \text{ kJ}$.
- 2 Hanya 50% kalor nyala yang masuk ke air, jadi LPG harus melepas $451/0,50 = 903 \text{ kJ}$.
- 3 Massa LPG = $903 \text{ kJ} \div 50 \text{ kJ/g} \approx 18 \text{ g}$.

± 18 g LPG. Satu tabung 3 kg cukup untuk ± 165 kali merebus sepanci air seperti ini. Menutup panci dan memakai api biru yang tidak melebar keluar panci menaikkan efisiensinya.



KESELAMATAN • PEMBAKARAN TIDAK SEMPURNA

Bila oksigen kurang, LPG terbakar tidak sempurna: $2 C_3H_8 + 7 O_2 \longrightarrow 6 CO + 8 H_2O$. Gas CO tidak berbau tetapi beracun karena mengikat hemoglobin darah. Nyala kompor yang sehat berwarna biru; nyala kuning-merah yang berjelaga menandakan udara kurang. Jangan menyalakan kompor arang atau genset di ruang tertutup, periksa selang dan regulator LPG secara berkala, dan bila tercium bau gas, jangan menyalakan api atau sakelar listrik: buka pintu dan jendela lebar-lebar.



LPG mudah menyala



Gas bertekanan

MITOS

"Bahan bakar dengan ΔH pembakaran per mol paling besar pasti paling hemat."

MITOS

"Api yang lebih besar pasti berasal dari bahan bakar yang lebih kuat."

FAKTA

Oktana melepas 5.470 kJ/mol dan metana hanya 890 kJ/mol, tetapi per gram metana justru lebih unggul (55,5 vs 48 kJ/g). Untuk tabung dan tangki, yang penting adalah kJ per gram atau per liter.

FAKTA

Besar nyala bergantung pada laju pembakaran (seberapa banyak gram per detik), bukan nilai kalornya. Kayu kering bisa berkobar besar padahal nilai kalornya hanya sepertiga LPG.



TUBUHMU JUGA "MEMBAKAR" BAHAN BAKAR

Respirasi sel, $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$, melepas energi yang sama dengan membakar glukosa di kalorimeter (-2.803 kJ/mol), tetapi bertahap lewat puluhan reaksi enzim sehingga tubuhmu tidak terbakar. Itulah sebabnya label gizi memakai angka dari kalorimeter bom: karbohidrat dan protein ± 17 kJ/g (± 4 kkal/g), lemak ± 37 kJ/g (± 9 kkal/g).

19.7

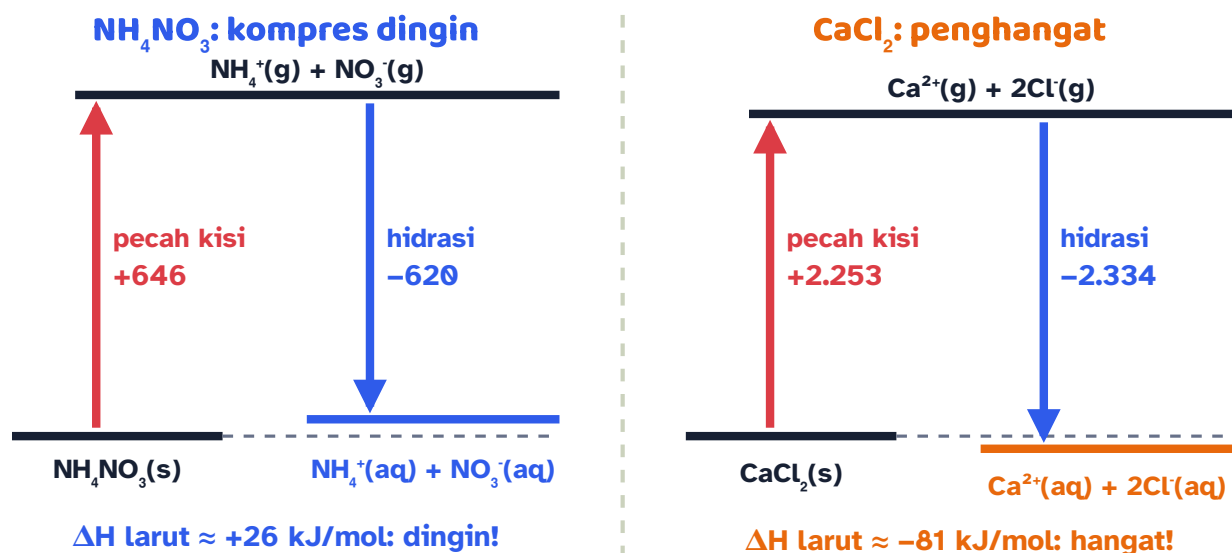
Rahasia kompres dingin: pelarutan, hidrasi, dan siklus Born–Haber

Kembali ke komik. Kompres dingin berisi kristal amonium nitrat (kadang urea) dan sekantong air. Kantong penghangat jenis lain berisi kalsium klorida. Keduanya hanya garam yang dilarutkan dalam air, tetapi yang satu menjadi dingin dan yang lain menjadi panas. Bagaimana mungkin?

Bahasa sederhana • Melarutkan garam terjadi dalam dua langkah. Pertama, ion-ion di kristal harus **dipisahkan** satu sama lain. Ini seperti membongkar barisan tari saman yang saling bergandengan erat: butuh tenaga. Kedua, setiap ion yang lepas langsung **dipeluk** molekul-molekul air, dan pelukan ini melepas energi. Kalau tenaga membongkar lebih besar daripada energi pelukan, larutan menjadi dingin. Kalau sebaliknya, larutan menjadi panas.

Langkah kedua disebut **hidrasi**. Ujung oksigen molekul air (bermuatan parsial negatif) mengerumuni kation, sedangkan ujung hidrogennya mengerumuni anion. Secara singkat:

$$\Delta H_{\text{pelarutan}} = \underbrace{\Delta H_{\text{pemisahan kisi}}}_{\text{positif}} + \underbrace{\Delta H_{\text{hidrasi}}}_{\text{negatif}}$$



Pelarutan adalah tarik-menarik dua angka besar. Pada amonium nitrat, energi hidrasi sedikit kalah dari energi pemisahan kisi (endoterm). Pada kalsium klorida, ion Ca^{2+} yang kecil dan bermuatan +2 dihidrasi sangat kuat (eksoterm). Nilai dalam kJ/mol, dibulatkan; skala kiri dan kanan berbeda.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

SIKLUS BORN-HABER: HUKUM HESS UNTUK KRISTAL ION

Entalpi kisi tidak bisa diukur langsung, tetapi bisa dihitung dengan siklus Hess yang melewati atom dan ion berwujud gas (lihat juga siklus NaCl di Bab 10). Untuk kalsium klorida (kJ/mol):

Tahap	Persamaan	ΔH
atomisasi kalsium	$\text{Ca}(\text{s}) \rightarrow \text{Ca}(\text{g})$	+178
energi ionisasi pertama	$\text{Ca}(\text{g}) \rightarrow \text{Ca}^+(\text{g}) + \text{e}^-$	+590
energi ionisasi kedua	$\text{Ca}^+(\text{g}) \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{g}) + \text{e}^-$	+1.145
atomisasi klorin	$\text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Cl}(\text{g})$	+242
afinitas elektron (x2)	$2\text{Cl}(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-(\text{g})$	$2(-349) = -698$
pembentukan kisi	$\text{Ca}^{2+}(\text{g}) + 2\text{Cl}^-(\text{g}) \rightarrow \text{CaCl}_2(\text{s})$	$U = ?$
total = pembentukan	$\text{Ca}(\text{s}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CaCl}_2(\text{s})$	-796

Hess: $-796 = 178 + 590 + 1.145 + 242 - 698 + U$, sehingga $U = -796 - 1.457 \approx -2.253 \text{ kJ/mol}$. Kisi CaCl_2 hampir tiga kali lebih kuat daripada NaCl (-787) karena muatan +2 menarik anion jauh lebih kuat.

**ENTALPI HIDRASI: ION KECIL BERMUATAN BESAR MENANG**

Entalpi hidrasi (kJ/mol, kira-kira): Li^+ -519 , Na^+ -406 , K^+ -322 , Mg^{2+} -1.920 , Ca^{2+} -1.577 , Cl^- -378 . Makin kecil ion dan makin besar muatannya, makin rapat molekul air mengerumuninya, sehingga hidrasinya makin eksoterm.

Contoh NaCl: $\Delta H_{\text{pelarutan}} = +787 + (-406) + (-378) = +3$ kJ/mol (data percobaan $+3,9$). Dua angka raksasa hampir saling meniadakan, sehingga garam dapur larut hampir tanpa perubahan suhu. Pelarutan tetap terjadi walaupun sedikit endoterm. Mengapa? Rahasiannya ada di Bab 20.

Kimia di sekitarmu**Kompur LPG 3 kg**

Setiap gram LPG melepas ± 50 kJ. Satu tabung hijau menyimpan ± 150 MJ, cukup untuk mendidihkan lebih dari 150 panci berisi 1,5 L air.

**Penghangat pendaki Semeru**

Serbuk besi, garam, karbon aktif, dan sedikit air bereaksi dengan oksigen:

$4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$,
 $\Delta H = -1.648$ kJ. Garam mempercepat karat sehingga kalor keluar berjam-jam.

**Makanan swapanas**

Banyak kantong pemanasnya berisi kapur tohor:

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$,
 $\Delta H \approx -65$ kJ/mol. Cukup untuk menghangatkan nasi tanpa kompor.

**Kompres dingin instan**

Amonium nitrat atau urea larut sambil menyerap kalor ($+25,7$ kJ/mol untuk amonium nitrat). Isi kantong bisa turun hingga beberapa derajat di atas 0°C .

**Air kendi tetap sejuk**

Air merembes dan menguap dari pori-pori kendi tanah liat. Penguapan menyerap kalor ($+44$ kJ/mol), sehingga air di dalamnya sejuk tanpa kulkas. Keringatmu bekerja dengan cara yang sama.

**Barasate arang batok**

Arang batok kelapa hampir murni karbon:

$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, $\Delta H = -393,5$ kJ/mol (± 33 kJ/g). Kipas penjual sate menambah oksigen sehingga bara makin membara.

**Cek Cepat**

Saat zat X dilarutkan dalam kalorimeter, termometer turun dari 28 °C menjadi 24 °C. Pelarutan X bersifat ...

eksoterm, ΔH negatif

eksoterm, ΔH positif

endoterm, ΔH positif

endoterm, ΔH negatif

Diketahui $\text{C(s)} + \text{O}_2\text{(g)} \longrightarrow \text{CO}_2\text{(g)}$, $\Delta H = -393,5 \text{ kJ}$. Berapa ΔH bila 2 mol karbon terbakar sempurna?

-787 kJ

-393,5 kJ

+787 kJ

-196,75 kJ

Zat manakah yang entalpi pembentukannya nol?

$\text{H}_2\text{O(l)}$

$\text{CO}_2\text{(g)}$

$\text{O}_3\text{(g)}$

$\text{O}_2\text{(g)}$

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D



Tantangan Rumah: kompres dingin dan penghangat buatanmu

Bahan: 2 gelas plastik bening (ditumpuk) dan tutup karton, termometer dapur atau termometer digital (bukan termometer raksa), garam Inggris dari apotek, soda kue, cuka dapur, segumpal sabut baja cuci piring, toples kaca kecil bertutup, sendok takar, air keran, stopwatch HP, sarung tangan.

1. Isi gelas bertumpuk dengan 100 mL air keran. Catat suhunya tiap 30 detik selama 2 menit.
2. Masukkan 2 sendok teh garam Inggris, aduk pelan, dan catat suhu tiap 30 detik selama 5 menit.
3. Ulangi dengan 50 mL cuka lalu tambahkan 1 sendok teh soda kue (pakai gelas yang lebih besar karena berbuih).
4. Penghangat: pakai sarung tangan, rendam sabut baja dalam cuka selama 1 menit, peras, lalu bungkuskan ke ujung termometer di dalam toples dan tutup. Catat suhu tiap menit selama 10 menit.
5. Buat grafik suhu-waktu ketiga percobaan dalam satu gambar.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Pakai sarung tangan saat memegang sabut baja karena serpihannya tajam. Jangan mencicipi larutan apa pun. Bila cuka terkena mata, segera bilas dengan air mengalir. Buang larutan ke wastafel sambil dialiri banyak air, dan bungkus sabut baja bekas dengan kertas sebelum dibuang.

Pertanyaan: Percobaan mana yang eksoterm dan mana yang endoterm? Mana yang mirip kompres dingin dan mana yang mirip kantong penghangat Laras? Mengapa sabut baja harus direndam cuka dulu?



RINGKASAN KILAT

Bab 19 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **sistem** dan **lingkungan**, serta reaksi **eksoterm** dan **endoterm**, dengan diagram tingkat energi dan profil energi
- menulis **persamaan termokimia** dan memakai jenis-jenis ΔH standar
- menghitung kalor dengan $q = mc\Delta T$ dan ΔH reaksi dari data **kalorimeter**
- menghitung ΔH dengan **hukum Hess**, **entalpi pembentukan standar**, dan **energi ikatan** rata-rata
- membandingkan **nilai kalor** bahan bakar (LPG, bensin, biodiesel sawit, kayu) dan menjelaskan mengapa melarutkan garam bisa terasa panas atau dingin



Istilah kunci

sistem

lingkungan

Reaksi eksoterm

Reaksi endoterm

energi aktivasi

perubahan entalpi

Entalpi

persamaan termokimia

kalorimeter

kalorimetri

kalor jenis

Entalpi pembentukan standar

Energi ikatan

Nilai kalor

hidrasi



Rumus penting

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

Kalor yang diserap atau dilepas zat. Kalor sama dengan massa dikali kalor jenis dikali perubahan suhu. Zat yang banyak dan 'sulit panas' membutuhkan kalor besar.

$$\Delta H = - \frac{m \times 4,18 \times \Delta T}{n}$$

ΔH reaksi dari data kalorimeter. Kalor yang diterima larutan berasal dari reaksi, jadi tandanya dibalik, lalu dibagi jumlah mol zat yang bereaksi.

$$\Delta H = \underbrace{4E_{\text{C-H}} + 2E_{\text{O=O}}}_{\text{diputus}} - \underbrace{(2E_{\text{C=O}} + 4E_{\text{O-H}})}_{\text{dibentuk}}$$

ΔH pembakaran metana dari energi ikatan.

Energi untuk memutus semua ikatan pereaksi dikurangi energi yang dilepas saat ikatan produk terbentuk.

$$\text{nilai kalor} = \frac{|\Delta H_c|}{M_r}$$

Nilai kalor bahan bakar. Berapa kilojoule yang didapat dari setiap gram bahan bakar yang terbakar sempurna.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Endoterm tidak berarti "tidak butuh kalor"; justru reaksi endoterm terus-menerus menyerap kalor.
- Massa dalam $q = mc\Delta T$ adalah massa larutan yang suhunya berubah, bukan massa zat yang bereaksi.
- Memutus ikatan selalu menyerap energi; membentuk ikatan selalu melepas energi.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=19

🧩 Teka-teki untuk Bab 20

Es di gelas es teh mencair sendiri pada suhu kamar, walaupun pelelehan es adalah proses endoterm ($\Delta H = +6,01 \text{ kJ/mol}$). Sebaliknya, air tidak pernah membeku sendiri di siang hari Jakarta, walaupun pembekuan melepaskan kalor. Garam dapur pun tetap larut walaupun sedikit endoterm. Jadi, kalau bukan ΔH , apa yang sebenarnya menentukan suatu proses "mau" terjadi?

▼ Intip petunjuk

Selain energi, alam juga "menghitung" banyaknya cara partikel dapat tersusun. Molekul air cair bisa berkeliaran dengan jauh lebih banyak cara daripada molekul yang terkunci di kristal es. Ukuran "banyaknya cara" ini disebut **entropi**. Di Bab 20 kamu akan menggabungkan energi dan entropi dalam energi bebas Gibbs, $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$.

20 Entropi & Energi Bebas Gibbs: Mengapa Alam Punya Arah?

Es batu di warung mencair sendiri, tetapi air di gelas tidak pernah membeku sendiri pada siang hari. Kamar yang rapi bisa berantakan sendiri, tetapi kamar berantakan tidak pernah rapi sendiri. Ada "hakim" tersembunyi yang menentukan arah setiap proses di alam, dan bab ini memperkenalkannya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan proses **spontan** dan tidak spontan, serta menjelaskan bahwa spontan tidak sama dengan cepat;
- menjelaskan **entropi** sebagai ukuran banyaknya cara (mikrostate) melalui $S = k \ln W$, dan meramalkan tanda ΔS untuk perubahan wujud dan reaksi gas;
- menghitung ΔS° reaksi dari data entropi standar dan menerapkan **hukum II termodinamika**;
- menghitung **energi bebas Gibbs** $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ dengan satuan yang benar, membaca empat kombinasi tanda, dan menentukan **suhu peralihan**;
- (Lanjut) menghubungkan ΔG° dengan tetapan kesetimbangan K dan potensial sel E° .

KAMAR YANG BERANTAKAN SENDIRI

KOMIK • 4 PANEL

Sabtu pagi, di kamar Bima

BIMA

Aneh! Minggu lalu kamarku sudah kurapikan. Sekarang berantakan lagi, padahal aku tidak pernah sengaja mengacaknya!

**LARAS**

Coba hitung, Bim. Sepuluh barangmu cuma punya **satu** susunan "rapi", tetapi jutaan susunan "berantakan"!

10 barang, 10 tempat
 rapi: 1 cara
 acak: 3.628.799 cara!
 ($10! = 3.628.800$)



KAK TIRTA

Itulah **entropi**. Alam selalu condong ke keadaan yang punya paling banyak cara. Alam semesta suka kamarmu, Bim!

GUBRAK!



Pulang sekolah, di warung es

KIMO

Es batu ini juga mencair sendiri, padahal mencair itu **menyerap** kalor (endoterm)!

BIMA

Jadi yang menentukan arah bukan cuma ΔH ... ada "hakim" kedua?



Tebak Dulu!

Besi berkarat di udara lembap adalah proses *spontan*. Apa arti kata "spontan" itu?

Prosesnya pasti berlangsung cepat, dalam hitungan detik.

Prosesnya dapat berlangsung dengan sendirinya tanpa dorongan terus-menerus dari luar, walaupun mungkin sangat lambat.

Prosesnya pasti melepaskan kalor yang sangat banyak sampai terasa panas.

Prosesnya terjadi tanpa sebab, tanpa pereaksi apa pun.

Jawabannya: dapat berlangsung sendiri, walaupun lambat. Pagar besi butuh berbulan-bulan untuk berkarat, tetapi prosesnya tetap spontan: ia berjalan sendiri dan tidak pernah berbalik menjadi besi mengilap. Dalam kimia, "spontan" menjawab pertanyaan *ke arah mana*, bukan *secepat apa*. Kecepatan adalah urusan Bab 21.

20.1

Spontan: ke mana alam melangkah?

Perhatikan hal-hal yang terjadi **dengan sendirinya** di sekitarmu. Wangi parfum menyebar ke seluruh kamar. Teh panas mendingin sampai suhu ruangan. Gula larut dalam kopi. Pagar besi berkarat. Kayu bakar yang sudah disulut terus menyala sampai menjadi abu.

Kebalikannya tidak pernah kita lihat. Wangi parfum tidak berkumpul kembali ke dalam botolnya. Teh dingin tidak memanaskan sendiri dengan menyedot kalor dari udara kamar. Abu tidak berubah kembali menjadi kayu. Alam ternyata punya **arah**.

Bahasa sederhana • Bayangkan sebuah bola di lereng bukit. Bola itu menggelinding **turun** dengan sendirinya, tetapi tidak pernah naik sendiri. Proses kimia juga begitu: ada arah "turun" yang terjadi sendiri (spontan) dan arah "naik" yang hanya terjadi bila kita terus mendorongnya. Bola bisa saja tersangkut kerikil dan diam lama sekali, tetapi arahnya tetap ke bawah.



DEFINISI • PROSES SPONTAN

Proses **spontan** adalah proses yang, pada kondisi tertentu (suhu, tekanan), dapat berlangsung **dengan sendirinya** tanpa campur tangan terus-menerus dari luar. Kebalikan dari proses spontan selalu **tidak spontan** pada kondisi yang sama: ia hanya terjadi bila terus "didorong" dengan energi dari luar (misalnya listrik, cahaya, atau kerja pompa).

Ilmuwan abad ke-19 mula-mula menduga: *reaksi spontan adalah reaksi eksoterm*, seperti bola yang menggelinding turun dan melepas energi. Dugaan itu sering benar. Pembakaran LPG, karat, dan reaksi logam natrium dengan air semuanya eksoterm dan spontan. Namun ada banyak pengecualian yang mengganggu:

Proses	ΔH (kJ/mol)	Spontan pada 25 °C?	Apa yang terjadi pada partikel?
Es mencair, $\text{H}_2\text{O}(\text{s}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+6,01 (endoterm)	✓ ya	kisi teratur → molekul bebas bergeser
Garam dapur larut, $\text{NaCl}(\text{s}) \rightarrow \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$	+3,9 (endoterm)	✓ ya	kristal → ion tersebar dalam air
Amonium nitrat larut (kompres dingin, Bab 19)	+25,7 (endoterm)	✓ ya	kristal → ion tersebar dalam air
Air di jemuran menguap ke udara yang belum jenuh uap air	+44,0 (endoterm)	✓ ya, perlahan	cairan → gas yang menyebar ke udara
Air membeku pada 10 °C, $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{s})$	-6,01 (eksoterm)	✗ tidak!	molekul bebas → kisi teratur

Lihat kolom terakhir. Semua proses endoterm yang tetap spontan punya satu kesamaan: partikelnya menjadi **lebih bebas dan lebih tersebar**. Sebaliknya, air yang membeku pada 10 °C justru melepas kalor, tetapi tidak terjadi. Jadi energi (ΔH) bukan satu-satunya hakim. Ada hakim kedua yang menghitung **banyaknya cara partikel dan energi dapat tersusun**. Hakim itu bernama **entropi**.



AWAS JEBAKAN

Spontan **tidak** berarti cepat. Pembakaran kertas oleh oksigen udara adalah proses spontan (ΔG sangat negatif), tetapi bukumu tidak terbakar sendiri di rak karena reaksinya butuh "dorongan awal" berupa api. Intan bahkan spontan berubah menjadi grafit, tetapi lajunya begitu lambat sehingga tidak teramati selama jutaan tahun. Termodinamika menjawab *boleh atau tidak*; kinetika (Bab 21) menjawab *secepat apa*.

20.2

Entropi: menghitung banyaknya cara



Tebak Dulu!

Kamu melempar 4 koin sekaligus. Hasil mana yang paling sering muncul bila kamu mengulangnya ratusan kali?

"4 gambar" sama seringnya dengan "2 gambar, 2 angka", karena setiap koin peluangnya 50 : 50.

"4 gambar", karena koin cenderung jatuh sama.

"2 gambar, 2 angka", karena hasil itu bisa terjadi dengan paling banyak cara.

Tidak bisa ditebak sama sekali karena acak.

Jawabannya: 2 gambar, 2 angka. Setiap urutan khusus (misalnya G-A-G-A) memang sama peluangnya, yaitu 1/16. Namun "2 gambar, 2 angka" bisa tersusun dengan **6 urutan berbeda**, sedangkan "4 gambar" hanya dengan 1 urutan. Hasil acak pun punya pola: yang menang adalah keadaan dengan cara terbanyak. Itulah inti entropi.

Kembali ke kamar Bima. Misalkan ada 10 barang dan masing-masing punya satu tempat yang "benar". Hanya ada 1 susunan yang rapi. Banyak susunan seluruhnya adalah $10! = 3.628.800$. Kalau barang-barang dipindah secara acak (dipakai, dilempar, dipinjam adik), hampir pasti hasilnya "berantakan". Bukan karena alam membenci kerapian, tetapi karena cara untuk berantakan **jauh lebih banyak**.

Bahasa sederhana • Coba pikirkan sebungkus kancing merah dan putih yang dikocok. Hanya sedikit sekali cara agar semua kancing merah berkumpul di satu sisi, tetapi ada sangat banyak cara agar merah dan putih bercampur. Karena itu, setelah dikocok, kancing hampir selalu tercampur. Partikel zat juga terus "terkocok" oleh gerakannya sendiri.



DEFINISI • MAKROSTATE, MIKROSTATE, DAN W

Makrostate adalah keadaan yang kita amati secara keseluruhan, misalnya "3 partikel di ruang kiri, 1 di ruang kanan". **Mikrostate** adalah susunan rinci yang mewujudkannya: partikel *mana* berada *di mana* dan membawa energi *berapa*. Banyaknya mikrostate untuk satu makrostate diberi lambang W .

Mari menghitung W untuk 4 partikel gas (A, B, C, D) dalam kotak yang dibagi dua ruang sama besar.

4 partikel, 2 ruang (kiri | kanan): berapa banyak susunan?

● A ● B ● C ● D



4 : 0

$W = 1$

Langkah 1. Sekat masih tertutup: keempat partikel ada di ruang kiri. Makrostate "4 : 0" hanya dapat terjadi dengan **1 cara**, jadi $W = 1$.

4 partikel, 2 ruang (kiri | kanan): berapa banyak susunan?

● A ● B ● C ● D



4 : 0

$W = 1$

3 : 1

$W = 4$

Langkah 2. Sekat dibuka. Makrostate "3 : 1": partikel yang berada di kanan bisa A, B, C, atau D. Ada **4 cara**, $W = 4$.

4 partikel, 2 ruang (kiri | kanan): berapa banyak susunan?

● A ● B ● C ● D



4 : 0

$W = 1$



3 : 1

$W = 4$



2 : 2

$W = 6$

Langkah 3. Makrostate "2 : 2": pasangan di kiri bisa AB, AC, AD, BC, BD, atau CD. Ada **6 cara**, $W = 6$, paling banyak!

4 partikel, 2 ruang (kiri | kanan): berapa banyak susunan?

● A ● B ● C ● D



4 : 0

$W = 1$



3 : 1

$W = 4$



2 : 2

$W = 6$



1 : 3

$W = 4$



0 : 4

$W = 1$

Langkah 4. "1 : 3" juga punya 4 cara dan "0 : 4" hanya 1 cara. Susunan cara membentuk pola 1, 4, 6, 4, 1. Tumpukannya sudah mirip grafik batang.

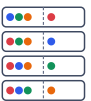
4 partikel, 2 ruang (kiri | kanan): berapa banyak susunan?

● A ● B ● C ● D



4 : 0

$W = 1$



3 : 1

$W = 4$



2 : 2

$W = 6$



1 : 3

$W = 4$



0 : 4

$W = 1$

Total 16 = 2⁴ susunan · 2 : 2 paling mungkin (6/16) · semua di kiri hanya 1/16

Langkah 5. Total ada $2^4 = 16$ mikrostate yang sama peluangnya. Makrostate "2 : 2" muncul $6/16 = 37,5\%$ dari waktu; "semua kembali ke kiri" hanya $1/16$.

4 partikel, 2 ruang (kiri | kanan): berapa banyak susunan?

● A ● B ● C ● D



4 : 0

$W = 1$



3 : 1

$W = 4$



2 : 2

$W = 6$



1 : 3

$W = 4$



0 : 4

$W = 1$

Total 16 = 2⁴ susunan · 2 : 2 paling mungkin (6/16) · semua di kiri hanya 1/16

Langkah 6. Dengan 100 partikel, peluang semua kembali ke kiri adalah $1/2^{100} \approx 8 \times 10^{-31}$. Satu mol gas berisi 6×10^{23} partikel: gas yang sudah menyebar **praktis tidak pernah** berkumpul kembali sendiri.

N = 100 partikel:
P(semua di kiri) = $1/2^{100}$
 $\approx 8 \times 10^{-31} \rightarrow$ praktis mustahil

Lemparan terakhir

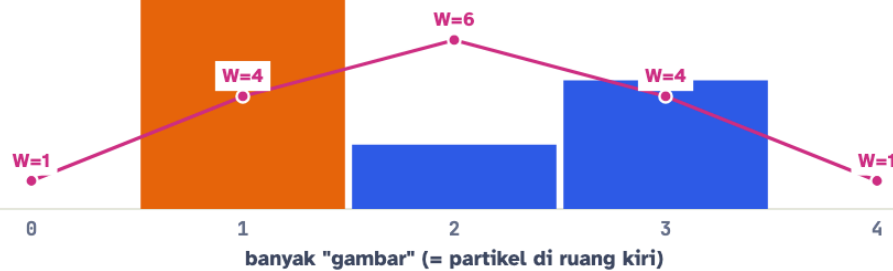


frekuensi relatif

batang biru = hasil lemparanmu

garis magenta = teori $W/2^N$

7 lemparan



jumlah lemparan

7

lemparan terakhir

1 gambar, 3 angka

makrostate tersering

1 gambar ($W = 4$)

"semua gambar" muncul

0

peluang teori semua gambar

0,06

Anggap setiap koin sebuah partikel: **gambar** = di ruang kiri, **angka** = di ruang kanan. Lempar 4 koin seratus kali dan bandingkan batang biru dengan garis teori $W/2^N$. Lalu pilih 20, 50, dan 100 koin. Mengapa sebarannya makin runcing di tengah? Berapa kali "semua gambar" (susunan paling rapi) muncul?

Ludwig Boltzmann menyadari bahwa **entropi** tidak lain adalah ukuran banyaknya mikrostate. Karena W bisa luar biasa besar, ia memakai logaritmanya:



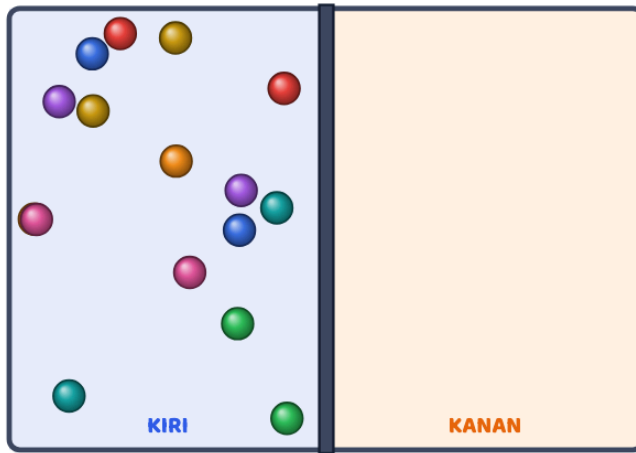
RUMUS BOLTZMANN • ENTROPI

$$S = k \ln W \quad k = \frac{R}{N_A} = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

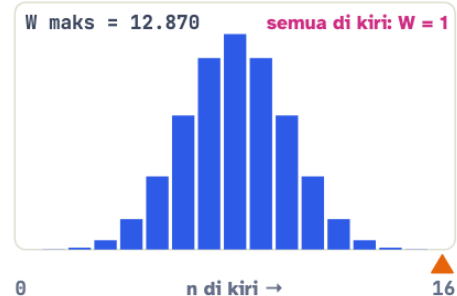
S adalah **entropi**, W banyaknya mikrostate, dan k **tetapan Boltzmann**. Makin banyak cara partikel dan energinya dapat tersusun, makin besar entropinya. Satuan entropi J/K; entropi molar memakai J/(mol·K).

Kotak gas bersekat

sekat tertutup

Banyak cara W untuk tiap makrostate

kiri: 16 • kanan: 0



Fraksi partikel di kiri terhadap waktu



Sekat tertutup. Buka sekatnya, lalu amati: apakah partikel pernah kembali semua ke kiri?

partikel di kiri

16

partikel di kanan

0

 W (banyak cara) saat ini

1

 $S/k = \ln W$

0

peluang semua di kiri = $1/2^N$ $1,53 \times 10^{-5}$

Keadaan

teratur: semua di kiri

Buka sekatnya dan amati partikel menyebar. Grafik batang di kanan menunjukkan banyak cara W untuk setiap makrostate: batang oranye adalah keadaanmu sekarang. Coba dengan $N = 4$: seberapa sering semua partikel kembali ke kiri? Lalu coba $N = 40$. Mau jadi "setan Maxwell"? **Seret** partikel kembali ke kiri satu per satu, lalu tutup sekatnya. Rasakan betapa repotnya menurunkan entropi!

Ketika volume gas menjadi dua kali lipat, setiap partikel punya dua kali lebih banyak tempat. Untuk N partikel, banyak cara bertambah 2^N kali, sehingga $\Delta S = k \ln 2^N = Nk \ln 2$. Untuk satu mol gas, $Nk = N_A k = R$, jadi $\Delta S = R \ln 2 = 5,76 \text{ J/K}$. Secara umum, untuk gas ideal pada suhu tetap:

$$\Delta S = n R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Saat volume gas membesar, setiap partikel punya lebih banyak tempat, sehingga banyaknya cara ω melonjak dan entropi naik.

n Jumlah gas mol

V_2/V_1 Perbandingan volume akhir/awal

ΔS Perubahan entropi J/K

PERUBAHAN ENTROPI

5,76
J/K

$R \ln 2 = 5,76 \text{ J/K}$

memuai: entropi naik

1 mol gas, volumenya dikali 2: $\Delta S = 5,76 \text{ J/K}$. Setiap partikel kini punya 2 kali lebih banyak tempat.

Cek satuan: $\text{mol} \times \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \times (\text{tanpa satuan}) = \text{J/K} \checkmark$

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

Apa yang membuat entropi besar?

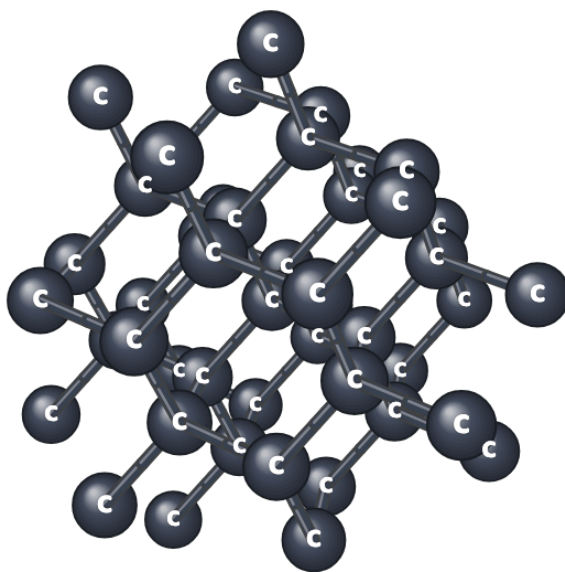
- **Wujud.** Gas jauh lebih besar daripada cair, dan cair sedikit lebih besar daripada padat: $S_{\text{gas}} \gg S_{\text{cair}} > S_{\text{padat}}$. Molekul gas bebas berkeliaran di ruang yang luas.
- **Suhu.** Makin panas, makin banyak cara energi dapat dibagikan ke partikel, sehingga entropi naik.
- **Jumlah mol gas.** Reaksi yang menghasilkan lebih banyak molekul gas hampir selalu menaikkan entropi.
- **Ukuran dan kerumitan molekul.** Molekul besar dengan banyak atom punya lebih banyak cara bergetar dan berputar (bandingkan CH_4 dengan C_3H_8).
- **Pelarutan dan pencampuran.** Kristal yang larut menjadi ion-ion yang tersebar biasanya menaikkan entropi.

Padat	$S^\circ \text{ (J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$	Cair	S°	Gas	S°
C (intan)	2,4	$\text{H}_2\text{O (l)}$	69,9	H_2	130,7
C (grafit)	5,7	Hg (l)	76,0	CH_4	186,3

MgO	26,9	H ₂ O ₂ (l)	109,6	H ₂ O (g)	188,8
Fe	27,3	Br ₂ (l)	152,2	N ₂	191,6
CaO	39,7	C ₂ H ₅ OH (l)	160,7	NH ₃	192,8
H ₂ O (s), es pada 0 °C	±41			O ₂	205,2
NaCl	72,1			CO ₂	213,8
CaCO ₃	92,9			Br ₂ (g)	245,5
C ₆ H ₁₂ O ₆ (glukosa)	212,1			C ₃ H ₈ (propana)	270,3

Entropi molar standar S° pada 298 K dan 1 bar. Bandingkan brom cair (152,2) dengan uap brom (245,5): zat yang sama, wujud berbeda, entropi melonjak.

MOLEKUL 3D Intan atau grafit: mana yang lebih leluasa bergoyang?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Intan (kisi kovalen raksasa) C

Setiap atom C berikatan kovalen dengan 4 atom C lain secara tetrahedral. Jaringan 3D ini membuat intan sangat keras.

Keduanya hanya berisi atom karbon. Putar intan: setiap atom C terkunci kaku oleh 4 ikatan ke segala arah. Putar grafit: lapisan-lapisannya hanya ditahan gaya lemah dan bisa bergeser serta bergetar lebih leluasa. Itulah sebabnya S° grafit (5,7) lebih besar daripada intan (2,4).



AWAS JEBAKAN

Entropi standar unsur bebas **tidak nol!** Untuk entalpi, ΔH_f° unsur bebas memang ditetapkan nol (Bab 19), tetapi entropi adalah nilai mutlak: S° gas $O_2 = 205,2 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Hanya kristal sempurna pada 0 K yang entropinya nol (hukum III termodinamika). Jangan lupa memasukkan S° unsur saat menghitung ΔS° reaksi.

Karena entropi adalah nilai mutlak, perubahan entropi reaksi standar dihitung langsung dari tabel:

$$\Delta S_{\text{reaksi}}^\circ = \sum n S^\circ(\text{produk}) - \sum n S^\circ(\text{pereaksi})$$



TRIK KAK TIRTA

"Hitung gas dulu!" Sebelum membuka tabel, hitung perubahan jumlah mol gas, Δn_{gas} . Entropi gas ($130\text{--}280 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) jauh lebih besar daripada padatan dan cairan, jadi tanda Δn_{gas} hampir selalu menebak tanda ΔS dengan benar. Gas bertambah $\rightarrow \Delta S$ positif; gas berkurang $\rightarrow \Delta S$ negatif. Pakai tebakan ini untuk mengecek hasil hitunganmu.

CONTOH Menebak tanda ΔS

Tebak tanda ΔS setiap proses: (a) $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$; (b) $\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{NH}_3(\text{g})$; (c) $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$; (d) $\text{NaCl}(\text{s}) \rightarrow \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$.

- 1 (a) Cair menjadi gas: partikel jauh lebih bebas $\rightarrow \Delta S$ **positif**.
- 2 (b) 4 mol gas menjadi 2 mol gas: $\Delta n_{\text{gas}} = -2 \rightarrow \Delta S$ **negatif**.
- 3 (c) Dari padatan saja terbentuk 1 mol gas: $\Delta n_{\text{gas}} = +1 \rightarrow \Delta S$ **positif**.
- 4 (d) Kristal teratur pecah menjadi ion-ion yang tersebar dalam air $\rightarrow \Delta S$ **positif**.

(a) +, (b) -, (c) +, (d) +. Tebakan cepat ini akan kita uji dengan angka pada contoh berikutnya.

Hitung ΔS° untuk $\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \longrightarrow 2 \text{NH}_3(\text{g})$ memakai tabel di atas.

- 1 Produk: $2 \times S^\circ(\text{NH}_3) = 2 \times 192,8 = 385,6 \text{ J/K}$.
- 2 Pereaksi: $S^\circ(\text{N}_2) + 3 \times S^\circ(\text{H}_2) = 191,6 + 3 \times 130,7 = 583,7 \text{ J/K}$.
- 3 $\Delta S^\circ = 385,6 - 583,7 = -198,1 \text{ J/K}$.

$\Delta S^\circ = -198,1 \text{ J/K}$ (per mol reaksi seperti tertulis). Tanda negatif cocok dengan tebakan "4 mol gas $\rightarrow$ 2 mol gas" ✓

20.3

Hukum II termodinamika: hakim sejati adalah semesta



Tebak Dulu!

Air yang membeku menjadi es justru makin teratur: entropinya *turun*. Mengapa air tetap bisa membeku dengan sendirinya di dalam freezer?

Tidak mungkin; freezer melanggar hukum alam selama listriknya menyala.

Karena membeku adalah perubahan fisika, sehingga entropi tidak berlaku.

Karena di dalam freezer tidak ada entropi sama sekali.

Karena kalor yang dilepas air menaikkan entropi lingkungan lebih banyak daripada penurunan entropi air itu sendiri.

Jawabannya: entropi lingkungan naik lebih banyak. Saat membeku, air melepas kalor ke udara freezer yang dingin. Kalor itu membuat partikel lingkungan bergerak lebih acak. Yang harus naik bukan entropi air saja, tetapi entropi **semesta** (sistem + lingkungan).

Sejauh ini kita hanya melihat sistem (zat yang bereaksi). Padahal, sistem selalu bertukar kalor dengan **lingkungan**. Kalor yang dilepas sistem membuat partikel-partikel lingkungan bergerak lebih kencang dan lebih acak, sehingga entropi lingkungan naik. Pada tekanan tetap, kalor itu sama dengan $-\Delta H_{\text{sistem}}$:

$$\Delta S_{\text{lingkungan}} = - \frac{\Delta H_{\text{sistem}}}{T}$$



TRIK KAK TIRTA

Mengapa dibagi T ? Bayangkan kamu bersin. Di perpustakaan yang sunyi, bersinmu membuat heboh. Di pasar yang sudah riuh, bersin yang sama hampir tidak terasa. Kalor yang sama juga "lebih terasa" bagi lingkungan yang dingin (T kecil) daripada bagi lingkungan yang panas (T besar).



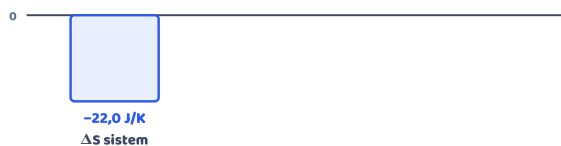
HUKUM II TERMODINAMIKA

Pada setiap proses spontan, entropi total semesta bertambah:

$$\Delta S_{\text{semesta}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{lingkungan}} > 0$$

Bila $\Delta S_{\text{semesta}} = 0$, sistem berada dalam **kesetimbangan**. Proses dengan $\Delta S_{\text{semesta}} < 0$ tidak terjadi dengan sendirinya; kebalikannyalah yang spontan.

Air membeku, $\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O(s)}$: siapa yang menang?



Langkah 1. Sistem: air yang membeku. Molekul air terkunci dalam kisi es yang teratur, sehingga entropi sistem **turun**: $\Delta S_{\text{sistem}} \approx -22,0 \text{ J/K}$ per mol.

Air membeku, $\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O(s)}$: siapa yang menang?



Langkah 2. Saat membeku, air melepas kalor 6,01 kJ/mol ke lingkungan. Kalor itu mengacak partikel lingkungan: $\Delta S_{\text{lingkungan}} = -\Delta H/T = +6010/T$. Besarnya bergantung pada suhu!

Air membeku, $\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O(s)}$: siapa yang menang?



Langkah 3. Pada -10°C (263 K): $\Delta S_{\text{lingkungan}} = 6010/263 = +22,9 \text{ J/K}$, sedikit lebih besar daripada penurunan entropi air. $\Delta S_{\text{semesta}} = +0,9 \text{ J/K} > 0$, jadi air membeku spontan.

Air membeku, $\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O(s)}$: siapa yang menang?



Langkah 4. Pada $+10^\circ\text{C}$ (283 K): kalor yang sama "kurang terasa" bagi lingkungan yang lebih hangat: $6010/283 = +21,2 \text{ J/K}$. $\Delta S_{\text{semesta}} = -0,8 \text{ J/K} < 0$. Air tidak membeku; justru es yang mencair.

Air membeku, $\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O(s)}$: siapa yang menang?

Hukum II: spontan $\Leftrightarrow \Delta S_{\text{semesta}} > 0$
batasnya tepat pada 0°C , ketika $\Delta S_{\text{semesta}} = 0$



Langkah 5. Kesimpulan: proses berlangsung spontan bila entropi semesta naik. Pada 0°C (273 K), $6010/273 \approx 22,0$ sehingga $\Delta S_{\text{semesta}} = 0$: es dan air setimbang. (Kita menganggap ΔH dan ΔS hampir tetap pada rentang suhu ini.)



AWAS JEBAKAN

Hukum II **tidak** mengatakan entropi setiap benda selalu naik. Entropi sebuah sistem boleh turun: air membeku, kristal garam tumbuh rapi di tambak garam Madura, dan tubuhmu menyusun protein yang sangat teratur. Syaratnya, entropi lingkungan harus naik lebih banyak. Di tambak garam, air laut yang menguap ke udara menyumbang entropi jauh lebih besar daripada keteraturan kristal garamnya. Yang selalu naik pada proses spontan adalah entropi **semesta**.



HUKUM III TERMODINAMIKA

Entropi kristal sempurna pada suhu nol mutlak (0 K) adalah nol, sebab hanya ada satu susunan ($W = 1, \ln 1 = 0$). Dengan titik nol ini, kimiawan bisa mengukur entropi mutlak setiap zat dengan memanaskannya perlahan dari dekat 0 K sambil mencatat kalor yang diserap. Hasilnya adalah tabel S° di subbab 20.2.



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1865, fisikawan Jerman **Rudolf Clausius** memberi nama "entropi" (dari bahasa Yunani *tropē*, perubahan) dan merumuskan bahwa entropi semesta cenderung naik. Satu dekade kemudian, **Ludwig Boltzmann** dari Austria menjelaskan entropi sebagai banyaknya susunan partikel. Gagasannya sempat ditentang karena banyak ilmuwan saat itu belum percaya pada atom. Kini rumus $S = k \log W$ terpahat di batu nisannya di Wina. Di Amerika, **Josiah Willard Gibbs** dari Universitas Yale menerbitkan karya panjang tentang kesetimbangan zat (1875–1878) yang melahirkan besaran energi bebas, yang kini memakai namanya.

MITOS

"Reaksi spontan pasti berlangsung cepat."

MITOS

"Entropi selalu naik di mana pun dan kapan pun."

FAKTA

Spontan hanya soal

arah

. Intan menjadi grafit dan kertas bereaksi dengan oksigen adalah proses spontan, tetapi sangat lambat pada suhu kamar karena energi aktivasinya besar (Bab 21).

FAKTA

Entropi sistem boleh turun (air membeku, makhluk hidup tumbuh teratur, kulkas mendinginkan), asalkan entropi lingkungan naik lebih banyak. Yang selalu naik adalah entropi **semesta**.

MITOS

"Reaksi eksoterm pasti spontan; reaksi endoterm tidak pernah spontan."

FAKTA

Es mencair dan garam larut adalah proses endoterm yang spontan. Air membeku pada 10 °C adalah eksoterm, tetapi tidak terjadi. Yang menentukan adalah

ΔG

, gabungan

ΔH

dan

$T\Delta S$

.

20.4 Energi bebas Gibbs: satu angka penentu arah

Menghitung entropi lingkungan setiap kali tentu merepotkan. Josiah Willard Gibbs menemukan jalan pintas: gabungkan kedua hakim, entalpi dan entropi, menjadi satu besaran yang hanya menyangkut **sistem**. Besaran itu adalah **energi bebas Gibbs**, G .

Bahasa sederhana • Bayangkan dua hakim dalam lomba. Hakim pertama, ΔH , menyukai proses yang melepas kalor. Hakim kedua, $T\Delta S$, menyukai proses yang membuat partikel lebih bebas, dan suaranya makin keras ketika suhu makin tinggi. Keputusan akhir dihitung dengan ΔG . Kalau ΔG negatif, proses jalan sendiri.

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

▼ Mengapa begitu? Dari hukum II ke ΔG

Mulai dari hukum II pada suhu dan tekanan tetap: $\Delta S_{\text{semesta}} = \Delta S - \frac{\Delta H}{T}$, dengan ΔS dan ΔH milik sistem.

Kalikan kedua ruas dengan $-T$: $-T\Delta S_{\text{semesta}} = \Delta H - T\Delta S$.

Ruas kanan inilah yang didefinisikan sebagai ΔG . Jadi $\Delta G = -T\Delta S_{\text{semesta}}$. Karena T selalu positif, $\Delta S_{\text{semesta}} > 0$ sama artinya dengan $\Delta G < 0$. Satu angka milik sistem cukup untuk mengetahui keputusan seluruh semesta!



KRITERIA SPONTANITAS (SUHU DAN TEKANAN TETAP)

- $\Delta G < 0$: proses **spontan** ke arah yang tertulis.
- $\Delta G = 0$: sistem dalam **kesetimbangan**; tidak ada arah yang lebih disukai.
- $\Delta G > 0$: proses **tidak spontan**; kebalikannya yang spontan.

Nilai $-\Delta G$ juga menyatakan kerja berguna maksimum (selain kerja pemuaian) yang dapat diperoleh dari proses itu. Karena itulah G disebut energi "bebas": energi yang bebas dipakai untuk bekerja.

RUMUS HIDUP

Energi bebas Gibbs

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Perubahan energi bebas sama dengan perubahan entalpi dikurangi suhu mutlak kali perubahan entropi. Hasil negatif berarti proses spontan.

ΔH Perubahan entalpi kJ/mol

ΔS Perubahan entropi J/(mol·K)

T Suhu mutlak K

ΔG Perubahan energi bebas kJ/mol

PERUBAHAN ENERGI BEBAS

-0,55

kJ/mol

$\Delta H +$, $\Delta S +$: spontan pada suhu tinggi

es mencair

Pada 298 K: $\Delta G = 6,01 - 298 \times (22 \div 1000) = -0,55$ kJ/mol $\rightarrow$ **SPONTAN**.

Cek satuan: kJ/mol – K $\times$ J/(mol·K) $\div$ 1000 = kJ/mol ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-ENERGI-BEBAS-GIBBS](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-energi-bebas-gibbs)



AWAS JEBAKAN

Satuan! ΔH biasanya dalam **kJ/mol**, sedangkan ΔS dalam **J/(mol·K)**. Ubah ΔS ke kJ dengan membaginya 1000 sebelum mengalikan dengan T . Lupa membagi 1000 adalah kesalahan paling umum di bab ini: hasilnya meleset seribu kali lipat. Pastikan juga T dalam kelvin, bukan derajat Celsius.

CONTOH Kapan es mencair?

Untuk $\text{H}_2\text{O (s)} \rightarrow \text{H}_2\text{O (l)}$, $\Delta H = +6,01 \text{ kJ/mol}$ dan $\Delta S = +22,0 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$. Hitung ΔG pada 25°C dan pada -10°C .

1 Ubah satuan: $\Delta S = +22,0 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)} = +0,0220 \text{ kJ/(mol}\cdot\text{K)}$.

2 Pada 25°C , $T = 298 \text{ K}$: $\Delta G = 6,01 - 298 \times 0,0220 = 6,01 - 6,56 = -0,55 \text{ kJ/mol}$.

3 Pada -10°C , $T = 263 \text{ K}$: $\Delta G = 6,01 - 263 \times 0,0220 = 6,01 - 5,79 = +0,22 \text{ kJ/mol}$.

Pada 25°C , $\Delta G < 0$: es mencair spontan. Pada -10°C , $\Delta G > 0$: es tidak mencair; justru air yang membeku spontan. Hasil ini cocok dengan neraca entropi pada subbab 20.3.

Karena T selalu positif, tanda ΔG ditentukan oleh tanda ΔH dan ΔS . Ada empat kemungkinan:

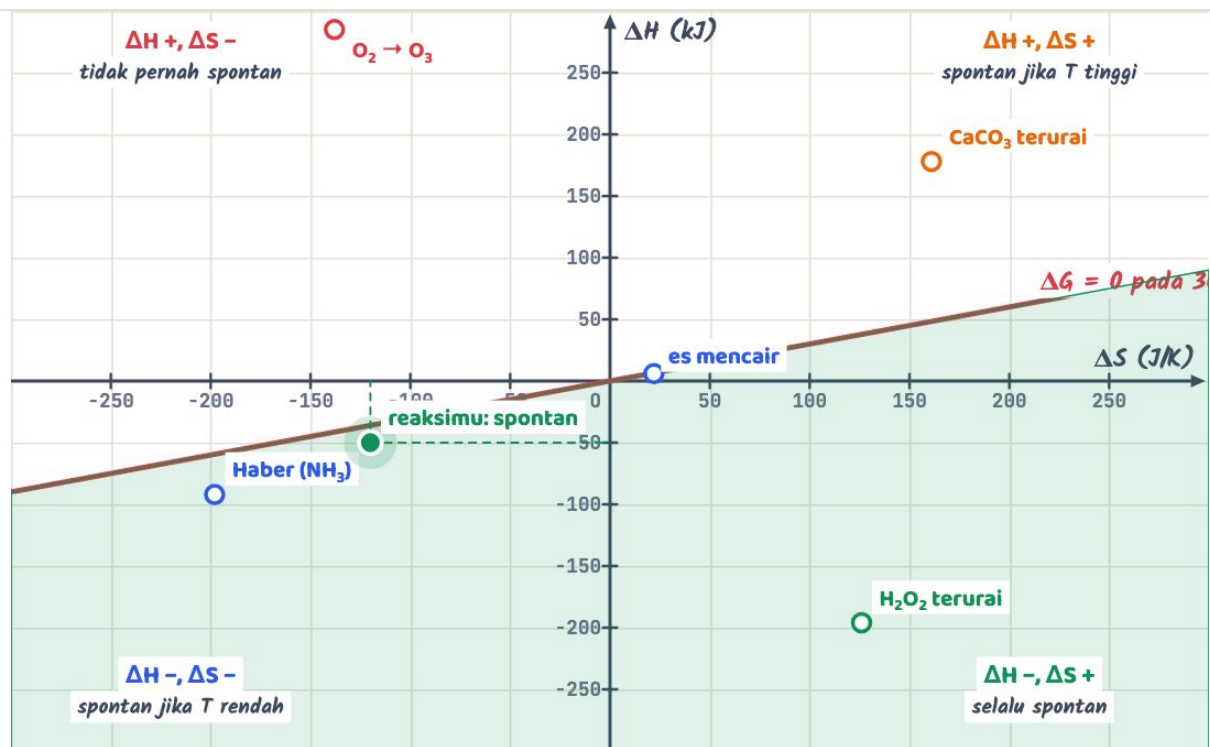
ΔH	ΔS	$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$	Spontan?	Contoh
– (eksoterm)	+	selalu negatif	pada semua suhu	$2 \text{ H}_2\text{O}_2 (\text{l}) \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O} (\text{l}) + \text{O}_2 (\text{g})$; fermentasi tape: glukosa $\rightarrow$ etanol + CO_2
+	–	selalu positif	tidak pernah (kebalikannya yang spontan)	$3 \text{ O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2 \text{ O}_3 (\text{g})$; fotosintesis, yang harus "didorong" energi cahaya
– (eksoterm)	–	negatif bila T kecil	di bawah suhu peralihan	air membeku, uap mengembun menjadi embun pagi, pembuatan amonia
+	+	negatif bila T besar	di atas suhu peralihan	es mencair, air mendidih, CaCO_3 terurai di tungku kapur

**TRIK KAK TIRTA**

Ingat rumusnya seperti gaji bulanan: **Gaji = Honor – Tagihan Sewa**, yaitu $G = H - TS$. Untuk empat kuadran, ingat satu kalimat: "**tanda beda, nasib pasti; tanda sama, tunggu suhu**". Jika ΔH dan ΔS bertanda berbeda, hasilnya pasti (selalu atau tidak pernah spontan). Jika tandanya sama, suhulah yang menentukan.

$$\Delta G < 0 \iff \Delta H < T \Delta S$$

$$\Delta G = -14 \text{ kJ} \quad (T = 300 \text{ K})$$



✓ titikmu di daerah hijau: spontan pada 300 K

ΔG pada suhu ini
-14 kJ

T peralihan
417 K

Kuadran
spontan di bawah T peralihan

Daerah hijau adalah semua pasangan $(\Delta S, \Delta H)$ yang spontan pada suhu T ; batasnya garis merah $\Delta H = T\Delta S$. Seret titik "reaksimu", lalu geser suhu. Perhatikan garis merah **berputar**: makin panas, makin curam garisnya, sehingga reaksi di kuadran kanan atas (seperti CaCO_3 terurai) masuk ke daerah hijau. Kuadran kanan bawah selalu hijau, kuadran kiri atas tidak pernah.

Untuk $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{NH}_3(\text{g})$, $\Delta H^\circ = -92,2 \text{ kJ}$ dan $\Delta S^\circ = -198,1 \text{ J/K}$. Hitung ΔG° pada 298 K dan pada 700 K (suhu pabrik pupuk). Di bawah suhu berapa reaksi ini spontan pada keadaan standar?

- 1 $\Delta S^\circ = -0,1981 \text{ kJ/K}$. Pada 298 K: $\Delta G^\circ = -92,2 - 298(-0,1981) = -92,2 + 59,0 = -33,2 \text{ kJ} \rightarrow$ spontan.
- 2 Pada 700 K: $\Delta G^\circ = -92,2 - 700(-0,1981) = -92,2 + 138,7 = +46,5 \text{ kJ} \rightarrow$ tidak spontan pada keadaan standar.
- 3 Suhu peralihan: $T = \frac{\Delta H}{\Delta S} = \frac{-92,2}{-0,1981} = 465 \text{ K } (\pm 192^\circ \text{C})$. Reaksi spontan di bawah suhu ini.

Termodinamika "menyukai" suhu rendah, tetapi pada suhu rendah reaksinya terlalu lambat. Pabrik pupuk di Bontang, Gresik, dan Palembang memilih jalan tengah: sekitar 400–450 °C dengan katalis besi, ditambah tekanan sangat tinggi yang menggeser kesetimbangan ke arah amonia (Bab 22). Kimia industri adalah seni berkompromi!



ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-20

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Bagi ΔS dengan 1000 dulu! Contoh: $-92 - 500 \times (-0,200) = +8 \text{ kJ/mol}$.

20.5 Suhu peralihan: kapan es mencair dan kapur terurai?

Bila ΔH dan ΔS bertanda sama, ada satu suhu istimewa ketika kedua hakim seri: $\Delta H = T\Delta S$, sehingga $\Delta G = 0$. Suhu ini disebut **suhu peralihan**. Di satu sisinya proses spontan, di sisi lain tidak.

$$\Delta G = 0 \Rightarrow T_{\text{peralihan}} = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

Suhu ketika ΔG tepat nol: di sini hakim entalpi dan hakim entropi seimbang.

ΔH Perubahan entalpi kJ/mol

ΔS Perubahan entropi J/(mol·K)

T Suhu peralihan K

SUHU PERALIHAN

1.106

K

 rentang tungku kapur

$$T = 1000 \times 178 \div 161 = 1.106 \text{ K, atau } 832,44 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Satuan Nusantara: $\approx 85\%$ dari lava Merapi ($\pm$) $\cdot \approx 3 \times$ air mendidih $\cdot \approx 3,6 \times$ suhu tubuh

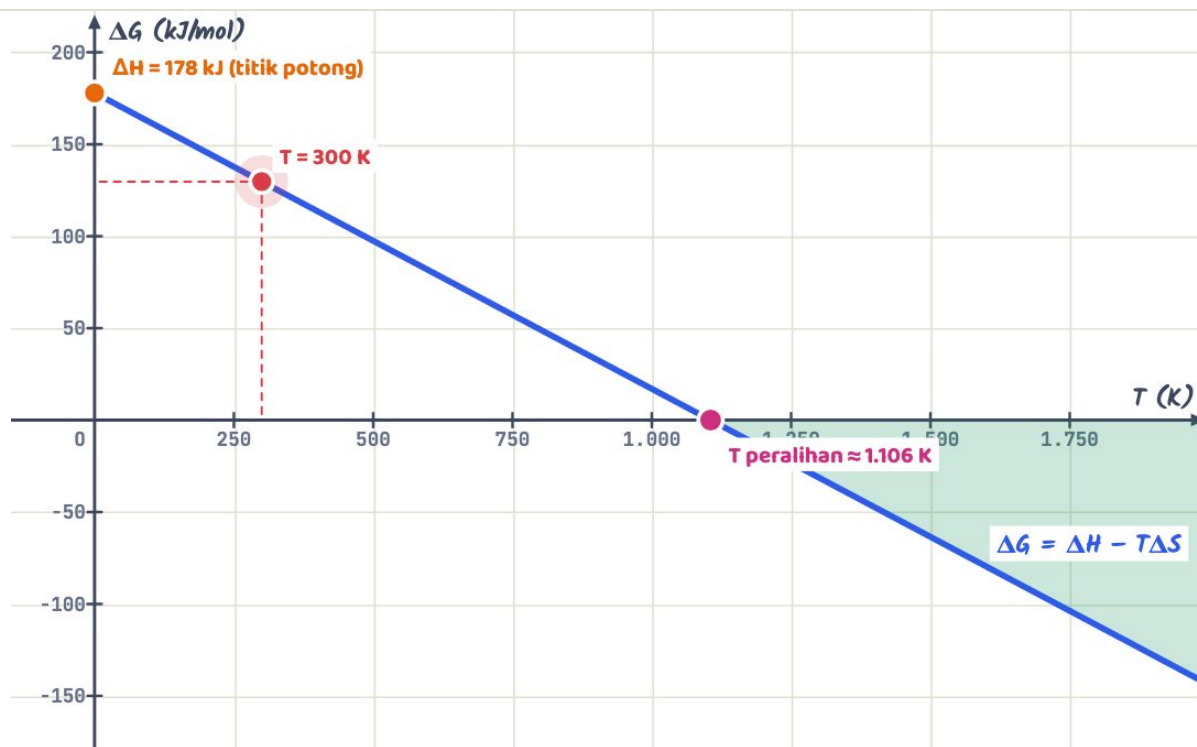
Cek satuan: (kJ/mol $\times 1000$) $\div$ J/(mol·K) = K ✓

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

Coba hitung untuk es: $T = 6010/22,0 = 273 \text{ K} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Untuk air mendidih ($\Delta H = 40,7 \text{ kJ/mol}$, $\Delta S = 109 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$): $T = 40.700/109 = 373 \text{ K} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. **Titik leleh dan titik didih adalah suhu peralihan!** Pada suhu itu kedua wujud setimbang.

$$\Delta G(T) = \Delta H - T \Delta S$$

$$\Delta G = 129,7 \text{ kJ/mol } (T = 300 \text{ K})$$

 $\Delta G > 0$: tidak spontan
 batu kapur: T peralihan $\approx 1.106 \text{ K}$
 ΔG pada T

129,7 kJ/mol

T peralihan

1.106 K

kemiringan = $-\Delta S$

-0,161 kJ/(mol·K)

Garis biru memotong sumbu tegak di ΔH dan kemiringannya $-\Delta S$. Daerah hijau menandai suhu-suhu ketika $\Delta G < 0$. Seret titik merah untuk mengubah suhu. Coba masukkan es ($\Delta H = 6$, $\Delta S = 22$), lalu reaksi Haber ($\Delta H = -92$, $\Delta S = -198$): garisnya kini **naik**, dan daerah hijau pindah ke suhu rendah.



KIMIA NUSANTARA • TUNGKU KAPUR PADALARANG DAN GUNUNG KIDUL

Di perbukitan kapur Citatah, Padalarang, dan di kawasan karst Gunung Kidul, perajin membakar batu gamping (CaCO_3) dalam tungku berbahan bakar kayu atau batu bara selama sehari-hari. Reaksinya $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$ bersifat endoterm ($\Delta H = +178 \text{ kJ/mol}$), tetapi menghasilkan gas sehingga $\Delta S = +161 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Hasilnya, kapur tohor (CaO), disiram air menjadi kapur padam $\text{Ca}(\text{OH})_2$ untuk melabur dinding, campuran adukan bangunan, menjernihkan air, menetralkan tanah sawah yang masam, dan kapur sirih untuk menginang. Batu gamping di bukit-bukit karst tetap utuh selama jutaan tahun karena pada suhu udara ΔG penguraianya sangat positif.

Data: ΔH_f° (kJ/mol): CaCO_3 -1206,9; CaO -635,1; CO_2 -393,5. S° (J mol⁻¹ K⁻¹): CaCO_3 92,9; CaO 39,7; CO_2 213,8. Tentukan suhu minimum agar $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$ spontan pada keadaan standar.

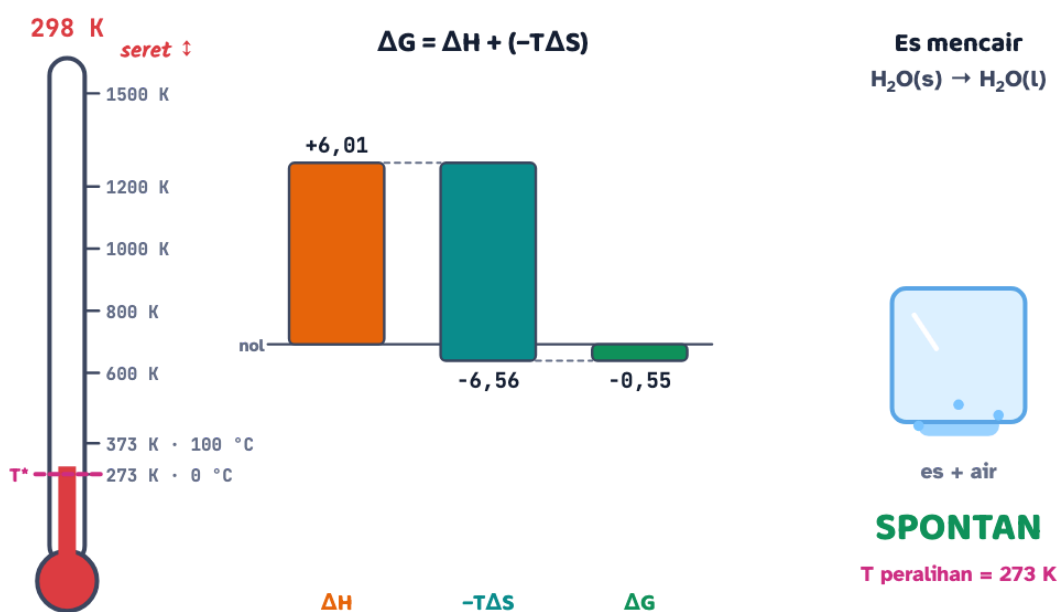
1 $\Delta H^\circ = [-635,1 + (-393,5)] - (-1206,9) = +178,3 \text{ kJ}$ (cara Bab 19).

2 $\Delta S^\circ = (39,7 + 213,8) - 92,9 = +160,6 \text{ J/K} = +0,1606 \text{ kJ/K}$.

3 Kuadran "+, +": spontan di atas suhu peralihan. $T = \frac{178,3}{0,1606} = 1110 \text{ K}$.

4 Ubah ke Celsius: $1110 - 273 = 837^\circ\text{C}$. Cek: pada 298 K, $\Delta G^\circ = 178,3 - 298(0,1606) = +130,4 \text{ kJ}$, sangat positif ✓

Batu kapur baru terurai spontan di atas $\pm 1.110 \text{ K}$ ($\pm 840^\circ\text{C}$). Hitungan ini menganggap ΔH dan ΔS tetap; data percobaan menunjukkan tekanan CO_2 mencapai 1 atm sekitar 900°C . Tungku kapur biasanya bekerja pada $900\text{--}1.000^\circ\text{C}$ agar bongkahan batu terurai cukup cepat sampai ke bagian dalamnya.



suhu

25 °C

 ΔH

6,01 kJ/mol

 $T\Delta S$

6,56 kJ/mol

 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

-0,55 kJ/mol

T peralihan

273 K (0 °C)

Arah

spontan ke kanan

Pilih sebuah proses, lalu **seret termometer** (atau geser slider suhu). Batang oranye adalah ΔH , batang toska adalah $-T\Delta S$, dan jumlah keduanya adalah ΔG . Amati es di 263 K dan 298 K, batu kapur di 298 K dan 1.200 K, serta reaksi Haber di 300 K dan 700 K. Proses mana yang tidak pernah berubah keputusannya, berapa pun suhunya? (Model ini menganggap ΔH dan ΔS tidak bergantung suhu.)

**MENGAPA KARBON BISA MEREbut OKSIGEN DARI BIJIH TIMAH BANGKA?**

Bijih timah dari Bangka-Belitung berupa kasiterit, SnO_2 . Di tanur peleburan, bijih dipanaskan bersama karbon: $\text{SnO}_2(\text{s}) + 2\text{C}(\text{s}) \longrightarrow \text{Sn}(\text{s}) + 2\text{CO}(\text{g})$. Reaksi ini sangat endoterm, tetapi menghasilkan 2 mol gas dari padatan saja.

- $\Delta H^\circ = 2(-110,5) - (-580,7) = +359,7 \text{ kJ}$
- $\Delta S^\circ = [51,2 + 2(197,7)] - [49,0 + 2(5,7)] = +386,2 \text{ J/K}$ (data S° : **Sn** 51,2; CO 197,7; SnO_2 49,0; C 5,7)
- $T_{\text{peralihan}} = 359,7/0,3862 \approx 931 \text{ K } (\pm 660^\circ\text{C})$

Di atas sekitar 930 K, suku $T\Delta S$ mengalahkan ΔH , sehingga karbon "menang" merebut oksigen. Tanur peleburan bekerja jauh di atas suhu itu (lebih dari 1.100 °C) supaya reaksinya cepat dan timah keluar dalam keadaan cair. Grafik ΔG° terhadap T untuk pembentukan berbagai oksida logam disebut **diagram Ellingham**; para metalurg memakainya untuk memilih suhu dan zat pereduksi.

Aturan Trouton: untuk banyak cairan, $\Delta S_{\text{penguapan}} \approx 85\text{--}88 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pada titik didihnya, karena kenaikan "kebebasan" dari cair ke gas kira-kira sama. Air menyimpang (109 $\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) karena ikatan hidrogen membuat air cair lebih teratur daripada cairan biasa (Bab 13).

20.6 Lanjut: ΔG° , tetapan kesetimbangan, dan potensial sel

Tanda bulat ° pada ΔG° berarti **keadaan standar**: setiap gas bertekanan 1 bar dan setiap zat terlarut berkonsentrasi 1 mol/L. Dalam campuran nyata, komposisi terus berubah selama reaksi, sehingga ΔG pun berubah. Reaksi berjalan ke arah $\Delta G < 0$ sampai akhirnya $\Delta G = 0$: saat itulah tercapai **kesetimbangan** (Bab 22).

Hubungan antara ΔG dan komposisi campuran dinyatakan oleh $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q$, dengan Q hasil bagi reaksi. Pada kesetimbangan $\Delta G = 0$ dan $Q = K$, sehingga diperoleh hubungan yang sangat penting:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad \Longleftrightarrow \quad K = e^{-\Delta G^\circ/RT}$$

ΔG° (kJ/mol) pada 298 K	K	Artinya saat setimbang
-100	3×10^{17}	hampir seluruhnya produk
-10	57	produk lebih banyak
0	1	seimbang
+10	$1,8 \times 10^{-2}$	pereaksi lebih banyak
+100	3×10^{-18}	hampir tidak bereaksi

$$K = e^{-\Delta G^\circ / (RT)}$$

Makin negatif ΔG° , makin besar K : produk makin disukai ketika kesetimbangan tercapai.

 ΔG°

Energi bebas standar kJ/mol

 T

Suhu K

 K

Tetapan kesetimbangan

TETAPAN KESETIMBANGAN

608.950,234 $\Delta G^\circ < 0 \rightarrow K > 1$ Haber pada 25 °C: $K \approx 6 \times 10^5$

$$K = e^{(-(-33 \times 1000) \div (8,314 \times 298))} = 608.950,234 \rightarrow \text{produk sangat disukai.}$$

Cek satuan: (J/mol) $\div$ (J/(mol·K) $\times$ K) = tanpa satuan ✓

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

COBA SENDIRI

K reaksi Haber pada 25 °C

Dengan $\Delta G^\circ = -33,0 \text{ kJ/mol}$ untuk $\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3(\text{g})$ pada 298 K, hitung K . ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

1 Ubah satuan: $\Delta G^\circ = -33.000 \text{ J/mol}$.

$$2 \quad \ln K = -\frac{\Delta G^\circ}{RT} = \frac{33.000}{8,314 \times 298} = 13,32.$$

$$3 \quad K = e^{13,32} \approx 6,1 \times 10^5.$$

$K \approx 6 \times 10^5$: pada suhu kamar, kesetimbangan sangat condong ke amonia. Sayangnya reaksinya nyaris tidak berjalan pada suhu kamar tanpa katalis. Lagi-lagi: spontan belum tentu cepat!

Energi bebas juga terhubung dengan listrik. Dalam sel volta (Bab 30), n mol elektron yang didorong oleh beda potensial E° melakukan kerja listrik:

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ \quad F = 96.485 \text{ C/mol}$$

Sel Daniell (Zn-Cu) dengan $E^\circ = 1,10 \text{ V}$ dan $n = 2$ memberi $\Delta G^\circ = -2 \times 96.485 \times 1,10 \approx -212.000 \text{ J}$, yaitu sekitar -212 kJ . Potensial sel positif selalu berarti ΔG° negatif: baterai yang "hidup" adalah reaksi spontan yang energinya kita panen sebagai listrik.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

REAKSI KOPLING: CARA SEL HIDUP "MENDORONG" REAKSI YANG TIDAK SPONTAN

Tubuhmu terus membuat molekul yang lebih teratur daripada bahan bakunya. Misalnya, sel mengikatkan gugus fosfat pada glukosa sebagai langkah pertama mengolah gula: $\Delta G^\circ \approx +13,8 \text{ kJ/mol}$, tidak spontan. Sel lalu "memasangkan" reaksi ini dengan penguraian ATP menjadi ADP, yang $\Delta G^\circ \approx -30,5 \text{ kJ/mol}$.

Karena G adalah fungsi keadaan, ΔG reaksi yang dijumlahkan juga dijumlahkan (seperti hukum Hess di Bab 19): $+13,8 + (-30,5) = -16,7 \text{ kJ/mol}$. Reaksi gabungannya spontan! Enzim memastikan kedua reaksi benar-benar terjadi bersamaan. Prinsip yang sama dipakai industri: reaksi yang "rugi" dipasangkan dengan reaksi yang sangat "untung", seperti peleburan timah di subbab 20.5 yang memanfaatkan pembentukan CO.

Kimia di sekitarmu



Es batu di warung

Kotak gabus hanya memperlambat aliran kalor; ia tidak mengubah arah. Pada 30°C , $T\Delta S$ lebih besar daripada ΔH , sehingga es pasti mencair, cepat atau lambat.



Es puter dan garam kasar

Pedagang es puter mencampur es batu dengan garam kasar. Air asin punya entropi lebih besar, sehingga es "terdorong" mencair sambil menyerap kalor dari adonan, dan campuran bisa turun di bawah -10°C .



Tapai singkong

Ragi mengubah glukosa menjadi etanol dan gas CO_2 . Reaksinya eksoterm dan entropinya naik, jadi spontan pada semua suhu. Enzim ragi hanya mempercepatnya.



Fotosintesis di sawah

Membuat glukosa dari CO_2 dan air punya ΔH positif dan ΔS negatif: tidak pernah spontan. Padi "membayarinya" dengan energi cahaya matahari.



Tungku kapur

Batu gamping baru terurai spontan di atas $\pm 840^\circ\text{C}$. Karena itu bukit karst Gunung Sewu tetap berdiri, sementara tungku kapur harus menyala sehari-hari.



Kulkas dan freezer

Di dalam freezer, entropi air turun saat membeku. Kompresor membuang kalor yang lebih besar ke dapur (bagian belakang kulkas terasa hangat), sehingga entropi semesta tetap naik.

Cek Cepat

Proses dengan $\Delta H > 0$ dan $\Delta S > 0$ akan spontan pada ...

suhu rendah saja

suhu tinggi saja

semua suhu

tidak pernah

$\Delta H = -100 \text{ kJ/mol}$, $\Delta S = +50 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$, $T = 300 \text{ K}$. Berapa ΔG ?

-15.100 kJ/mol

-85 kJ/mol

$+15 \text{ kJ/mol}$

-115 kJ/mol

Proses manakah yang ΔS -nya negatif?

Uap air mengembun menjadi embun pagi

Gula larut dalam teh

Batu kapur terurai di tungku

Parfum menguap dari kulit

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. D • 3. A



Tantangan Rumah: kancing rapi, kancing acak

Bahan: 6 kancing baju (3 merah dan 3 putih, atau tutup botol dua warna), 1 gelas plastik, 1 wadah telur berlubang 6 (atau 6 kotak yang digambar di kertas), pensil, dan kertas catatan.

1. Tandai 3 lubang di sisi kiri wadah telur sebagai "KIRI" dan 3 lubang di sisi kanan sebagai "KANAN".
2. Masukkan keenam kancing ke gelas, tutup dengan telapak tangan, lalu kocok.
3. Tanpa melihat, ambil kancing satu per satu dan isi lubang secara berurutan dari kiri ke kanan.
4. Catat berapa kancing merah yang berada di sisi KIRI (0, 1, 2, atau 3).
5. Ulangi 40 kali, lalu buat diagram batang hasilmu.

Keselamatan: kancing kecil mudah tertelan, jadi jauhkan dari adik balita dan jangan dimasukkan ke mulut. Bekerjalah di atas meja supaya kancing tidak tercecer ke lantai dan membuat orang terpeleset. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Ada $\binom{6}{3} = 20$ cara menempatkan 3 kancing merah di 6 lubang. Hanya 1 cara yang "rapi" (ketiga merah di kiri). Berapa kali susunan rapi muncul dari 40 percobaanmu? Cocokkah dengan perkiraan $40 \times \frac{1}{20} = 2$ kali? Bayangkan kamar dengan 100 barang!



RINGKASAN KILAT

Bab 20 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membedakan proses **spontan** dan tidak spontan, serta menjelaskan bahwa spontan tidak sama dengan cepat
- menjelaskan **entropi** sebagai ukuran banyaknya cara (mikrostate) melalui $S = k \ln W$, dan meramalkan tanda ΔS untuk perubahan wujud dan reaksi gas
- menghitung ΔS° reaksi dari data entropi standar dan menerapkan **hukum II termodinamika**
- menghitung **energi bebas Gibbs** $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ dengan satuan yang benar, membaca empat kombinasi tanda, dan menentukan **suhu peralihan**

- (Lanjut) menghubungkan ΔG° dengan tetapan kesetimbangan K dan potensial sel E°

Istilah kunci

spontan

tidak spontan

entropi

Makrostate

Mikrostate

tetapan Boltzmann

kesetimbangan

energi bebas Gibbs

suhu peralihan

Rumus penting

$$\Delta S = n R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Entropi gas yang memuai. Saat volume gas membesar, setiap partikel punya lebih banyak tempat, sehingga banyaknya cara W melonjak dan entropi naik.

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Energi bebas Gibbs. Perubahan energi bebas sama dengan perubahan entalpi dikurangi suhu mutlak kali perubahan entropi. Hasil negatif berarti proses spontan.

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

Suhu peralihan. Suhu ketika ΔG tepat nol: di sini hakim entalpi dan hakim entropi seimbang.

$$K = e^{-\Delta G^\circ / (RT)}$$

Tetapan kesetimbangan dari ΔG° . Makin negatif ΔG° , makin besar K : produk makin disukai ketika kesetimbangan tercapai.

Jangan sampai terjebak

- Spontan tidak berarti cepat.
- Entropi standar unsur bebas tidak nol!
- Hukum II tidak mengatakan entropi setiap benda selalu naik.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=20

Teka-teki untuk Bab 21

Untuk perubahan intan menjadi grafit, $\Delta G^\circ \approx -2,9$ kJ/mol pada suhu kamar. Secara termodinamika, intan "ingin" berubah menjadi grafit. Lalu mengapa cincin intan nenekmu tidak berubah menjadi serbuk hitam seperti isi pensil?

▼ Intip petunjuk

Termodinamika hanya mengatakan *boleh*. Untuk berubah, setiap atom karbon intan harus memutuskan ikatan kovalen yang sangat kuat dulu. "Bukit" energi yang harus didaki, yaitu **energi aktivasi**, begitu tinggi sehingga pada suhu kamar perubahan itu butuh waktu jauh lebih lama daripada umur Bumi. Di Bab 21 kita belajar tentang laju reaksi: *seberapa cepat* sebuah proses spontan benar-benar terjadi.

21

BAB 21 · ENERGI, LAJU & KESETIMBANGAN

Laju Reaksi: Balapan Para Molekul

Kembang api meletus dalam sekejap, sedangkan paku butuh berminggu-minggu untuk berkarat. Pisang di dalam karung cepat menguning, tetapi sayur di kulkas tetap segar berhari-hari. Siapa yang mengatur kecepatan reaksi, dan bisakah kita memutar "kenop gas"-nya?

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan arti **laju reaksi**, cara mengukurnya, serta membedakan laju rata-rata dan laju sesaat;
- memakai **teori tumbukan**, **energi aktivasi**, dan kurva **Maxwell-Boltzmann** untuk menjelaskan pengaruh konsentrasi, luas permukaan, suhu, dan katalis;
- menentukan **persamaan laju**, **orde reaksi**, dan satuan tetapan laju dari data laju awal;
- menghitung **waktu paruh** reaksi orde satu, misalnya sisa obat dalam darah;
- memakai **persamaan Arrhenius** dan menjelaskan **mekanisme reaksi**, tahap penentu laju, serta kerja enzim.

PISANG DI DALAM KARUNG

KOMIK · 4 PANEL

Sore hari, di dapur rumah Bima

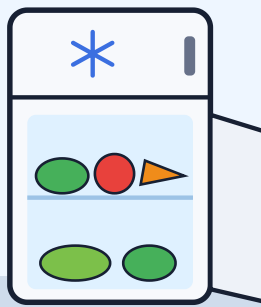
BIMA

Ibu memasukkan pisang hijau ke karung bersama satu pisang yang sudah matang. Katanya lusa sudah kuning semua. Kok bisa?



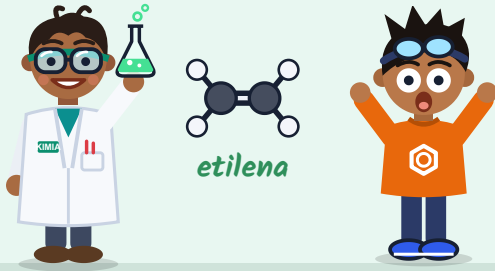
LARAS

Pedagang di pasar malah memakai karbit. Anehnya, sayur di kulkas bisa tetap segar seminggu. Kebalikannya!



KAK TIRTA

Matang dan busuk itu reaksi kimia. Karung "mengurung" gas etilena dari buah matang, jadi reaksinya ngebut. Kulkas yang dingin justru menginjak rem!

AHA!**Kimo ikut nimbrung...****KIMO**

Aku juga begitu! Pagi yang dingin membuatku lamban, siang yang panas membuatku gesit. Reaksi kimia di tubuhku ikut suhu.

BIMA

Jadi laju reaksi bisa diatur... tapi caranya?

**Tebak Dulu!**

Dua tablet vitamin C effervescent yang sama dimasukkan ke dua gelas air yang sama. Tablet pertama utuh, tablet kedua digerus halus dulu. Apa yang terjadi?

Serbuk habis lebih cepat dan menghasilkan gas lebih banyak.

Serbuk habis lebih cepat, tetapi jumlah gas totalnya sama.

Tablet utuh lebih cepat karena lebih padat dan berat.

Keduanya sama cepat karena massanya sama.

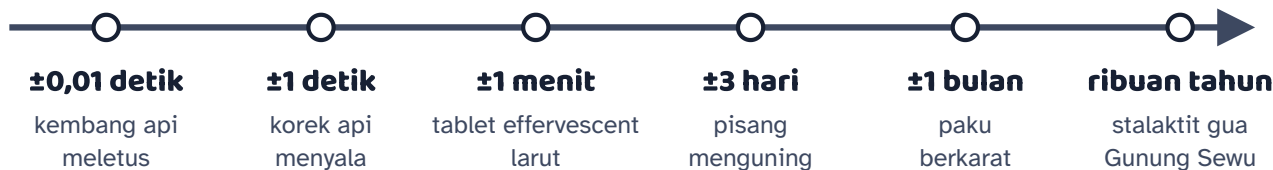
Jawabannya: serbuk lebih cepat, gasnya sama banyak. Menggerus membuka jauh lebih banyak permukaan sehingga lebih banyak partikel air dan asam yang bisa "menabrak" tablet setiap detik. Tetapi jumlah zat di dalam tablet tidak berubah, jadi gas karbon dioksida yang terbentuk tetap sama. Laju menjawab "seberapa cepat", bukan "seberapa banyak".

21.1 Seberapa cepat? Mengukur laju reaksi

Ada reaksi secepat kilat dan ada yang selambat siput. Kembang api meletus dalam seperseratus detik. Pisang di karung butuh beberapa hari untuk menguning. Paku di halaman berkarat dalam hitungan minggu. Stalaktit di gua-gua karst Gunung Sewu hanya tumbuh sekitar satu sentimeter dalam seratus tahun.

sekejap

sangat lambat



Reaksi kimia punya "jam" yang sangat berbeda-beda, dari seperseratus detik sampai ribuan tahun.

Bahasa sederhana • Laju reaksi mirip kecepatan motor. Kecepatan motor adalah jarak yang ditempuh dibagi waktu. Laju reaksi adalah banyaknya zat yang berubah dibagi waktu. Kalau banyak zat berubah dalam waktu singkat, reaksinya cepat. Kalau sedikit sekali yang berubah dalam waktu lama, reaksinya lambat.

Kimiawan mengukur laju dengan mengamati seberapa cepat **pereaksi berkurang** atau **produk bertambah**. Biasanya yang dipantau adalah konsentrasi dalam mol per liter (M).



DEFINISI • LAJU REAKSI

Laju reaksi (v) adalah perubahan konsentrasi pereaksi atau produk setiap satuan waktu:

$$v = -\frac{\Delta[\text{pereaksi}]}{\Delta t} = +\frac{\Delta[\text{produk}]}{\Delta t}$$

Satuannya $\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$ (ditulis M/s). Tanda minus dipasang karena konsentrasi pereaksi *turun*, padahal laju selalu bernilai positif.

Hati-hati dengan koefisien reaksi. Di pabrik pupuk, amonia dibuat lewat reaksi $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{NH}_3$. Setiap satu molekul N_2 yang habis disertai tiga molekul H_2 yang habis dan dua molekul NH_3 yang terbentuk. Jadi H_2 berkurang tiga kali lebih cepat daripada N_2 . Supaya "laju reaksi" hanya punya satu nilai, setiap laju dibagi dengan koefisiennya:

$$v = -\frac{\Delta[\text{N}_2]}{\Delta t} = -\frac{1}{3} \frac{\Delta[\text{H}_2]}{\Delta t} = +\frac{1}{2} \frac{\Delta[\text{NH}_3]}{\Delta t}$$

Konsentrasi tidak selalu mudah diukur langsung. Kimiawan memilih sifat yang ikut berubah selama reaksi:

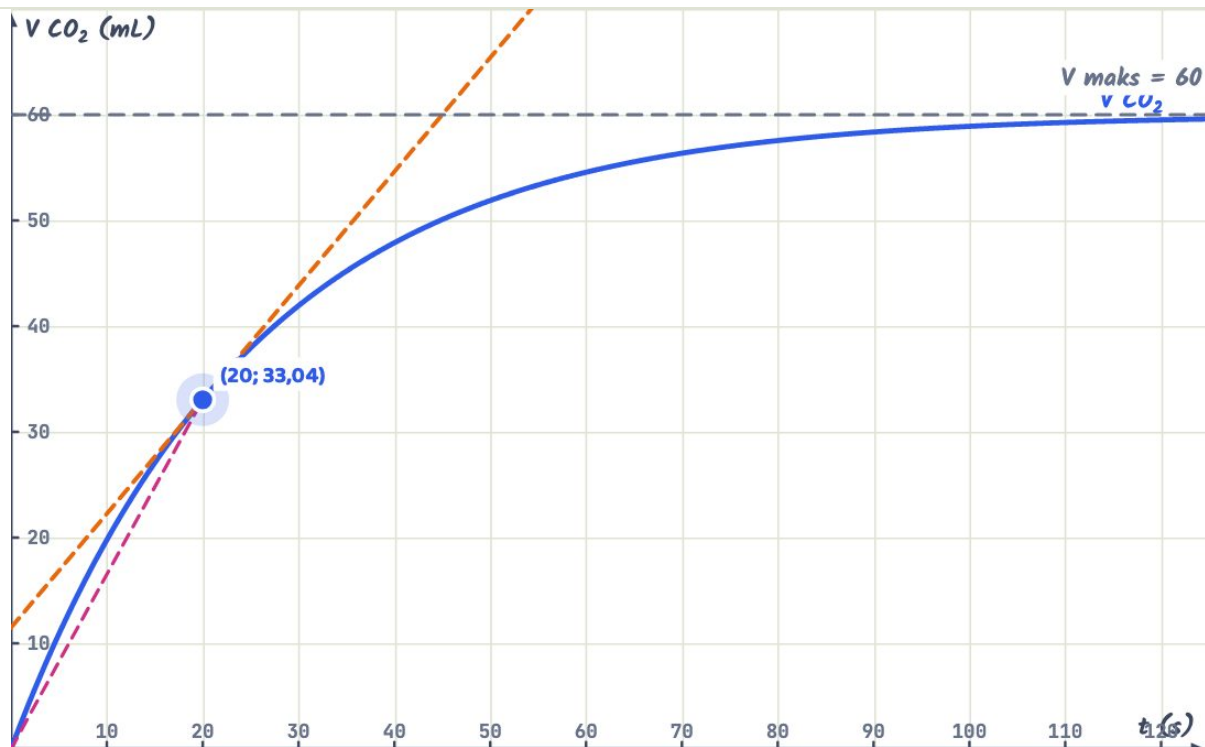
Yang diamati	Contoh reaksi	Alat
Volume gas bertambah	pualam + asam klorida: $\text{CaCO}_3 + 2 \text{HCl} \longrightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$	suntikan gas atau gelas ukur terbalik dalam air, stopwatch

Massa berkurang	reaksi yang sama: gas CO ₂ lepas ke udara	neraca digital, kapas di mulut labu
Warna berubah	larutan kalium permanganat yang ungu memudar	kolorimeter, bahkan sensor cahaya HP
Kekeruhan	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + 2\text{HCl} \longrightarrow 2\text{NaCl} + \text{S} \downarrow + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$: belerang membuat larutan keruh	"tanda X" di bawah gelas, dicatat waktu sampai X hilang
Daya hantar listrik / pH	reaksi yang menghabiskan atau menghasilkan ion	konduktometer, pH meter

Perhatikan grafik volume gas di bawah. Garisnya curam di awal lalu makin landai. Kemiringan garis antara dua titik memberi **laju rata-rata**. Kemiringan **garis singgung** di satu titik memberi **laju sesaat**, laju "detik itu juga", seperti angka di spidometer motor.

$$V(t) = V_{\text{maks}} (1 - e^{-kt})$$

$$t = 20 \text{ s} : V = 33,04 \text{ mL}, \quad v_{\text{semaat}} = 1,08 \text{ mL/s}$$



V(t)

33 mL

laju sesaat (garis singgung)

1,08 mL/s

laju rata-rata $0 \rightarrow t$ (garis putus ungu)

1,65 mL/s

Seret titik biru. Garis oranye (garis singgung) makin landai: laju sesaat terus turun karena pualam dan asamnya makin sedikit. Bandingkan dengan garis putus ungu (laju rata-rata dari awal): mana yang lebih besar di $t = 40 \text{ s}$?

**AWAS JEBAKAN**

Laju reaksi biasanya tidak tetap. Kebanyakan reaksi paling cepat di awal, lalu melambat karena pereaksinya makin sedikit. Jadi "laju rata-rata selama 2 menit" berbeda dengan "laju sesaat pada detik ke-10". Bacalah soal dengan teliti: yang diminta laju rata-rata, laju sesaat, atau laju awal?

CONTOH Menghitung laju rata-rata

Pualam direaksikan dengan asam klorida. Volume CO_2 yang terkumpul 0 mL saat $t = 0$ dan 48 mL saat $t = 40$ s. (a) Berapa laju rata-rata pembentukan CO_2 dalam mL/s? (b) Bila 1 mol gas bervolume 24 L pada suhu kamar, nyatakan laju itu dalam mol/s.

1 (a) $v = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{48 - 0}{40 - 0} = 1,2 \text{ mL/s}$.

2 (b) $1,2 \text{ mL} = 0,0012 \text{ L}$, jadi $v = \frac{0,0012 \text{ L/s}}{24 \text{ L/mol}} = 5,0 \times 10^{-5} \text{ mol/s}$.

Rata-rata terbentuk 1,2 mL CO_2 setiap detik, yaitu $5,0 \times 10^{-5} \text{ mol/s}$. Ingat: ini rata-rata. Di detik-detik awal lajunya lebih besar, menjelang akhir lebih kecil.



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1850, **Ludwig Wilhelmy** dari Jerman mengamati gula tebu (sukrosa) yang terurai menjadi glukosa dan fruktosa dalam larutan asam. Ia tidak menimbang apa pun. Ia memakai **polarimeter**: larutan gula memutar arah cahaya terpolarisasi, dan putaran itu berubah perlahan selama reaksi. Wilhelmy menemukan bahwa laju reaksi sebanding dengan jumlah gula yang tersisa. Itulah hukum laju pertama dalam sejarah kimia, dan ternyata sebuah reaksi orde satu (subbab 21.5).

21.2

Teori tumbukan dan energi aktivasi

Agar bereaksi, partikel harus **bertemu**. Molekul gas di udara bertumbukan miliaran kali setiap detik. Kalau setiap tumbukan menghasilkan reaksi, semua reaksi gas akan selesai dalam sekejap dan kayu di sekitar kita sudah lama terbakar habis. Kenyataannya, hanya sebagian sangat kecil tumbukan yang berhasil.

Bahasa sederhana • Tumbukan partikel mirip menendang bola ke gawang. Tendangan yang terlalu pelan tidak sampai. Tendangan yang keras tetapi arahnya salah juga meleset. Gol hanya terjadi kalau tendangannya cukup keras **dan** arahnya tepat. Partikel pun begitu: reaksi hanya terjadi pada tumbukan yang cukup kuat dan dari arah yang pas.



TEORI TUMBUKAN

Reaksi terjadi bila partikel pereaksi:

1. **bertumbukan**;
2. bertumbukan dengan energi **sama dengan atau lebih besar daripada energi aktivasi E_a** ;
3. bertumbukan dengan **arah (orientasi) yang tepat**.

Tumbukan yang memenuhi ketiganya disebut **tumbukan efektif**. Laju reaksi sebanding dengan banyaknya tumbukan efektif setiap detik.



DEFINISI • ENERGI AKTIVASI

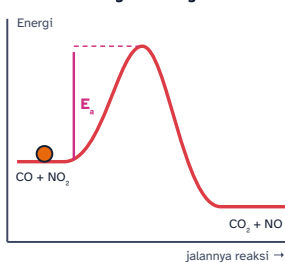
Energi aktivasi (E_a) adalah energi minimum yang harus dimiliki partikel yang bertumbukan agar reaksi terjadi. Di puncak "bukit energi", ikatan lama sedang putus dan ikatan baru sedang terbentuk. Susunan sesaat yang tidak stabil itu disebut **kompleks teraktivasi** (keadaan transisi).

Bayangkan Kak Tirta mendorong gerobak bakso melewati polisi tidur. Kalau dorongannya kurang kuat, gerobak naik sedikit lalu mundur lagi. Kalau cukup kuat, gerobak melewati puncak dan meluncur turun di sisi lain. Tinggi polisi tidur itulah energi aktivasi. Ikuti perjalanan satu tumbukan berikut.

Yang terjadi pada partikel



Diagram energi

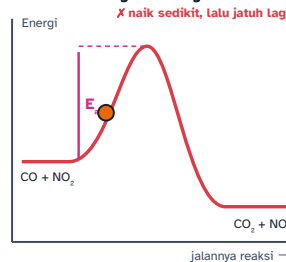


Langkah 1. Molekul CO dan NO₂ bergerak acak dan saling mendekat. Di diagram energi, bola oranye berada di tingkat energi pereaksi.

Yang terjadi pada partikel



Diagram energi

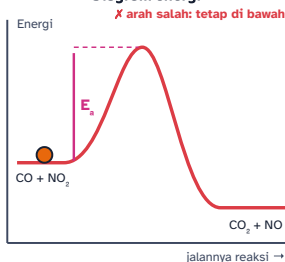


Langkah 2. Tumbukan pelan: energinya kurang dari E_a . Awan elektron kedua molekul saling tolak dan mereka memantul tanpa berubah. Bola naik sedikit di bukit lalu jatuh kembali.

Yang terjadi pada partikel



Diagram energi

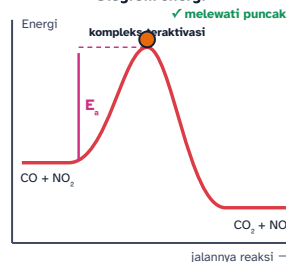


Langkah 3. Tumbukan keras tetapi arahnya salah: ujung O dari CO menabrak atom O dari NO₂. Ikatan baru C–O tidak mungkin terbentuk, jadi molekul memantul lagi.

Yang terjadi pada partikel



Diagram energi

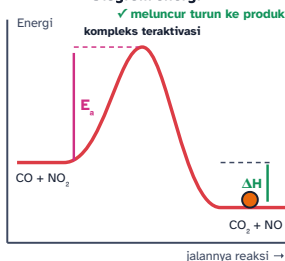


Langkah 4. Tumbukan efektif: energinya cukup dan atom C menghadap atom O. Di puncak bukit terbentuk **kompleks teraktivasi**: ikatan N–O sedang putus, ikatan C–O sedang terbentuk.

Yang terjadi pada partikel



Diagram energi



Langkah 5. Produk CO₂ dan NO terbentuk dan saling menjauh. Energi yang dilepas lebih besar daripada E_a yang "dipinjam", jadi reaksi ini eksoterm ($\Delta H < 0$). (Model satu tumbukan ini berlaku pada suhu tinggi; di 21.6 kamu akan melihat kejutannya pada suhu rendah.)



JAWABAN TEKA-TEKI BAB 20

Intan memang "ingin" menjadi grafit: ΔG° perubahannya sekitar $-2,9$ kJ/mol, jadi spontan. Tetapi setiap atom karbon intan terkunci oleh empat ikatan kovalen yang sangat kuat. Untuk menyusun ulang menjadi lapisan grafit, ikatan itu harus diputus dulu, sehingga energi aktivasinya luar biasa besar. Pada suhu kamar lajunya praktis nol. **Spontan tidak sama dengan cepat!** Termodinamika menjawab "ke mana", kinetika menjawab "secepat apa".

21.3 Empat kenop pengatur laju

Kalau laju bergantung pada banyaknya tumbukan efektif, cara mempercepat reaksi jelas: buat tumbukan lebih **sering**, atau buat lebih banyak tumbukan yang **cukup bertenaga**. Ada empat kenop utama.



JEMBATAN KELEDAI KIMO

Empat kenop laju: "**Kopi Luwak Selalu Kental**", yaitu **K**onsentrasi, **L**uas permukaan, **S**uhu, dan **K**atalis. Dua kenop pertama menambah *jumlah* tumbukan, suhu menambah jumlah *dan* tenaga tumbukan, katalis menurunkan "polisi tidur"-nya.

Kenop 1 • Konsentrasi (dan tekanan gas)

Makin pekat larutan, makin banyak partikel dalam setiap liter, sehingga makin sering mereka bertumbukan. Soda kue berbuih lebih hebat dalam cuka dapur asli daripada dalam cuka yang diencerkan. Untuk gas, menaikkan tekanan berarti memampatkan partikel ke ruang yang lebih kecil: konsentrasinya naik.

Kenop 2 • Luas permukaan

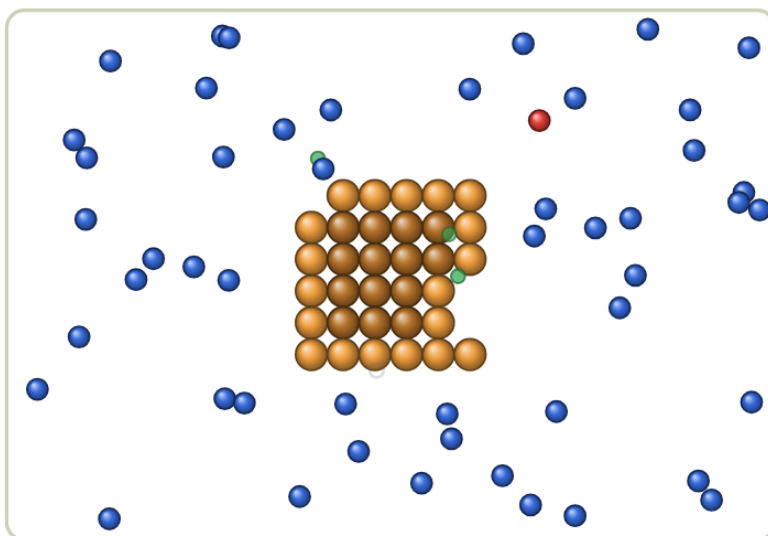
Pada padatan, hanya partikel di permukaan yang bisa ditabrak. Memotong atau menggerus padatan membuka permukaan baru. Serutan kayu lebih mudah menyala daripada balok kayu. Mengunyah makanan juga mempercepat kerja enzim pencernaan. Di pabrik tepung, debu tepung yang beterbangan bahkan bisa meledak bila tersulut, karena setiap butirnya sangat kecil dan dikelilingi oksigen.

Arena tumbukan

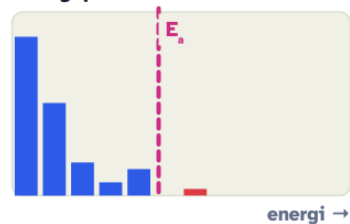
● $E < E_a$ ● $E \geq E_a$

● padatan B

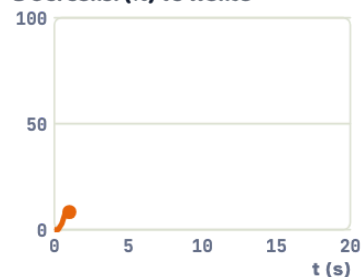
● produk



Energi partikel A



B bereaksi (%) vs waktu



Tumbukan per detik

8,5

Tumbukan efektif per detik

1,3

Bagian yang efektif

15 %

Atom B di permukaan

19

B sudah bereaksi

8 %

Waktu

1,2 s

Partikel **biru** energinya kurang dari E_a ; partikel **merah** cukup bertenaga. Atom padatan B (oranye) hanya bisa bereaksi bila ditabrak partikel merah. Coba: (1) bandingkan "1 bongkah" dengan "36 butir serbuk" pada suhu yang sama; (2) naikan suhu dari 300 K ke 400 K dan lihat histogram energi; (3) nyalakan katalis. Grafik kanan menyimpan percobaan sebelumnya (garis abu-abu) untuk dibandingkan. Ketuk satu partikel untuk melihat energinya. (Lab ini menyederhanakan: arah tumbukan dianggap selalu tepat.)

Kenop 3 • Suhu



Tebak Dulu!

Banyak reaksi menjadi kira-kira dua kali lebih cepat bila suhu naik dari 25 °C ke 35 °C. Apa penyebab utamanya?

Jumlah tumbukan per detik menjadi dua kali lipat.

Partikel memuai sehingga lebih mudah bertabrakan.

Jumlah tumbukan yang energinya $\geq E_a$ bertambah tajam, padahal jumlah tumbukan total hanya naik sekitar 2%.

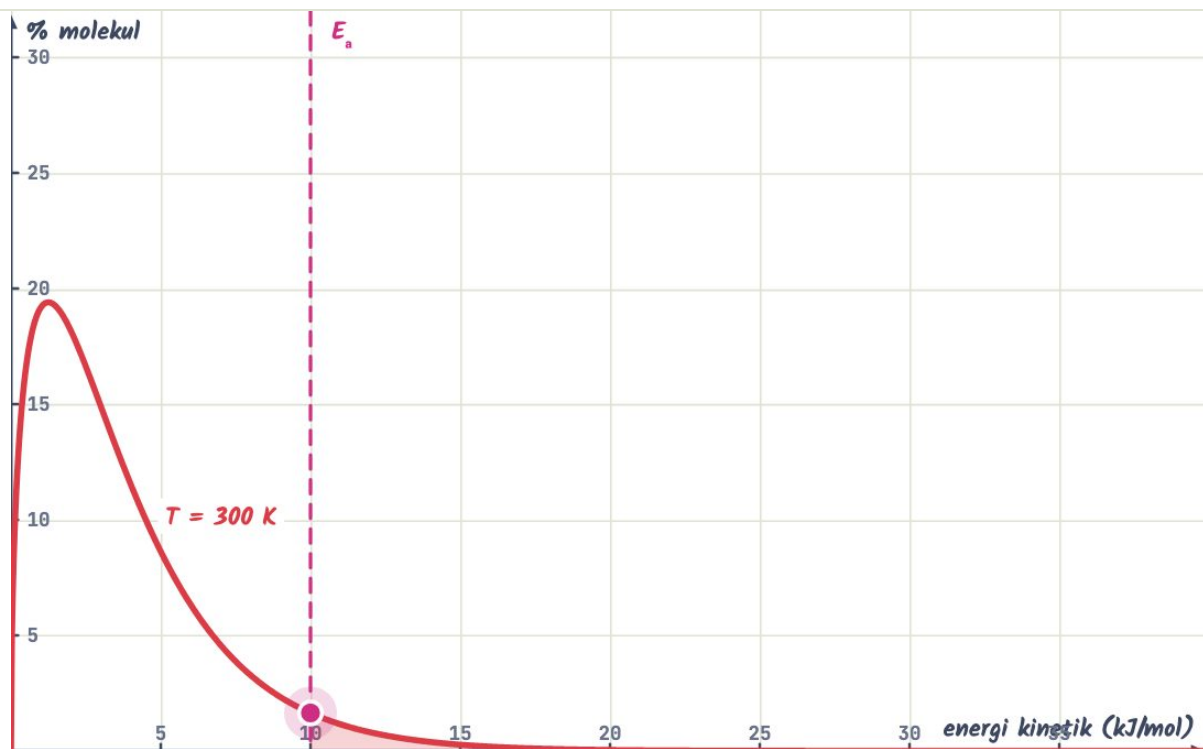
Energi aktivasi reaksi turun saat suhu naik.

Jawabannya: fraksi tumbukan bertenaga melonjak. Dari 298 K ke 308 K, kelajuan rata-rata partikel hanya naik sekitar $\sqrt{308/298} \approx 1,017$ kali, jadi tumbukan bertambah $\pm 2\%$ saja. Tetapi bagian partikel yang energinya melewati E_a bisa naik hampir dua kali lipat. Energi aktivasinya sendiri tidak berubah. Kurva di bawah ini memperlihatkankannya.

Partikel dalam suatu zat tidak bergerak sama cepat. Ada yang lambat, banyak yang sedang, dan sedikit yang sangat cepat. Sebaran energi itu digambarkan oleh **distribusi Maxwell-Boltzmann**. Luas di bawah kurva menyatakan seluruh partikel (100%). Hanya partikel di **kanan garis** E_a yang mampu bereaksi saat bertumbukan.

fraksi ($E \geq E_a$) = luas arsiran

$T = 300 \text{ K } (27^\circ \text{C}), \quad E_a = 10 \text{ kJ/mol}$



fraksi $E \geq E_a$ (luas arsiran merah)
4,563 %

fraksi $E \geq E_a$ dengan katalis
4,559 %

dibanding pada 300 K (tanpa katalis)
1 kali

Sumbu tegak menyatakan persen molekul per kJ/mol. Geser suhu: kurva memipih dan melebar, tetapi luas totalnya tetap 100%. Perhatikan arsiran merah di kanan E_a membengkak. Lalu naikan "penurunan E_a oleh katalis": kurvanya tidak berubah sama sekali, hanya garis batasnya yang mundur, dan arsiran hijau menambah molekul yang lolos. Supaya arsirannya terlihat, E_a di grafik ini dibuat kecil; E_a reaksi nyata umumnya 40–120 kJ/mol, sehingga fraksinya jauh lebih kecil lagi.

Jadi suhu menaikkan laju dengan dua cara: tumbukan sedikit lebih sering, dan, jauh lebih penting, **lebih banyak tumbukan yang energinya melewati E_a** . Itulah sebabnya panci presto memasak rendang lebih cepat (air di dalamnya mendidih pada $\pm 120^\circ \text{C}$) dan kulkas memperlambat pembusukan.

Di buku soal sering muncul aturan praktis: "setiap kenaikan 10°C , laju menjadi n kali". Aturan ini berguna untuk perkiraan cepat.

$$t_2 = \frac{t_1}{n^{(T_2 - T_1)/10}}$$

Setiap suhu naik 10 °C, laju menjadi n kali, sehingga waktu reaksinya menjadi $1/n$ kali.

t_1 Waktu reaksi awal s

n Faktor per 10 °C kali

T_1 Suhu awal °C

T_2 Suhu akhir °C

t_2 Waktu reaksi baru s

WAKTU REAKSI BARU

10

s

Dari 20 °C ke 50 °C laju menjadi 8 kali, sehingga waktu 80 s menjadi 10 s.

Satuan Nusantara: $\approx 17\%$ dari satu menit $\cdot \approx 33 \times$ kedipan mata

Cek satuan: s $\div$ (tanpa satuan) = s ✓

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



AWAS JEBAKAN

"Suhu naik 10 °C, laju pasti tepat dua kali" itu **keliru**. Aturan dua kali hanya kebetulan cocok untuk reaksi dengan E_a sekitar 50 kJ/mol di dekat suhu kamar. Reaksi dengan E_a besar jauh lebih peka terhadap suhu (bisa lima kali atau lebih), reaksi dengan E_a kecil hampir tidak peka. Pakai faktor n yang diberikan soal, dan hitung dengan persamaan Arrhenius (21.6) bila datanya ada.

CONTOH Telur rebus di dua suhu

Setiap kenaikan $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, laju suatu reaksi menjadi 2 kali. Pada $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ reaksi selesai dalam 120 detik. Berapa lama reaksi itu pada $60\text{ }^{\circ}\text{C}$?

- 1 Kenaikan suhu: $60 - 30 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, yaitu 3 kali "langkah $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ".
- 2 Laju menjadi $2^3 = 8$ kali lebih cepat.
- 3 Waktu menjadi $\frac{1}{8}$ kali: $120/8 = 15$ detik.

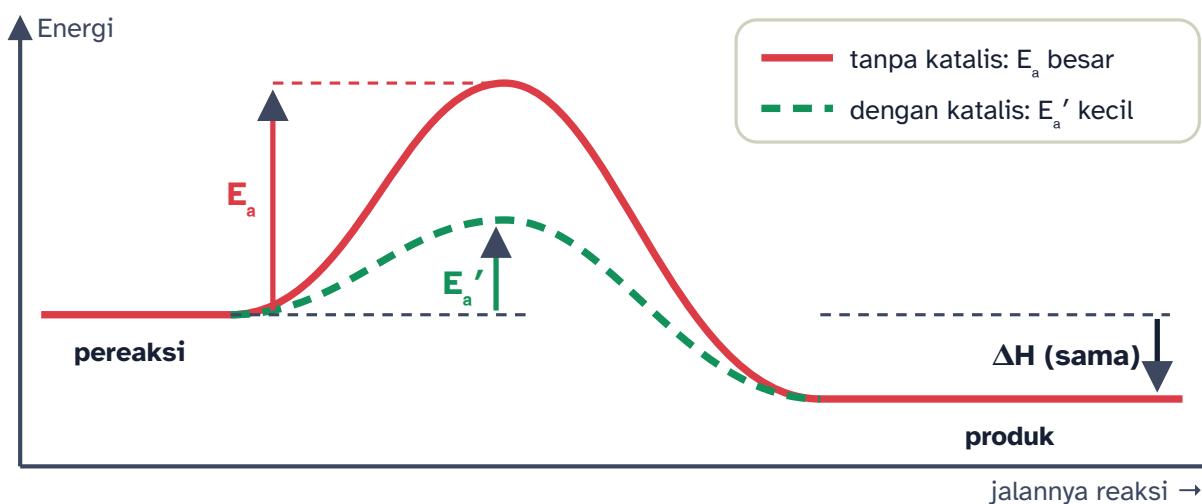
Reaksi selesai dalam 15 detik. Ingat: laju naik, waktu turun. Keduanya berbanding terbalik.

Kenop 4 • Katalis



DEFINISI • KATALIS

Katalis adalah zat yang mempercepat reaksi dengan menyediakan **jalur reaksi lain yang energi aktivasinya lebih rendah**. Katalis ikut bereaksi di tengah jalan, tetapi terbentuk kembali di akhir reaksi, sehingga jumlahnya tetap. Katalis yang sefase dengan pereaksi disebut **katalis homogen**; yang berbeda fase (biasanya padatan untuk pereaksi gas/cair) disebut **katalis heterogen**. Katalis biologis disebut **enzim**.



Katalis membuka "jalan pintas" di bawah bukit. Tingkat energi pereaksi dan produk tidak berubah, jadi ΔH tetap sama.

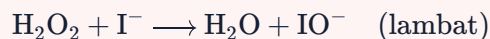
Contoh yang bisa kamu temui: enzim katalase dalam irisan kentang atau hati ayam menguraikan obat luka hidrogen peroksida menjadi air dan gas oksigen, $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$, sehingga muncul busa. Di knalpot mobil, **konverter katalitik** berlapis platina (**Pt**), paladium, dan rodium mengubah gas beracun CO dan NO

menjadi CO₂ dan N₂. Pabrik margarin mengubah minyak sawit cair menjadi lemak padat dengan gas hidrogen dan katalis serbuk nikel (**Ni**), logam yang banyak ditambang di Sulawesi.



AWAS JEBAKAN

"Katalis tidak ikut bereaksi sama sekali" itu keliru. Katalis **ikut bereaksi**, lalu **terbentuk kembali**. Contohnya ion iodida pada penguraian hidrogen peroksida:

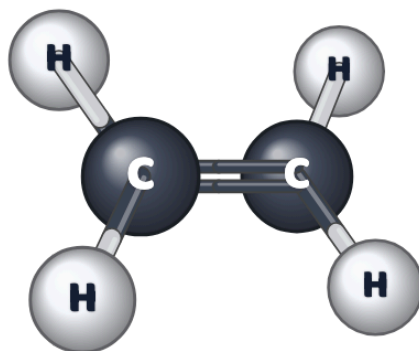


Ion I⁻ dipakai di tahap 1 dan kembali di tahap 2. Jumlahkan kedua tahap: hasilnya

$2 \text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$, tanpa I⁻. Katalis juga **tidak** mengubah ΔH dan tidak menambah jumlah produk akhir.

MOLEKUL 3D

Molekul pemeran bab laju reaksi



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Etena (etilena) C₂H₄ Mr ≈ 28,05 PubChem >

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

Etilena (C₂H₄) adalah hormon pematang buah. Asetilena (C₂H₂) dari karbit meniru kerjanya. Putar keduanya: mana yang datar, mana yang lurus? Ketuk tiga atom pada NO₂ untuk mengukur sudut O–N–O.



KIMIA NUSANTARA • MEMERAM PISANG

Buah yang matang menghasilkan gas **etilena**, hormon yang memicu enzim-enzim pematangan: pati diubah menjadi gula, klorofil hijau dirombak, dan buah melunak. Dalam karung atau lubang tertutup, etilena dari satu buah matang terkumpul (konsentrasinya naik), sehingga pisang lain ikut matang serentak. Petani di Jawa mengenal cara tradisional "pengemposan": pisang diperam dalam lubang yang diberi asap, dan asap pembakaran juga mengandung sedikit etilena. Pedagang yang memakai karbit (CaC_2) memanfaatkan reaksi $\text{CaC}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{Ca(OH)}_2$; asetilena yang terbentuk meniru etilena. Tetapi karbit teknis dapat mengandung pengotor senyawa arsenik dan fosfor, sehingga banyak negara melarang pemeraman dengan karbit. Cara yang lebih aman: memeram bersama buah yang sudah matang.



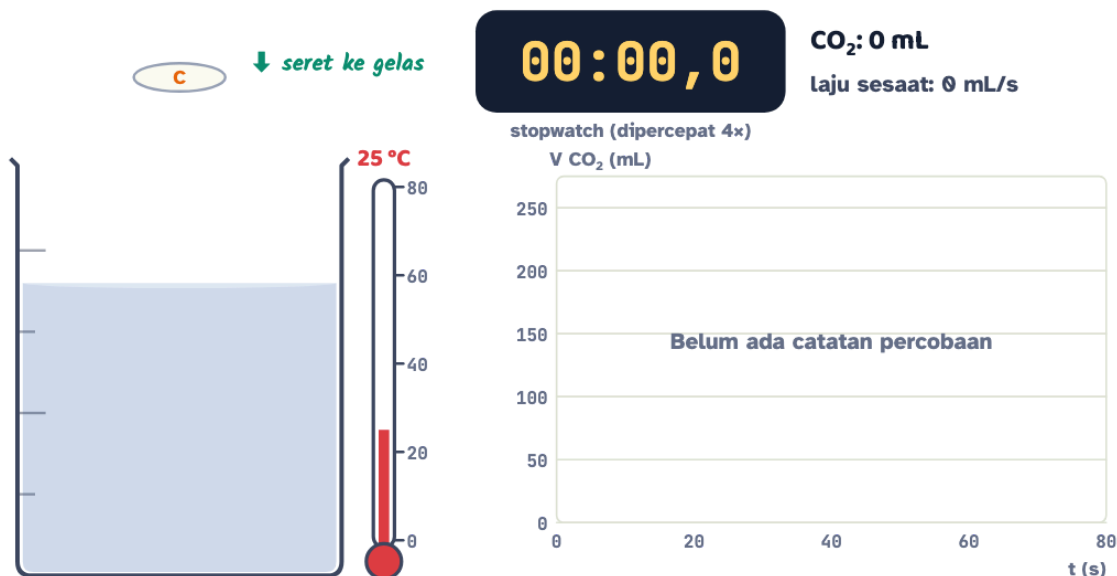
TAMU DARI MASA LALU

Pada 1835, kimiawan Swedia **Jöns Jacob Berzelius** memperhatikan banyak reaksi yang dipercepat oleh zat yang "tidak habis", misalnya pati yang diubah menjadi gula oleh asam. Ia menamai gejala itu *katalisis*, dari bahasa Yunani yang berarti "melepaskan". Kini katalis menjadi jantung industri kimia: sebagian besar proses kimia di pabrik (sekitar 80–90%) memakai katalis.

Sekarang uji semua kenop itu dengan percobaan yang bisa kamu ulangi di rumah.

LAB MINI Tablet Effervescent & Stopwatch

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21



Stopwatch

0 s

CO₂ terbentuk

0 mL

Laju rata-rata

0 mL/s

Sisa tablet

100 %

Keadaan

siap: seret tablet ke gelas

Seret tablet ke dalam gelas (atau tekan). Stopwatch berjalan sampai tablet habis, dan grafik mencatat volume CO₂. Coba: tablet utuh di air 25 °C, lalu air 5 °C, lalu air 50 °C; kemudian bandingkan bentuk utuh, dibelah 4, dan serbuk. Kurva mana yang paling curam di awal? Apakah volume akhirnya berbeda? (Model ini memakai $E_a \pm 40$ kJ/mol dan menganggap satu tablet melepas 250 mL CO₂; stopwatch dipercepat 4x.)

MITOS

"Reaksi yang lebih cepat menghasilkan produk lebih banyak."

MITOS

"Kulkas membunuh kuman di makanan."

FAKTA

Laju hanya menyatakan

kecepatan

. Jumlah produk ditentukan jumlah pereaksi (stoikiometri, Bab 18). Tablet serbuk dan tablet utuh menghasilkan gas yang sama banyak; serbuk hanya lebih cepat selesai.

FAKTA

Dingin hanya

memperlambat

reaksi pembusukan dan pertumbuhan mikroba. Begitu makanan keluar dari kulkas, prosesnya berlanjut. Yang membunuh kuman adalah memasak sampai matang.

MITOS

"Katalis menggeser hasil reaksi supaya produknya lebih banyak."

FAKTA

Katalis mempercepat reaksi maju **dan** reaksi balik sama besar. Hasil akhirnya tetap; yang berubah hanya waktu untuk mencapainya (Bab 22).

21.4 Persamaan laju dan orde reaksi

"Makin pekat makin cepat" masih terlalu kabur. Kimiawan ingin tahu *seberapa* cepat. Kalau konsentrasi dua kali lipat, apakah laju dua kali, empat kali, atau tidak berubah sama sekali? Jawabannya tertulis dalam persamaan laju.



DEFINISI • PERSAMAAN LAJU

Untuk reaksi $aA + bB \rightarrow \text{produk}$, **persamaan laju** (hukum laju) berbentuk

$$v = k [A]^m [B]^n$$

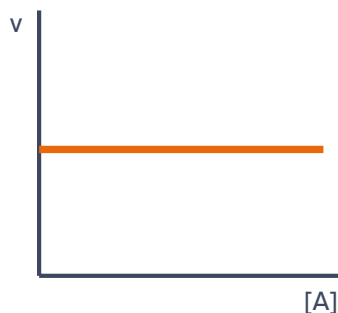
k adalah **tetapan laju**: nilainya bergantung pada suhu dan katalis, tetapi tidak pada konsentrasi. m dan n adalah **orde reaksi** terhadap A dan B; jumlahnya $m + n$ disebut orde total. Orde **ditentukan dari percobaan**.



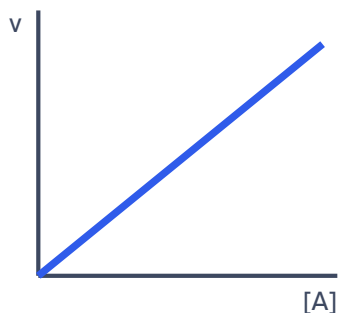
AWAS JEBAKAN

Orde reaksi **tidak** dibaca dari koefisien persamaan reaksi! Reaksi $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$ punya koefisien 1 dan 1, tetapi pada suhu rendah hukum lajunya $v = k[\text{NO}_2]^2$: orde 2 terhadap NO_2 dan orde 0 terhadap CO. Koefisien hanya sama dengan orde untuk satu tahap elementer (21.6).

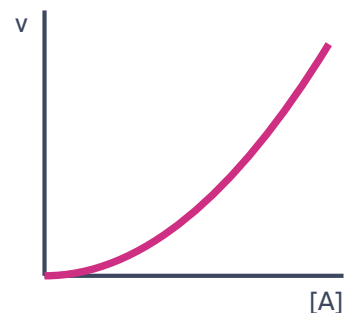
Orde 0



Orde 1



Orde 2



Bentuk grafik laju terhadap konsentrasi langsung membocorkan ordenya: datar (orde 0), garis lurus lewat titik nol (orde 1), atau parabola (orde 2).

$$v = k [A]^m [B]^n$$

Laju sama dengan tetapan laju dikali konsentrasi setiap pereaksi yang dipangkatkan ordonya.

k Tetapan laju $M^{1-(m+n)} s^{-1}$

$[A]$ Konsentrasi A M

$[B]$ Konsentrasi B M

m Orde terhadap A

n Orde terhadap B

v Laju reaksi M/s

LAJU REAKSI

0,004

M/s

orde total 3: satuan k = $M^{-2} s^{-1}$

Orde total = **3**. Jika [A] dilipatduakan, laju menjadi **4** kali; jika [B] dilipatduakan, laju menjadi **2** kali.

Cek satuan: $k \times M^{m+n}$ harus menjadi M/s, jadi satuan $k = M^{1-(m+n)} s^{-1}$

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

Orde total	Persamaan laju (contoh)	Satuan k	Bila semua konsentrasi $\times 2$
0	$v = k$	$M s^{-1}$	laju tetap
1	$v = k[A]$	s^{-1}	laju $\times 2$
2	$v = k[A]^2$ atau $k[A][B]$	$M^{-1} s^{-1}$	laju $\times 4$
3	$v = k[A]^2[B]$	$M^{-2} s^{-1}$	laju $\times 8$

Bagaimana orde ditemukan? Cara paling populer adalah **metode laju awal**. Beberapa percobaan dilakukan dengan konsentrasi awal berbeda, lalu laju di awal reaksi diukur (saat konsentrasi belum sempat berubah). Kuncinya: bandingkan dua percobaan yang hanya **satu** konsentrasinya berbeda.



TRIK KAK TIRTA

"Satu kenop diputar, yang lain dikunci." Cari dua baris tabel yang hanya berbeda pada satu zat. Lalu tulis: (perbandingan konsentrasi)^{orde} = perbandingan laju. Konsentrasi $\times 2$, laju $\times 4 \rightarrow 2^m = 4 \rightarrow m = 2$. Konsentrasi $\times 3$, laju $\times 3 \rightarrow m = 1$. Laju tidak berubah $\rightarrow m = 0$. Kalau angkanya tidak bulat, pakai $m = \frac{\log(\text{rasio laju})}{\log(\text{rasio konsentrasi})}$.

KERJAKAN BERSAMA

Metode laju awal: reaksi NO dan H₂

Untuk reaksi $2\text{NO}(g) + 2\text{H}_2(g) \rightarrow \text{N}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O}(g)$ pada suhu tetap diperoleh data berikut.

Tentukan persamaan laju, nilai k beserta satuannya, dan laju bila $[\text{NO}] = 0,30\text{ M}$ dan $[\text{H}_2] = 0,05\text{ M}$.

Percobaan	$[\text{NO}] \text{ (M)}$	$[\text{H}_2] \text{ (M)}$	Laju awal (M/s)
1	0,10	0,10	0,0030
2	0,20	0,10	0,012
3	0,10	0,20	0,0060

1 Orde NO (bandingkan 1 dan 2, $[\text{H}_2]$ tetap): $[\text{NO}] \times 2$, laju $0,012/0,0030 = 4$ kali. $2^m = 4 \rightarrow m = 2$.

2 Orde H₂ (bandingkan 1 dan 3, $[\text{NO}]$ tetap): $[\text{H}_2] \times 2$, laju $\times 2 \rightarrow n = 1$.

3 Persamaan laju: $v = k[\text{NO}]^2[\text{H}_2]$, orde total 3. Perhatikan: koefisien H₂ adalah 2, tetapi ordenya 1!

4 Dari percobaan 1: $k = \frac{0,0030}{(0,10)^2(0,10)} = 3,0\text{ M}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

5 Laju baru: $v = 3,0 \times (0,30)^2 \times 0,05 = 0,0135\text{ M/s}$.

$v = 3,0 [\text{NO}]^2[\text{H}_2]$ dengan $k = 3,0\text{ M}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Pada kondisi baru, laju = 0,0135 M/s.



ADU CEPAT

Tebak orde dari laju awal

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-21

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Cari m pada $x^m = y$. Contoh: konsentrasi $\times 2$, laju $\times 4 \rightarrow 2^m = 4 \rightarrow m = 2$. Laju $\times 1$ berarti orde 0.

21.5 Waktu paruh: jam pasir reaksi orde satu

Saat kamu minum obat penurun demam, obat itu masuk ke darah lalu perlahan diurai hati dan dibuang ginjal. Kecepatan pembuangannya sebanding dengan kadar obat yang ada: makin banyak obat, makin cepat dibuang. Itulah ciri **reaksi orde satu**.

Bahasa sederhana • Bayangkan sekantong permen yang setiap jamnya dibagi dua: separuh dimakan, separuh disimpan. Mula-mula 64 permen, sejam kemudian 32, lalu 16, lalu 8. Jumlah yang dimakan makin sedikit, tetapi selalu *separuh* dari sisanya. Obat di dalam darah dan zat radioaktif berkurang dengan cara yang sama.



ATURAN • REAKSI ORDE SATU

Bila $v = k[A]$, konsentrasi turun secara eksponensial:

$$[A]_t = [A]_0 e^{-kt} \quad \Longleftrightarrow \quad \ln[A]_t = \ln[A]_0 - kt$$

Waktu paruh ($t_{1/2}$) adalah waktu yang dibutuhkan sampai konsentrasi tinggal separuhnya. Untuk orde satu:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \approx \frac{0,693}{k}$$

Waktu paruh orde satu **tidak bergantung pada konsentrasi awal**: dari 100% ke 50% sama lamanya dengan dari 50% ke 25%.

$$[A]_t = [A]_0 e^{-k t}$$

Pada reaksi orde satu, dalam selang waktu yang sama selalu hilang persentase yang sama, bukan jumlah yang sama.

 $[A]_0$

Konsentrasi awal M

 k Tetapan laju s^{-1} t

Waktu s

 $[A]_t$

Konsentrasi tersisa M

KONSENTRASI TERSISA

0,2231

M

Setelah **30 s** tersisa **0,2231 M** (**22,313%** dari semula). Waktu paruhnya **13,863 s**, jadi sudah lewat **2,164** kali waktu paruh.

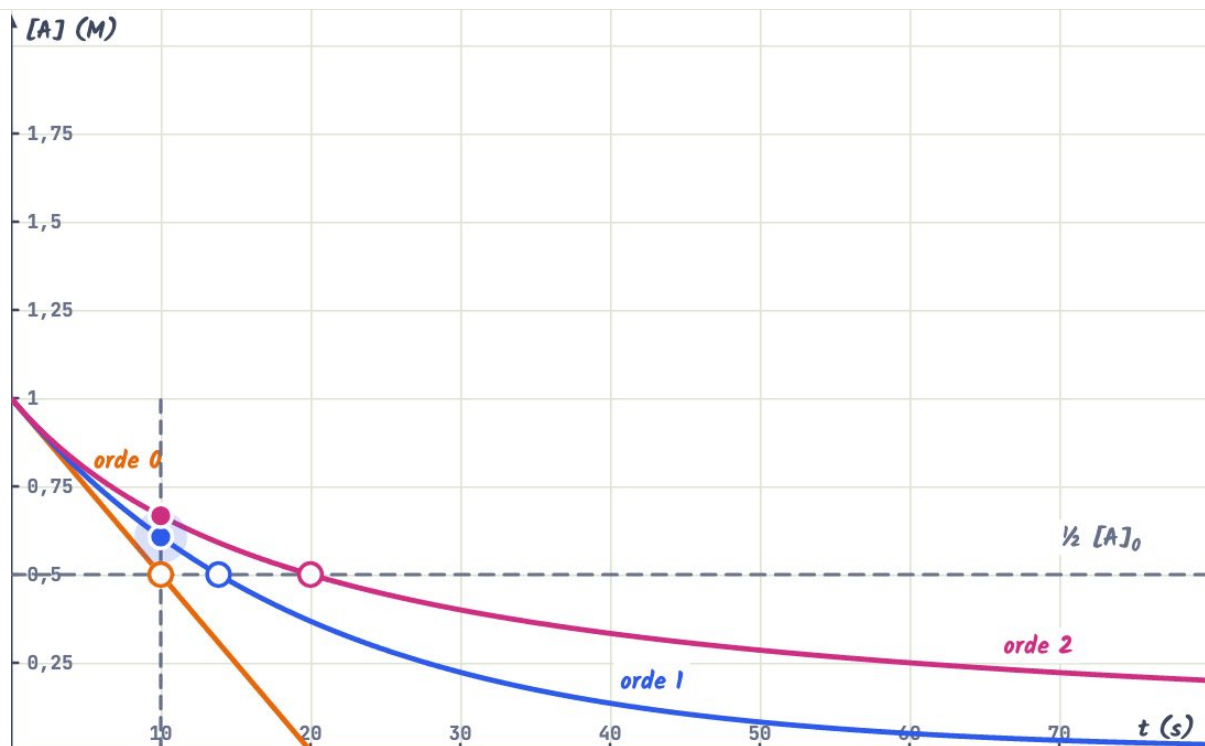
Cek satuan: $s^{-1} \times s = \text{tanpa satuan}$, jadi $[A]_t$ bersatuan M seperti $[A]_0$ ✓

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

Bandingkan tiga orde dalam satu grafik. Ketiga kurva di bawah dimulai dari konsentrasi yang sama dengan angka k yang sama.

orde 0: $[A] = [A]_0 - kt$ orde 1: $[A] = [A]_0 e^{-kt}$ orde 2 :

$t_{1/2}$: orde 0 = 10 s, orde 1 = 13,86 s, orde 2 = 20 s



[A] orde 0
0,5 M

[A] orde 1
0,607 M

[A] orde 2
0,667 M

$t_{1/2}$ orde 0 = $[A]_0/2k$
10 s

$t_{1/2}$ orde 1 = $\ln 2/k$
13,9 s

$t_{1/2}$ orde 2 = $1/(k[A]_0)$
20 s

Lingkaran berongga menandai waktu paruh tiap orde (saat kurva memotong garis $\frac{1}{2} [A]_0$). Geser $[A]_0$ naik-turun: lingkaran oranye bergeser ke kanan, magenta ke kiri, tetapi lingkaran biru (orde 1) diam di tempat! Angka k dibuat sama, tetapi satuannya berbeda: M/s untuk orde 0, s^{-1} untuk orde 1, $M^{-1} s^{-1}$ untuk orde 2.

$$C = C_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}}$$

Setiap lewat satu waktu paruh, kadar obat tinggal separuhnya.

C_0 Kadar awal mg/L

$t_{1/2}$ Waktu paruh obat jam

t Waktu sejak diminum jam

C Kadar tersisa mg/L

KADAR TERSISA

2

mg/L

Setelah **6 jam** (**3 kali waktu paruh**), kadar obat tinggal **2 mg/L**, yaitu **12,5%** dari kadar awal.

Cek satuan: jam ÷ jam = tanpa satuan (pangkatnya), jadi C bersatuan seperti C_0 ✓

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

COBA SENDIRI

Obat yang terus berkurang

Suatu obat dibuang tubuh menurut kinetika orde satu dengan waktu paruh 4 jam. Kadar awal dalam darah 20 mg/L. (a) Berapa kadarnya setelah 12 jam? (b) Berapa tetapan laju k ? (c) Kapan kadarnya turun menjadi 10% dari kadar awal?

1 (a) 12 jam = 3 kali waktu paruh: 20 → 10 → 5 → 2,5 mg/L.

2 (b) $k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{4 \text{ jam}} = 0,173 \text{ jam}^{-1}$.

3 (c) $\ln \frac{[A]_0}{[A]_t} = kt \rightarrow \ln 10 = 0,173 t \rightarrow t = \frac{2,303}{0,173} = 13,3 \text{ jam}$.

(a) 2,5 mg/L; (b) $k = 0,173 \text{ jam}^{-1}$; (c) sekitar 13,3 jam ($\pm 3,3$ kali waktu paruh). Inilah dasar dokter dan apoteker menentukan selang minum obat. Selalu ikuti aturan pakai dari mereka, jangan menghitung dosis sendiri.

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Hitung dulu berapa kali waktu paruh: $t \div t_{1/2}$. Sisa = $100\% \div 2$ pangkat banyaknya waktu paruh.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

HUKUM LAJU TERINTEGRASI DAN GRAFIK GARIS LURUS

Persamaan laju $-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^n$ dapat diintegrasikan. Untuk orde satu: $\int \frac{d[A]}{[A]} = -k \int dt$ memberi $\ln[A]_t - \ln[A]_0 = -kt$. Pada $t = t_{1/2}$, $[A]_t = \frac{1}{2}[A]_0$, sehingga $\ln \frac{1}{2} = -kt_{1/2}$ dan $t_{1/2} = \ln 2/k$.

Orde	Bentuk terintegrasi	Grafik yang lurus	Kemiringan	$t_{1/2}$
0	$[A] = [A]_0 - kt$	$[A]$ vs t	$-k$	$[A]_0/2k$
1	$\ln[A] = \ln[A]_0 - kt$	$\ln[A]$ vs t	$-k$	$\ln 2/k$
2	$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt$	$1/[A]$ vs t	$+k$	$1/(k[A]_0)$

Trik penentuan orde dari data konsentrasi-waktu: buat ketiga grafik itu. Grafik yang membentuk garis lurus menunjukkan ordenya, dan kemiringannya memberi k . Cara lain: lihat waktu paruh berturut-turut. Tetap $\rightarrow$ orde 1; memendek $\rightarrow$ orde 0; memanjang $\rightarrow$ orde 2. Peluruhan radioaktif (Bab 6 dan Bab 37) selalu orde satu, itulah sebabnya ia menjadi "jam" yang andal untuk menanggali fosil.

21.6 Lanjut: Arrhenius, mekanisme reaksi, dan enzim

Persamaan Arrhenius

Tetapan laju k berubah dengan suhu. Hubungannya dirumuskan oleh Svante Arrhenius:

$$k = A e^{-E_a/RT} \iff \ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}$$

Faktor $e^{-E_a/RT}$ kira-kira menyatakan fraksi tumbukan yang energinya cukup (arsiran merah pada kurva Maxwell-Boltzmann). Faktor A (faktor frekuensi) memuat seberapa sering partikel bertumbukan dan seberapa besar peluang arahnya tepat. $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, dan T wajib dalam kelvin. Dengan membandingkan dua suhu, A saling coret:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

RUMUS HIDUP Persamaan Arrhenius (dua suhu)

$$\frac{k_2}{k_1} = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]$$

Makin besar energi aktivasi, makin peka laju terhadap perubahan suhu.

E_a Energi aktivasi kJ/mol

T_1 Suhu awal K

T_2 Suhu baru K

k_2/k_1 Perbandingan laju k_2/k_1 kali

PERBANDINGAN LAJU k_2/k_1

1,926
kali

inilah asal aturan 'naik 10 °C, laju dua kali'

Dari **298 K** ke **308 K** (selisih **10 K**), laju menjadi **1,926 kali**.

Cek satuan: (J/mol) ÷ (J mol⁻¹ K⁻¹) × K⁻¹ = tanpa satuan ✓

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

Susu segar basi dalam ± 6 jam pada 30°C , tetapi bertahan ± 4 hari (96 jam) di kulkas bersuhu 4°C . Anggap "waktu basi" berbanding terbalik dengan laju reaksi pembusukan. Perkirakan energi aktivasinya.

1 Perbandingan laju: $\frac{k_{30}}{k_4} = \frac{96}{6} = 16$.

2 Ubah suhu ke kelvin: $T_1 = 277,15\text{ K}$ dan $T_2 = 303,15\text{ K}$.

3 $\ln 16 = \frac{E_a}{8,314} \left(\frac{1}{277,15} - \frac{1}{303,15} \right) \rightarrow 2,773 = \frac{E_a}{8,314} \times 3,095 \times 10^{-4}$.

4 $E_a = \frac{2,773 \times 8,314}{3,095 \times 10^{-4}} \approx 7,4 \times 10^4\text{ J/mol}$.

$E_a \approx 74\text{ kJ/mol}$. Karena E_a cukup besar, penurunan suhu 26°C saja sudah memperlambat pembusukan 16 kali. Itulah kehebatan kulkas.



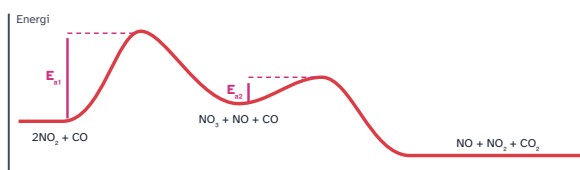
TAMU DARI MASA LALU

Pada 1889, kimiawan Swedia **Svante Arrhenius** mengusulkan bahwa hanya molekul "teraktivasi" yang bisa bereaksi, dan jumlahnya naik tajam dengan suhu. Ia melanjutkan gagasan Jacobus van 't Hoff. Arrhenius dikenal sebagai salah satu pendiri kimia fisika dan meraih Nobel Kimia 1903 (untuk teori ionisasi larutan). Ia juga termasuk orang pertama yang menghitung bahwa CO_2 dari pembakaran batu bara bisa menghangatkan Bumi.

Mekanisme reaksi dan tahap penentu laju

Banyak reaksi tidak terjadi dalam satu tumbukan, melainkan lewat beberapa **tahap elementer** berurutan. Rangkaian tahap itu disebut **mekanisme reaksi**. Zat yang terbentuk di satu tahap lalu habis di tahap berikutnya disebut **zat antara**. Untuk tahap elementer (dan hanya untuk tahap elementer), orde sama dengan koefisiennya. Tahap yang paling lambat menentukan laju keseluruhan: itulah **tahap penentu laju**.

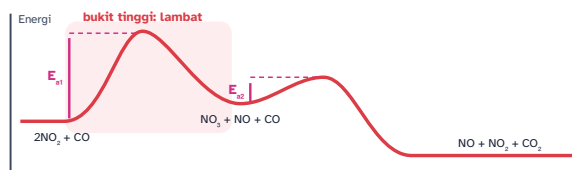
Mekanisme $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$ (di bawah $\pm 225^\circ\text{C}$)



Langkah 1. Reaksi total $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$. Di bawah $\pm 225^\circ\text{C}$, data laju awal memberi $v = k[\text{NO}_2]^2$. Aneh: CO sama sekali tidak muncul di hukum laju! Berarti reaksi ini tidak terjadi lewat satu tumbukan $\text{NO}_2\text{-CO}$.

Mekanisme $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$ (di bawah $\pm 225^\circ\text{C}$)

Tahap 1 (lambat): $\text{NO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{NO}$

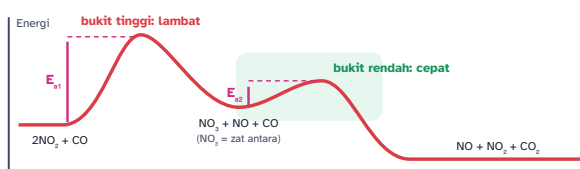


Langkah 2. Tahap 1 (lambat): dua molekul NO_2 bertumbukan dan satu atom O berpindah, $\text{NO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{NO}$. Bukitnya tinggi (E_{a1} besar), jadi hanya sedikit tumbukan yang berhasil.

Mekanisme $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$ (di bawah $\pm 225^\circ\text{C}$)

Tahap 1 (lambat): $\text{NO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{NO}$

Tahap 2 (cepat): $\text{NO}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{CO}_2$



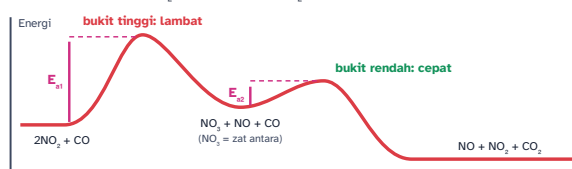
Langkah 3. Tahap 2 (cepat): NO_3 yang sangat reaktif langsung menyerahkan atom O kepada CO, $\text{NO}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{CO}_2$. Bukitnya rendah, jadi tahap ini kilat.

Mekanisme $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$ (di bawah $\pm 225^\circ\text{C}$)

Tahap 1 (lambat): $\text{NO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{NO}$

Tahap 2 (cepat): $\text{NO}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{CO}_2$

Total: $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2 \checkmark$



Langkah 4. Jumlahkan kedua tahap. NO_3 terbentuk lalu habis lagi: ia **zat antara**. Satu NO_2 juga muncul di kedua ruas sehingga saling coret. Hasilnya persis reaksi total.

Mekanisme $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$ (di bawah $\pm 225^\circ\text{C}$)

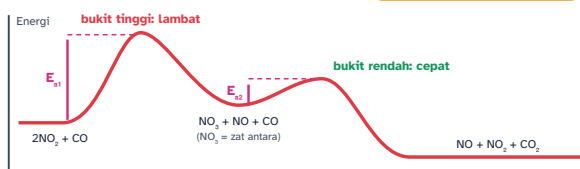
Tahap 1 (lambat): $\text{NO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{NO}$

Tahap 2 (cepat): $\text{NO}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{CO}_2$

Total: $\text{NO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2 \checkmark$

$$v = k_1[\text{NO}_2]^2$$

CO tidak ada di tahap lambat
→ orde 0 terhadap CO



Langkah 5. Laju keseluruhan mengikuti tahap paling lambat, yaitu **tahap penentu laju**: $v = k_1[\text{NO}_2]^2$. CO baru masuk di tahap cepat, maka ordenya nol. Mekanisme ini cocok dengan data percobaan!



TRIK KAK TIRTA

Bayangkan warung bakso dengan tiga pelayan gesit tetapi hanya satu peracik yang lambat. Secepat apa pun pelayan mengantar, mangkuk keluar sesuai kecepatan si peracik. Menambah pelayan (menaikkan $[\text{CO}]$) tidak menolong; yang menolong hanya mempercepat peracik. Saat memeriksa mekanisme, ingat tiga syarat: tahap-tahapnya harus **berjumlah** reaksi total, tahap lambatnya harus **memberi** hukum laju yang cocok dengan data, dan setiap tahap harus masuk akal secara kimia.



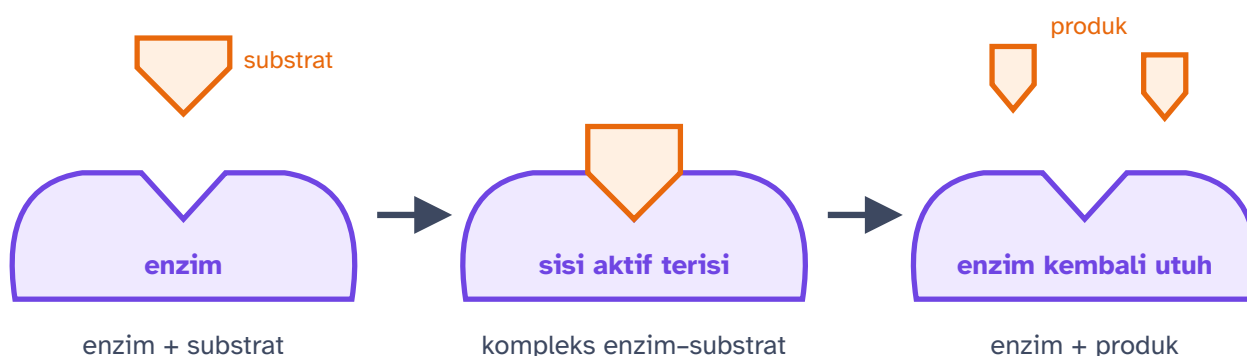
PLOT ARRHENIUS DAN TAHAP CEPAT YANG SETIMBANG

Plot Arrhenius. Karena $\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T}$, grafik $\ln k$ terhadap $1/T$ berupa garis lurus dengan kemiringan $-E_a/R$ dan titik potong sumbu tegak $\ln A$. Mengukur k pada lima suhu lalu menarik garis terbaik memberi E_a yang jauh lebih andal daripada dua titik saja.

Pra-kesetimbangan. Bila tahap lambat didahului tahap cepat yang setimbang, konsentrasi zat antara dinyatakan dengan tetapan kesetimbangannya. Contoh: $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$ dengan mekanisme $2\text{NO} \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_2$ (cepat, K) lalu $\text{N}_2\text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$ (lambat, k_2). Maka $v = k_2[\text{N}_2\text{O}_2][\text{O}_2]$ dan $[\text{N}_2\text{O}_2] = K[\text{NO}]^2$, sehingga $v = k_2K[\text{NO}]^2[\text{O}_2]$: orde 3, tanpa perlu tumbukan tiga molekul sekaligus. Pembentukan N_2O_2 bersifat eksoterm, sehingga K mengecil saat dipanaskan. Akibatnya laju reaksi ini justru sedikit *turun* bila suhu dinaikkan, salah satu kejutan langka dalam kinetika.

Enzim: katalis kehidupan

Sel tubuhmu menjalankan ribuan reaksi pada 37 °C tanpa api dan tanpa asam pekat. Rahasiannya adalah **enzim**, protein berbentuk rumit yang punya lekukan khusus, yaitu **sisi aktif**. Molekul pereaksi (substrat) masuk ke sisi aktif seperti anak kunci masuk ke gembok, lalu diubah menjadi produk dengan E_a yang jauh lebih rendah. Enzim katalase, misalnya, mempercepat penguraian hidrogen peroksida jutaan kali lipat.



Model "kunci dan gembok". Kini diketahui sisi aktif sedikit berubah bentuk untuk "memeluk" substratnya (model kecocokan terinduksi).

Karena enzim adalah protein, ia rapuh. Di atas suhu optimumnya (sekitar 37–40 °C untuk enzim manusia), bentuk sisi aktifnya rusak (**terdenaturasi**) sehingga laju justru anjlok. Itulah sebabnya demam yang terlalu tinggi berbahaya, dan mengapa merebus nanas menghilangkan kemampuannya melunakkan daging. Enzim juga peka pH: pepsin di lambung bekerja paling baik pada pH ±2, sedangkan enzim di usus pada pH ±8.



KIMIA NUSANTARA • DAPUR PENUH ENZIM

Tempe: kapang *Rhizopus* dari ragi tempe mengeluarkan enzim protease dan lipase yang memecah protein dan lemak kedelai menjadi potongan yang lebih mudah dicerna, sambil merajut kedelai dengan benang-benang putih dalam ± 36 jam pada suhu hangat. **Tapai:** ragi tapai mengubah pati singkong menjadi gula (enzim amilase), lalu sebagian gula menjadi alkohol, sehingga rasanya manis dan sedikit menyengat. **Daun pepaya:** nenek kita membungkus daging alot dengan daun pepaya karena getahnya mengandung enzim papain yang memotong protein daging. Semua resep ini diperam di tempat hangat, bukan di kulkas. Sekarang kamu tahu alasannya!



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1913, dokter dan biokimiawan Kanada **Maud Menten** bersama Leonor Michaelis di Berlin mengukur laju enzim invertase memecah sukrosa, reaksi yang sama dengan percobaan Wilhelmy di 21.1. Persamaan Michaelis–Menten mereka masih dipakai di setiap laboratorium biokimia dan farmasi untuk menggambarkan bagaimana laju enzim "jenuh" bila substratnya berlimpah.

Kimia di sekitarmu



Kulkas & freezer

Pada ± 4 °C reaksi pembusukan dan kerja mikroba melambat belasan kali; di freezer (-18 °C) hampir berhenti. Makanan awet tanpa pengawet.



Memeram buah

Etilena dari buah matang yang terkurung di karung menaikkan "konsentrasi pemicu", sehingga pisang, mangga, dan alpukat matang serentak.



Ikan asin

Garam dan sinar matahari menarik air dari daging ikan. Tanpa air bebas, bakteri dan enzim pengurai bekerja sangat lambat, jadi ikan tahan berbulan-bulan.



Konverter katalitik

Lapisan platina, paladium, dan rodium di knalpot mengubah CO, NO, dan sisa bensin menjadi CO₂, N₂, dan air dalam sepersekian detik.



Panci presto

Tekanan tinggi membuat air mendidih pada ± 120 °C. Reaksi pelunakan daging rendang atau iga berjalan beberapa kali lebih cepat.



Kembang api

Serbuk logam dan zat pengoksidasi digiling sangat halus dan dicampur rapat: luas permukaan raksasa membuat reaksinya selesai dalam sekejap.



Cek Cepat

Mengapa serbuk pualam bereaksi lebih cepat dengan asam klorida daripada bongkahan pualam bermassa sama?

Serbuk lebih ringan sehingga lebih lincah bergerak.

Luas permukaannya lebih besar sehingga tumbukan per detik lebih banyak.

Serbuk menurunkan energi aktivasi reaksi.

Serbuk menaikkan suhu larutan.

Suatu reaksi orde satu memiliki waktu paruh 10 menit. Berapa persen pereaksi yang tersisa setelah 30 menit?

50%

25%

12,5%

33%

Katalis mempercepat reaksi dengan cara ...

menyediakan jalur reaksi lain dengan energi aktivasi lebih rendah

menaikkan energi kinetik rata-rata partikel

mengubah ΔH reaksi menjadi lebih negatif

menambah jumlah pereaksi

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. C • 3. A



Tantangan Rumah: balapan tablet effervescent

Bahan: 4 tablet vitamin C effervescent yang sama jenisnya, 4 gelas bening, air es, air keran, air hangat ($\pm 45^\circ\text{C}$, bukan air mendidih), gelas takar, plastik klip dan sendok untuk menggerus, pisau dapur kecil, stopwatch HP, termometer dapur (bila ada).

1. Isi dua gelas dengan 150 mL air keran. Masukkan tablet utuh ke gelas pertama dan tablet yang sudah digerus halus (di dalam plastik klip, ditekan dengan sendok) ke gelas kedua. Catat waktu sampai gelembung berhenti.
2. Isi dua gelas lain dengan 150 mL air es dan 150 mL air hangat. Masukkan satu tablet utuh ke masing-masing dan catat waktunya. (Data tablet utuh di air keran dari langkah 1 menjadi pembanding suhu kamar.)
3. Jangan mengaduk. Hitung "laju relatif" $1/t$ untuk setiap gelas, lalu urutkan dari yang tercepat.

Keselamatan: minta orang dewasa menuangkan air hangat dan pastikan suhunya tidak lebih dari $\pm 50^\circ\text{C}$. Jangan menutup gelas atau botol saat tablet bereaksi, karena gas bisa membuat tutupnya terlontar. Jangan meminum larutan percobaan: kamu memakai beberapa tablet sekaligus sehingga dosis vitamin C dan natriumnya berlebihan. Hati-hati memakai pisau. Buang larutan ke wastafel dengan air mengalir dan lap tumpahan agar lantai tidak licin.

Pertanyaan: Gelas mana yang tercepat? Apakah gelembung total dari tablet serbuk lebih banyak daripada tablet utuh? Jelaskan hasilmu dengan teori tumbukan dan kurva Maxwell-Boltzmann.



RINGKASAN KILAT

Bab 21 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan arti **laju reaksi**, cara mengukurnya, serta membedakan laju rata-rata dan laju sesaat
- memakai **teori tumbukan**, **energi aktivasi**, dan kurva **Maxwell-Boltzmann** untuk menjelaskan pengaruh konsentrasi, luas permukaan, suhu, dan katalis
- menentukan **persamaan laju**, **orde reaksi**, dan satuan tetapan laju dari data laju awal
- menghitung **waktu paruh** reaksi orde satu, misalnya sisa obat dalam darah
- memakai **persamaan Arrhenius** dan menjelaskan **mekanisme reaksi**, tahap penentu laju, serta kerja **enzim**



Istilah kunci

Laju reaksi

laju rata-rata

laju sesaat

tumbukan efektif

Energi aktivasi

kompleks teraktivasi

distribusi Maxwell-Boltzmann

Katalis

katalis homogen

katalis heterogen

enzim

persamaan laju

tetapan laju

orde reaksi

metode laju awal

Waktu paruh



Rumus penting

$$t_2 = \frac{t_1}{n^{(T_2 - T_1)/10}}$$

Aturan kenaikan suhu (perkiraan cepat). Setiap suhu naik 10 °C, laju menjadi n kali, sehingga waktu reaksinya menjadi 1/n kali.

$$v = k [A]^m [B]^n$$

Persamaan laju. Laju sama dengan tetapan laju dikali konsentrasi setiap pereaksi yang dipangkatkan ordenya.

$$[A]_t = [A]_0 e^{-kt}$$

Peluruhan orde satu. Pada reaksi orde satu, dalam selang waktu yang sama selalu hilang persentase yang sama, bukan jumlah yang sama.

$$C = C_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Sisa obat dalam darah. Setiap lewat satu waktu paruh, kadar obat tinggal separuhnya.

$$\frac{k_2}{k_1} = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]$$

Persamaan Arrhenius (dua suhu). Makin besar energi aktivasi, makin peka laju terhadap perubahan suhu.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Laju reaksi biasanya tidak tetap.
- "Suhu naik 10 °C, laju pasti tepat dua kali" itu keliru.
- "Katalis tidak ikut bereaksi sama sekali" itu keliru.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=21

🧩 Teka-teki untuk Bab 22

Di dalam botol minuman bersoda yang tertutup rapat, molekul CO₂ terus-menerus keluar dari larutan menjadi gas dan masuk kembali dari gas ke larutan. Anehnya, tekanan di dalam botol tetap, dan jumlah gelembung tidak bertambah atau berkurang. Apakah reaksinya sudah berhenti?

▼ Intip petunjuk

Tidak berhenti! Laju CO₂ keluar dari larutan sama persis dengan laju CO₂ masuk kembali. Dua laju yang sama besar dan berlawanan arah membuat semuanya tampak diam. Keadaan "sibuk tetapi tampak tenang" ini disebut **kesetimbangan dinamis**, tema Bab 22. Kamu akan melihat bahwa katalis mempercepat kedua arah sama besar, sehingga tidak menggeser kesetimbangan.

22 Keseimbangan Kimia: Sibuk tetapi Tampak Diam

Sebotol minuman bersoda di kulkas tampak tenang. Padahal setiap detik miliaran molekul CO_2 lepas dari cairan dan larut kembali. Selamat datang di dunia reaksi yang tidak pernah benar-benar berhenti.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **reaksi reversibel** dan **keseimbangan dinamis** pada tingkat partikel;
- menuliskan ungkapan **K_c** dan **K_p** (termasuk keseimbangan heterogen) lalu menghitung nilainya;
- memakai **kuosien reaksi Q** untuk meramalkan arah reaksi;
- meramalkan pengaruh konsentrasi, tekanan, suhu, dan katalis dengan **asas Le Chatelier**;
- menjelaskan kondisi kompromi **proses Haber-Bosch** dan **proses kontak**, serta menghitung komposisi setimbang dengan **tabel ICE**.

MISTERI ESKALATOR

KOMIK · 4 PANEL

Sabtu sore, di sebuah mal di Surabaya

BIMA

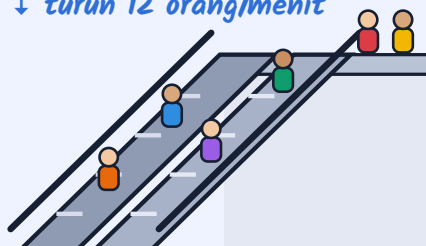
Laras, aku sudah menghitung orang di lantai atas: 30 orang. Lima menit kemudian... tetap 30! Pasti eskalatornya mati.

...28, 29, 30!

**LARAS**

Eskalatornya jalan, Bim. Aku catat: tiap menit 12 orang naik dan 12 orang turun. Yang masuk sama dengan yang keluar, jadi jumlahnya tetap.

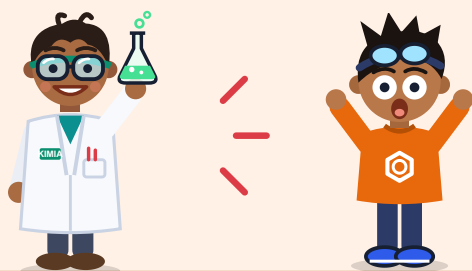
↑ naik 12 orang/menit
↓ turun 12 orang/menit



KAK TIRTA

Itulah *kesetimbangan dinamis*! Dari jauh tampak diam, dari dekat sibuk sekali. Banyak reaksi kimia juga begitu.

WAH!



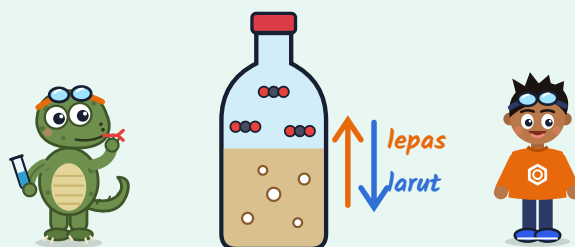
Kimo ikut nimbrung...

KIMO

Di botol minuman bersoda yang tertutup, CO_2 terus lepas dan larut lagi. Tekanannya tetap, tetapi molekulnya tak pernah istirahat!

BIMA

Jadi setimbang bukan berarti berhenti...



Tebak Dulu!

Sebotol minuman bersoda tertutup sudah semalaman di kulkas. Tekanan gas di atas cairannya tetap. Apa yang terjadi pada molekul CO_2 di dalam botol?

Tidak ada lagi CO_2 yang berpindah. Semuanya berhenti karena sudah setimbang.

Semua CO_2 sudah larut, jadi ruang di atas cairan kosong.

CO_2 terus lepas dari cairan dan terus larut kembali, dengan laju yang sama.

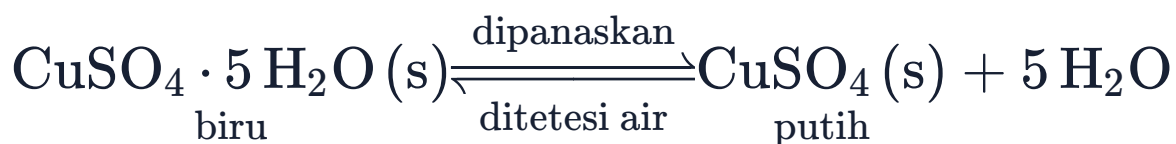
CO_2 hanya terus lepas dari cairan, tetapi sangat lambat.

Jawabannya: terus berpindah ke dua arah dengan laju yang sama. Tekanan tetap bukan karena molekul berhenti, tetapi karena jumlah yang lepas setiap detik sama dengan jumlah yang larut. Inilah *kesetimbangan dinamis*, persis seperti eskalator di komik.

22.1

Reaksi bolak-balik dan kesetimbangan dinamis

Banyak reaksi yang kamu kenal hanya berjalan satu arah. Kertas yang terbakar tidak bisa kembali menjadi kertas, dan telur matang tidak bisa mentah lagi. Namun banyak reaksi lain dapat berjalan **dua arah**. Contoh klasik ada di laboratorium sekolah: kristal terusi biru berubah menjadi serbuk putih bila dipanaskan, lalu kembali biru bila ditetesi air.



DEFINISI • REAKSI REVERSIBEL

Reaksi reversibel (reaksi bolak-balik) adalah reaksi yang dapat berlangsung ke dua arah: dari pereaksi menjadi produk (**reaksi maju**) dan dari produk kembali menjadi pereaksi (**reaksi balik**). Persamaannya ditulis dengan panah dua arah $\rightleftharpoons$.

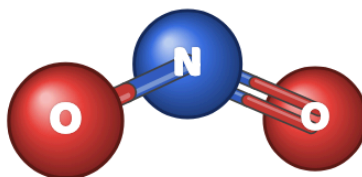
Bahasa sederhana • Bayangkan dua kelompok anak bermain lempar bola di lapangan yang dibatasi jaring. Kelompok kiri terus melempar bola ke kanan, kelompok kanan terus melempar ke kiri. Kalau kecepatan melempar keduanya sama, jumlah bola di setiap sisi tetap, padahal bola terus beterbangan. Kimiawan menyebut keadaan seperti ini **setimbang**.

Contoh yang warnanya bisa kamu lihat adalah gas nitrogen dioksida, NO_2 , yang berwarna coklat kemerahan. Dua molekul NO_2 dapat bergandengan menjadi dinitrogen tetroksida, N_2O_4 , yang tidak berwarna:



Masukkan NO_2 murni ke dalam tabung tertutup. Mula-mula warna coklatnya memudar karena sebagian NO_2 berubah menjadi N_2O_4 . Beberapa saat kemudian warnanya berhenti berubah. Apakah reaksinya selesai? **Tidak!** Molekul NO_2 masih terus bergandengan dan molekul N_2O_4 masih terus berpisah. Keduanya hanya berlangsung dengan laju yang sama.

MOLEKUL 3D Mengapa NO_2 suka berpasangan?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Nitrogen dioksida NO_2 Mr $\approx 46,01$

Gas cokelat kemerahan. Atom N menyimpan satu elektron tak berpasangan (radikal), sehingga NO_2 mudah bergandengan dengan NO_2 lain. Kedua ikatan N–O sebenarnya setara karena resonansi ($\pm 1,20 \text{ \AA}$); sudut O–N–O $\pm 134^\circ$.

Bandingkan NO_2 dan N_2O_4 . Ketuk kedua atom N pada N_2O_4 untuk mengukur panjang ikatan N–N, lalu bandingkan dengan ikatan N–O. Ikatan yang panjang biasanya lemah dan mudah putus. Amonia dan belerang trioksida adalah "bintang" subbab 22.5.

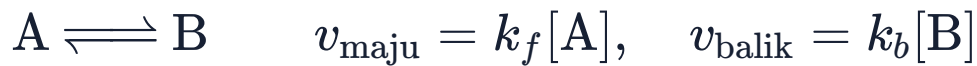
Mengapa laju kedua arah akhirnya sama? Pada awalnya hanya ada pereaksi, jadi reaksi maju berlangsung cepat dan reaksi balik belum terjadi. Semakin banyak produk terbentuk, pereaksi berkurang sehingga reaksi maju melambat, sedangkan produk bertambah sehingga reaksi balik makin cepat. Suatu saat keduanya bertemu di tengah: **laju maju = laju balik**.



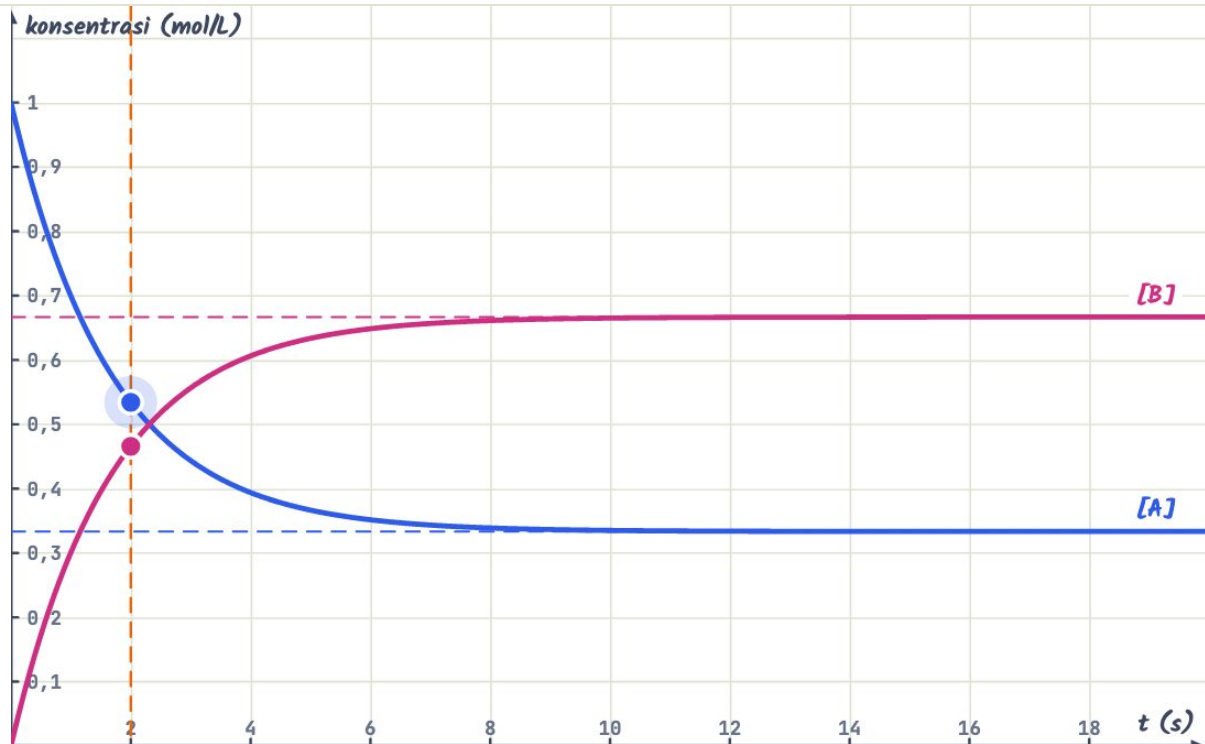
DEFINISI · KESETIMBANGAN DINAMIS

Keseimbangan dinamis adalah keadaan sistem tertutup ketika **laju reaksi maju sama dengan laju reaksi balik**. Konsentrasi setiap zat tidak berubah lagi (tetapi tidak harus sama), dan sifat yang teramati seperti warna, tekanan, dan massa jenis juga tetap, padahal kedua reaksi terus berlangsung di tingkat partikel.

- **Sistem tertutup:** tidak ada zat yang keluar atau masuk. Botol soda yang dibuka bukan sistem tertutup.
- **Dinamis:** reaksi tidak berhenti; partikel terus berubah ke dua arah.
- **Dapat dicapai dari dua arah:** mulai dari pereaksi saja atau dari produk saja, sistem tetap menuju keadaan setimbang yang sama (pada suhu yang sama).



$$t = 2 \text{ s} : [A] = 0,53, \quad [B] = 0,47 \text{ mol/L}$$



➡ **v maju > v balik: B masih bertambah**

v maju

0,214 mol/(L·s)

v balik

0,093 mol/(L·s) $K = k_f/k_b$ **2** $[B]/[A]$ setimbang**2**

Seret titik biru sepanjang waktu. Garis putus-putus menunjukkan konsentrasi setimbang. Perhatikan: $[A]$ dan $[B]$ berhenti berubah, tetapi **v maju** dan **v balik** tidak nol, melainkan sama besar. Coba buat $[A]$ awal = 0 dan $[B]$ awal = 1: apakah garis putus-putusnya sama? Bila k maju dua kali k balik, $[B]$ setimbang selalu dua kali $[A]$. Rasio itulah tetapan kesetimbangan.

**AWAS JEBAKAN**

"Setimbang" **tidak** berarti "sama banyak" dan **tidak** berarti "berhenti". Yang sama adalah **laju** reaksi maju dan balik. Konsentrasi pereaksi dan produk hanya *tetap*; nilainya bisa sangat berbeda, misalnya 1 : 2 seperti di grafik atau bahkan 1 : 1.000.000.



TAMU DARI MASA LALU

Kimiawan Prancis **Claude Louis Berthollet** ikut ekspedisi Napoleon ke Mesir (1798–1801). Di tepi danau-danau garam ia melihat endapan natrium karbonat. Ini aneh, sebab di laboratorium reaksinya justru berjalan sebaliknya:



Berthollet menyadari bahwa di danau itu garam dapur sangat berlimpah dan airnya terus menguap, sehingga reaksi "dipaksa" berjalan mundur. Kesimpulannya revolusioner: **arah reaksi bergantung pada jumlah zat**, dan reaksi bisa bolak-balik.

22.2

Tetapan kesetimbangan: Kc dan Kp



Tebak Dulu!

Hidrogen dan uap iodin bereaksi pada 430 °C: $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{HI}(\text{g})$. **Laras mencoba empat campuran awal yang berbeda. Apa yang sama pada keempat campuran setelah setimbang?**

Konsentrasi HI-nya selalu sama.

Konsentrasi H_2 , I_2 , dan HI menjadi sama besar.

Tidak ada yang sama karena campuran awalnya berbeda.

Nilai $[\text{HI}]^2/([\text{H}_2][\text{I}_2])$ selalu sekitar 54.

Jawabannya: hasil bagi konsentrasinya. Lihat tabel di bawah. Konsentrasi setimbang setiap percobaan berbeda-beda, tetapi satu kombinasi khusus selalu menghasilkan angka yang hampir sama. Angka ajaib itu disebut *tetapan kesetimbangan*.

Percobaan	$[\text{H}_2]$ awal	$[\text{I}_2]$ awal	$[\text{HI}]$ awal	$[\text{H}_2]$ setimbang	$[\text{I}_2]$ setimbang	$[\text{HI}]$ setimbang	$\frac{[\text{HI}]^2}{[\text{H}_2][\text{I}_2]}$
1	1,00	1,00	0	0,213	0,213	1,57	54,3
2	2,00	1,00	0	1,06	0,0612	1,88	54,5
3	0	0	1,00	0,107	0,107	0,787	54,1
4	0,500	0,500	0,500	0,160	0,160	1,18	54,4

Semua konsentrasi dalam mol/L, pada 430 °C. Percobaan 3 bahkan dimulai dari HI saja (dari arah balik), tetapi hasil baginya tetap ± 54 . Pola ini ditemukan pada 1864 oleh dua ilmuwan Norwegia, **Cato Guldberg** dan **Peter Waage**, dan disebut **hukum aksi massa**.



HUKUM AKSI MASSA

Untuk reaksi setara $a A + b B \rightleftharpoons c C + d D$ pada suhu tertentu:

$$K_c = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

dengan $[]$ = konsentrasi molar saat setimbang (mol/L). **Tetapan kesetimbangan** K_c hanya bergantung pada **suhu**, tidak bergantung pada jumlah zat awal.

Aturan menulis ungkapan K_c :

1. **Produk di atas** (pembilang), **pereaksi di bawah** (penyebut).
2. Setiap konsentrasi dipangkatkan dengan **koefisien** pada persamaan yang sudah setara.
3. Hanya zat berwujud **gas (g)** dan **larutan (aq)** yang ditulis. **Padatan (s)** dan **cairan murni (l)** tidak ditulis, karena "konsentrasinya" tetap berapa pun jumlahnya. Kesetimbangan yang melibatkan lebih dari satu wujud disebut **kesetimbangan heterogen**.



TRIK KAK TIRTA

"Padatan dan cairan murni tidak diundang ke pesta K_c ." Sepotong kapur sebesar kelereng dan sebesar batu bata sama-sama padatan murni: kerapatan partikelnya sama, jadi tidak mengubah apa pun. Dan ingat bentuk piala juara: **pemenangnya (produk) diangkat ke atas**.

CONTOH Menulis ungkapan K_c

Tuliskan ungkapan K_c untuk (a) $N_2(g) + 3 H_2(g) \rightleftharpoons 2 NH_3(g)$; (b) $CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$; (c) $2 SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2 SO_3(g)$.

1 (a) Produk NH_3 koefisien 2; pereaksi N_2 koefisien 1 dan H_2 koefisien 3: $K_c = \frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3}$.

2 (b) $CaCO_3$ dan CaO padatan, jadi tidak ditulis: $K_c = [CO_2]$. Di tanur kapur, tekanan CO_2 inilah yang menentukan apakah kapur terurai.

3 (c) $K_c = \frac{[SO_3]^2}{[SO_2]^2[O_2]}$.

(a) $\frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3}$ · (b) $[CO_2]$ · (c) $\frac{[SO_3]^2}{[SO_2]^2[O_2]}$. **Koefisien menjadi pangkat, padatan menghilang.**

$$K_c = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2][\text{H}_2]^3}$$

Konsentrasi produk dipangkatkan koefisiennya di atas, konsentrasi pereaksi dipangkatkan koefisiennya di bawah. Dengan konsentrasi setimbang hasilnya K_c; dengan konsentrasi sembarang hasilnya Q.

[N₂] Konsentrasi N₂ mol/L

[H₂] Konsentrasi H₂ mol/L

[NH₃] Konsentrasi NH₃ mol/L

K_c atau Q Hasil bagi (mol/L)⁻²

HASIL BAGI

0,0607

(mol/L)⁻²



Q ≈ K: campuran ini setimbang pada 500 °C

Hasil bagi = **0,0607**. Pada 500 °C, K_c reaksi ini ±0,060, jadi Q ÷ K = **1,011**.

Cek satuan: (mol/L)² ÷ [(mol/L)·(mol/L)³] = (mol/L)⁻² ✓

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

Besar kecilnya K memberi tahu kita seberapa jauh reaksi berjalan sebelum "puas":

Nilai K	Artinya	Contoh (25 °C)
sangat besar (> 10 ³)	hampir tuntas, campuran setimbang kaya produk	H ₂ + Cl ₂ ⇌ 2 HCl, K ≈ 10 ³³
sekitar 1	pereaksi dan produk sama-sama berarti jumlahnya	N ₂ O ₄ ⇌ 2 NO ₂ , K _c ≈ 4,6 × 10 ⁻³ (mendekati 1 bila dipanaskan)
sangat kecil (< 10 ⁻³)	hampir tidak bereaksi, campuran kaya pereaksi	N ₂ + O ₂ ⇌ 2 NO, K ≈ 10 ⁻³⁰ (untung, udara tidak berubah menjadi gas beracun!)

Untuk gas, kimiawan sering lebih mudah mengukur **tekanan** daripada konsentrasi. Tetapan yang memakai tekanan parsial disebut K_p . Contoh: $K_p = \frac{p_{\text{NH}_3}^2}{p_{\text{N}_2} p_{\text{H}_2}^3}$. Karena $p = \frac{n}{V} RT = [] RT$, kedua tetapan dihubungkan oleh:

$$K_p = K_c (RT)^{\Delta n} \quad \Delta n = (\text{mol gas produk}) - (\text{mol gas reaktan})$$

RUMUS HIDUP Kp dari Kc

$$K_p = K_c (RT)^{\Delta n}$$

Ubah 'bahasa konsentrasi' menjadi 'bahasa tekanan' dengan faktor RT yang dipangkatkan selisih mol gas.

K_c Tetapan Kc

T Suhu mutlak K

Δn Selisih mol gas mol

K_p Tetapan Kp atm pangkat Δn

TETAPAN KP

$$1,4897 \times 10^{-5}$$

atm pangkat Δn

$\Delta n < 0$: Kp lebih kecil daripada Kc ($RT > 1$)

$RT = 63,463$, sehingga $K_p = 1,4897 \times 10^{-5}$. Perbandingan $K_p \div K_c = 2,483 \times 10^{-4}$.

Cek satuan: $R = 0,0821 \text{ L}\cdot\text{atm}/(\text{mol}\cdot\text{K})$: tekanan dalam atm, konsentrasi dalam mol/L

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



AWAS JEBAKAN

Δn hanya menghitung mol **gas**. Untuk $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$, $\Delta n = 1 - 0 = +1$, bukan $2 - 1$. Pakai juga $R = 0,0821 \text{ L}\cdot\text{atm}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ dan suhu dalam kelvin, bukan $R = 8,314$.

Pada 500 °C, $K_c = 6,0 \times 10^{-2}$ untuk $\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3(\text{g})$. Hitung K_p (tekanan dalam atm).

1 Suhu mutlak: $T = 500 + 273 = 773 \text{ K}$.

2 $\Delta n = 2 - (1 + 3) = -2$.

3 $RT = 0,0821 \times 773 = 63,5$.

4 $K_p = 6,0 \times 10^{-2} \times (63,5)^{-2} = \frac{0,060}{4,03 \times 10^3} = 1,5 \times 10^{-5}$.

$K_p \approx 1,5 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-2}$. Nilainya kecil sekali: pada 500 °C dan tekanan rendah, campuran setimbang hanya berisi sedikit amonia. Itulah tantangan pabrik pupuk di subbab 22.5.

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$K_c = [\text{HI}]^2 \div ([\text{H}_2] \times [\text{I}_2])$. Jangan lupa: $[\text{HI}]$ dikuadratkan karena koefisiennya 2.



MENGAPA PADATAN "BERNILAI 1"? AKTIVITAS DAN K TANPA SATUAN

Dalam termodinamika, yang masuk ke K sebenarnya adalah **aktivitas** a , yaitu "konsentrasi efektif" dibagi keadaan standarnya: $a = [\] / (1 \text{ mol/L})$ untuk larutan dan $a = p / (1 \text{ bar})$ untuk gas. Padatan murni dan cairan murni berada *tepat* pada keadaan standarnya, sehingga $a = 1$ dan "menghilang" dari ungkapan K.

Karena aktivitas tidak bersatuan, K termodinamika juga **tanpa satuan**. Buku sekolah sering menuliskan satuan K_c seperti $(\text{mol/L})^{\Delta n}$ agar perhitungan terasa konsisten. Keduanya boleh, asalkan kamu tahu yang mana yang dipakai, terutama saat memasukkan K ke $\Delta G^\circ = -RT \ln K$ (subbab 22.6).

22.3

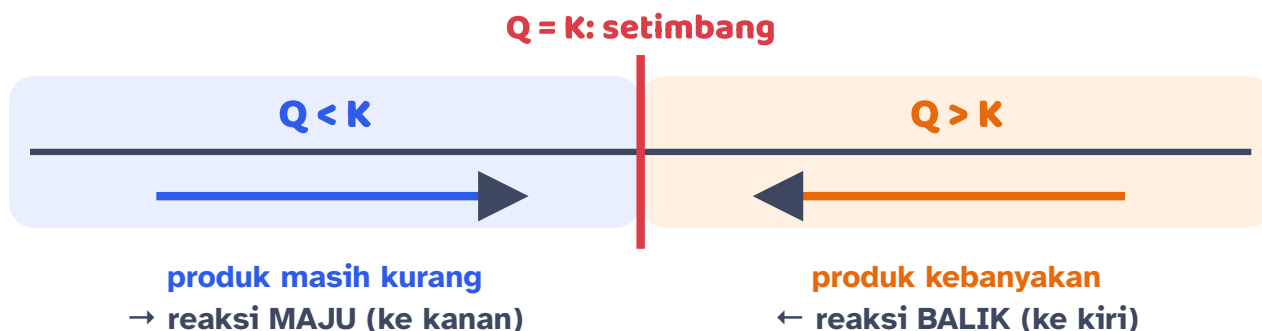
Kuosien reaksi Q: ke mana reaksi bergerak?

K hanya berlaku untuk keadaan setimbang. Bagaimana dengan campuran yang *belum* setimbang, misalnya sesaat setelah gas dimasukkan ke reaktor? Kita hitung angka yang bentuknya persis sama, tetapi memakai konsentrasi **saat itu**.



DEFINISI • KUOSIEN REAKSI

Kuosien reaksi Q adalah hasil bagi konsentrasi (atau tekanan parsial) dengan bentuk yang sama seperti ungkapan K , tetapi memakai nilai pada **sembarang saat**. Saat setimbang, $Q = K$.



Q selalu "berjalan" menuju K . Bila Q lebih kecil, reaksi maju menambah produk sampai Q naik menjadi K . Bila Q lebih besar, reaksi balik bekerja sampai Q turun menjadi K .



ATURAN • MEMBANDINGKAN Q DAN K

- $Q < K$: reaksi bergeser ke **kanan** (membentuk produk).
- $Q = K$: sistem **setimbang**, tidak ada perubahan bersih.
- $Q > K$: reaksi bergeser ke **kiri** (membentuk pereaksi).

KERJAKAN BERSAMA

Ke mana campuran ini bergerak?

Pada **430 °C**, $K_c = 54,3$ untuk $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{HI}(\text{g})$. Laras mencampur gas sehingga $[\text{H}_2] = 0,10$, $[\text{I}_2] = 0,20$, dan $[\text{HI}] = 1,50 \text{ mol/L}$. Apakah campuran ini setimbang? Jika tidak, ke mana reaksi bergeser?

- 1 Hitung Q dengan bentuk yang sama seperti K : $Q = \frac{(1,50)^2}{(0,10)(0,20)} = \frac{2,25}{0,020} = 112,5$.
- 2 Bandingkan: $Q = 112,5 > K = 54,3$.
- 3 Q terlalu besar, artinya produk (HI) kebanyakan. Sebagian HI harus terurai.

Belum setimbang. Reaksi bergeser ke kiri: HI terurai menjadi H_2 dan I_2 sampai Q turun menjadi 54,3.



JEMBATAN KELEDAI KIMO

" **Q kecil, ke Kanan; Q besar, ke Kiri.**" Bayangkan Q sebagai anak yang ingin mencapai K di garis bilangan: ia selalu berjalan menuju K , tidak pernah menjauh.

22.4 Asas Le Chatelier: sistem yang suka melawan

Apa yang terjadi bila kesetimbangan "diganggu", misalnya dengan menambah zat, memampatkan gas, atau memanaskan? Pada 1884 kimiawan Prancis **Henry Le Chatelier** merangkum jawabannya dalam satu kalimat yang sangat berguna.



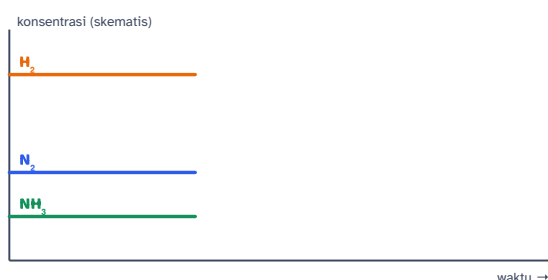
ASAS LE CHATELIER

Jika sistem yang setimbang diberi gangguan (perubahan konsentrasi, tekanan atau volume, atau suhu), sistem akan **bergeser untuk mengurangi pengaruh gangguan itu** sampai tercapai kesetimbangan baru.

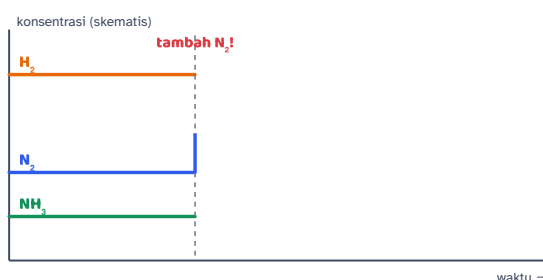
Bahasa sederhana • Kesetimbangan itu seperti jungkat-jungkit yang selalu ingin datar. Kalau ada anak yang naik di satu sisi, teman-teman di atas papan bergeser ke sisi lain supaya papan kembali datar. Sistem kimia juga "bergeser" melawan setiap gangguan.

Mengubah konsentrasi

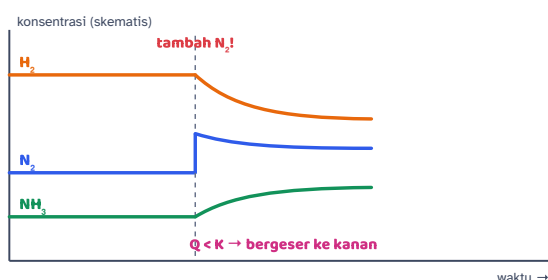
Menambah pereaksi membuat $Q < K$, jadi reaksi bergeser ke kanan dan memakai sebagian tambahan itu. Mengambil produk juga membuat $Q < K$, sehingga produk dibentuk lagi. Inilah trik pabrik amonia: amonia terus dicairkan dan dikeluarkan supaya reaksi terus berjalan ke kanan.



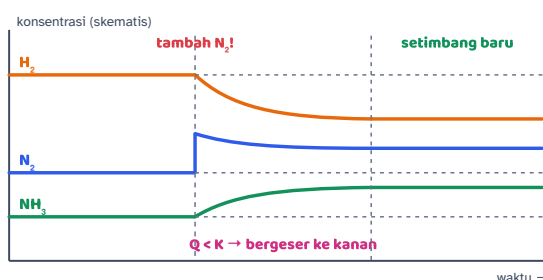
Langkah 1. Sistem $N_2 + 3 H_2 \rightleftharpoons 2 NH_3$ sudah setimbang: ketiga garis datar.



Langkah 2. Gangguan! N_2 ditambahkan tiba-tiba, jadi $[N_2]$ melonjak. Penyebut ungkapan Q membesar, sehingga $Q < K$.



Langkah 3. Sistem melawan: N_2 dan H_2 bereaksi, NH_3 bertambah. Perhatikan perbandingan perubahannya 1 : 3 : 2, sesuai koefisien.



Langkah 4. Setimbang baru ($Q = K$ lagi, nilai K tidak berubah). Garis putus-putus = tingkat semula: NH_3 lebih banyak, H_2 lebih sedikit, dan N_2 tetap lebih tinggi daripada semula karena gangguan hanya dikurangi, tidak dihapus.

Mengubah tekanan (volume)

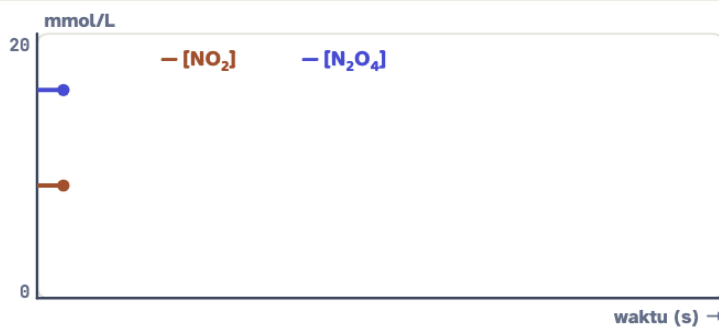
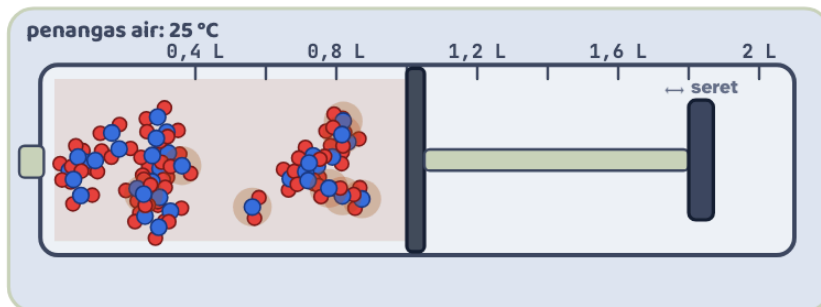
Memampatkan campuran gas (volume diperkecil) menaikkan tekanan. Sistem melawan dengan bergeser ke sisi yang **jumlah mol gasnya lebih sedikit**, karena lebih sedikit partikel berarti tekanan lebih kecil. Pada $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4$, 2 mol gas menjadi 1 mol, jadi pemampatan menggeser ke kanan. Bila jumlah mol gas di kedua sisi sama, seperti $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$, tekanan tidak menggeser kesetimbangan.

Mengubah suhu

Suhu adalah satu-satunya gangguan yang **mengubah nilai K**. Anggap kalor sebagai "zat" dalam persamaan. Untuk reaksi eksoterm, kalor adalah produk: $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4 + \text{kalor}$. Memanaskan berarti "menambah produk", jadi sistem bergeser ke kiri (ke arah endoterm) dan K mengecil. Mendinginkan menggeser ke kanan dan K membesar.

LAB MINI Suntikan NO_2 : tekan, panaskan, dinginkan!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22



Laju reaksi saat ini (mmol/L per s)

maju: $2\text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4$ 15,74

balik: $\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{NO}_2$ 15,74

Q dibanding K



$\rightleftharpoons$ setimbang (dinamis)

$[\text{NO}_2]$

0,0085 mol/L

$[\text{N}_2\text{O}_4]$

0,0157 mol/L

Q

217

Kc

217

Arah

setimbang $\rightleftharpoons$

Warna gas

cokelat muda

Coba: (1) tekan ❄️ **Rendam es**, lalu 🔥 **Air mendidih**. Warna gas berubah ke mana, dan bagaimana dengan nilai K? (2) Seret pegangan suntikan ke kiri atau geser slider volume: warna langsung lebih gelap, lalu sedikit memudar. Mengapa ada dua tahap? (3) Tambah NO_2 atau N_2O_4 , lalu perhatikan Q dibanding K dan batang laju maju/balik.

Gangguan	Sistem bergeser ke...	Nilai K
Menambah pereaksi / mengambil produk	kanan (produk)	tetap
Menambah produk / mengambil pereaksi	kiri (pereaksi)	tetap
Tekanan dinaikkan (volume diperkecil)	sisi dengan mol gas lebih sedikit	tetap
Tekanan diturunkan (volume diperbesar)	sisi dengan mol gas lebih banyak	tetap
Suhu dinaikkan	arah endoterm	berubah (turun untuk reaksi eksoterm)
Suhu diturunkan	arah eksoterm	berubah (naik untuk reaksi eksoterm)
Menambah katalis	tidak bergeser (setimbang lebih cepat tercapai)	tetap
Menambah gas mulia pada volume tetap	tidak bergeser (tekanan parsial tidak berubah)	tetap



Tebak Dulu!

Serbuk besi (katalis) ditambahkan ke campuran N_2 , H_2 , dan NH_3 yang sudah setimbang. Apa yang terjadi pada jumlah NH_3 ?

Bertambah, karena katalis mempercepat pembentukan NH_3 .

Tetap, karena katalis mempercepat reaksi maju dan reaksi balik sama kuatnya.

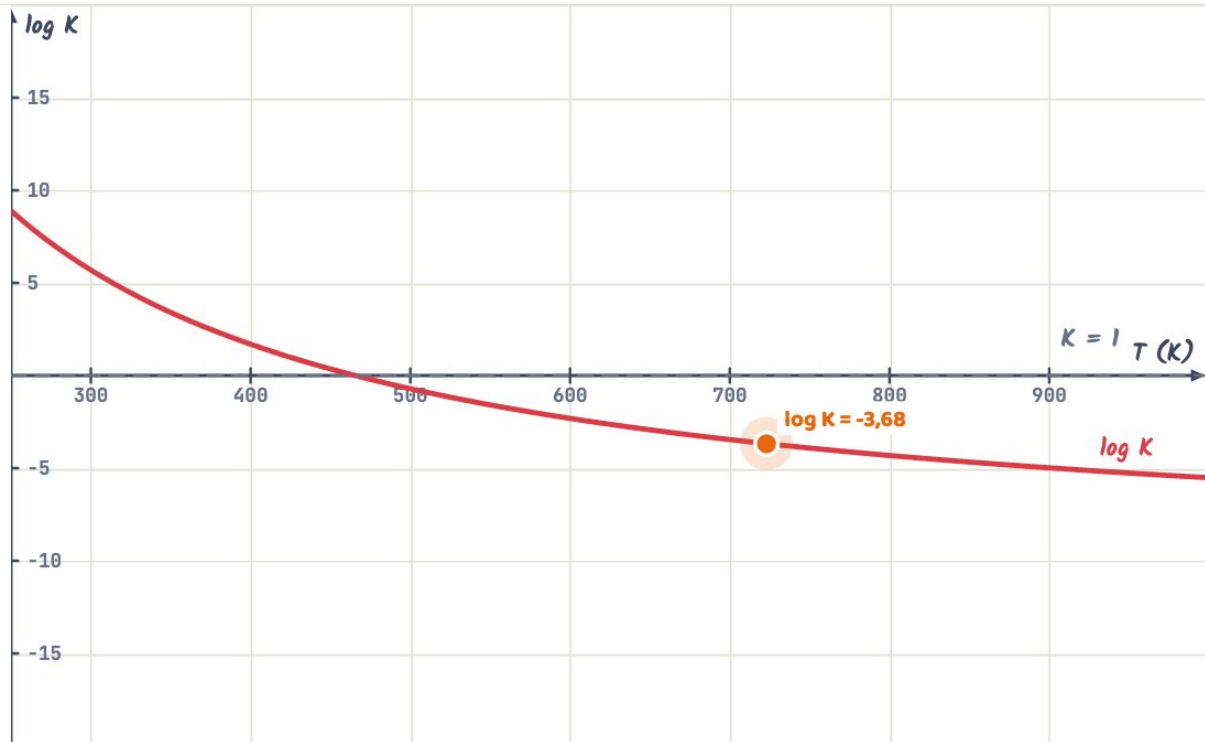
Berkurang, karena katalis ikut bereaksi dengan NH_3 .

Bertambah sedikit, lalu berkurang lagi.

Jawabannya: tetap. Katalis menurunkan energi aktivasi reaksi maju *dan* reaksi balik dengan besar yang sama. Keduanya dipercepat setara, jadi posisi kesetimbangan tidak bergeser. Gunanya katalis: kesetimbangan **lebih cepat tercapai**, dan di pabrik waktu adalah uang.

$$\log K_T = \log K_{298} - \frac{\Delta H^\circ}{2,303 R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right)$$

$$\Delta H^\circ = -92 \text{ kJ/mol}, T = 723 \text{ K} : K \approx 10^{-3,68}$$



🔥 **eksoterm: K turun bila suhu dinaikkan**

log K

-3,68

K

 $2,099 \times 10^{-4}$

Nilai awal mewakili sintesis amonia ($\Delta H^\circ = -92 \text{ kJ/mol}$, $K \approx 6 \times 10^5$ pada 25°C). Seret titik oranye ke suhu reaktor ($\pm 723 \text{ K}$): K anjlok jutaan kali! Lalu ubah ΔH° menjadi positif (misalnya $+181 \text{ kJ/mol}$ untuk $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{NO}$ dengan $\log K \approx -30$): K naik pesat di suhu tinggi. Itulah sebabnya NO terbentuk di mesin kendaraan dan petir. (Perkiraan: ΔH° dianggap tetap.)



TRIK KAK TIRTA

Pikirkan sistem setimbang sebagai anak yang **selalu membantah**. Ditambah zat? Ia memakainya. Diambil zatnya? Ia membuatnya lagi. Ditekan? Ia mengecilkan jumlah mol gas. Dipanaskan? Ia "menyerap" kalor dengan bergeser ke arah endoterm. Diberi katalis? Ia hanya bekerja lebih cepat, tanpa berubah pendapat.



AWAS JEBAKAN

Hanya **suhu** yang mengubah nilai K. Menambah zat atau mengubah tekanan menggeser *posisi* kesetimbangan (perbandingan jumlah zat), tetapi K tetap. Katalis tidak menggeser apa pun dan tidak mengubah K. Gas mulia yang ditambahkan pada volume tetap juga tidak menggeser, karena tekanan parsial zat-zat yang bereaksi tidak berubah.

MITOS

"Saat setimbang, reaksi sudah berhenti."

MITOS

"Saat setimbang, jumlah pereaksi sama dengan jumlah produk."

FAKTA

Reaksi maju dan balik terus berlangsung dengan laju yang sama. Percobaan dengan isotop berat (misalnya deuterium) membuktikan atom terus berpindah dari pereaksi ke produk dan sebaliknya.

FAKTA

Yang sama adalah **lajunya**. Perbandingan konsentrasi ditentukan oleh K, yang bisa 10^{33} atau 10^{-30} .

MITOS

"Katalis menambah jumlah produk."

MITOS

"Memanaskan selalu menambah produk."

FAKTA

Katalis hanya mempercepat tercapainya kesetimbangan. Jumlah produk saat setimbang tetap sama, dengan atau tanpa katalis.

FAKTA

Bergantung pada ΔH . Untuk reaksi eksoterm seperti sintesis amonia, pemanasan justru **mengurangi** produk saat setimbang, walaupun reaksinya menjadi lebih cepat.

22.5 Kesetimbangan di pabrik: Haber–Bosch dan proses kontak

Udara mengandung 78% nitrogen, tetapi tanaman tidak bisa memakai gas N_2 secara langsung karena ikatan rangkap tiganya sangat kuat. Tanaman butuh nitrogen dalam bentuk "terikat", misalnya amonia atau urea. Mengubah nitrogen udara menjadi amonia adalah salah satu reaksi terpenting dalam sejarah manusia:

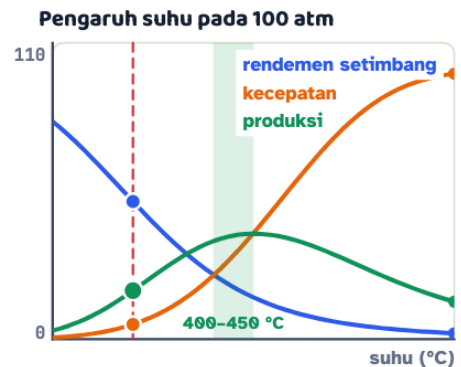
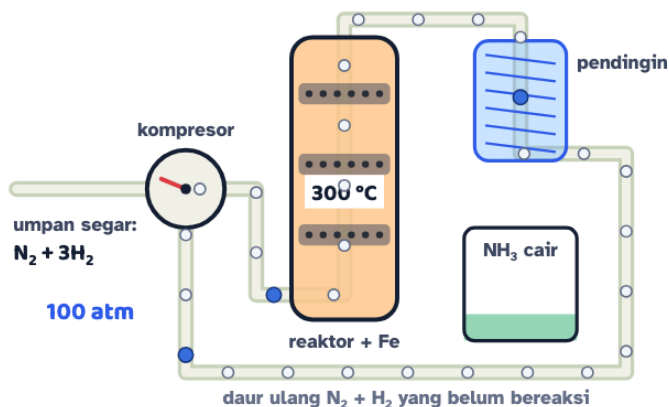


Bahan bakunya: **N** dari udara (udara dicairkan lalu didistilasi bertingkat, atau oksigennya dibakar habis) dan **H** dari gas alam yang direaksikan dengan uap air. Masalahnya, kesetimbangan ini "rewel". Mari kita baca dengan

- **Suhu.** Reaksi maju eksoterm, jadi suhu *rendah* memberi rendemen amonia tinggi. Namun pada suhu rendah reaksinya sangat lambat. Kompromi: **±400–450 °C**.
- **Tekanan.** 4 mol gas menjadi 2 mol gas, jadi tekanan *tinggi* menggeser ke kanan dan juga mempercepat reaksi. Namun pipa dan kompresor bertekanan tinggi sangat mahal dan berisiko. Kompromi: **±150–250 atm**.
- **Katalis.** **Besi** (dengan sedikit kalium oksida dan aluminium oksida sebagai promotor) mempercepat tercapainya kesetimbangan tanpa menggesernya.
- **Mengambil produk.** Gas keluaran reaktor didinginkan sehingga amonia mencair dan terpisah. Gas N₂ dan H₂ yang belum bereaksi didaur ulang ke reaktor. Sekali lewat hanya ±15% yang bereaksi, tetapi dengan daur ulang hampir semuanya akhirnya menjadi amonia.

LAB MINI Pabrik Haber: temukan kompromi industri

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-22



NH₃ saat setimbang

51,1 %

Kecepatan reaksi

6 %

(menuju setimbang per lintasan)

Produksi amonia

271 t/hari

Untung (indeks)

+4

Kak Tirta: Rendemen setimbang tinggi, tetapi reaksinya selambat siput. Pabrik terlalu lama menunggu.

Rekor untungmu: 4 pada 300 °C dan 100 atm

NH₃ saat setimbang

51,1 %

Hasil per lintasan

2,8 %

Produksi

271 ton/hari

Untung (indeks)

4

Status

terlalu lambat

Misi: jadilah manajer pabrik pupuk! Atur suhu, tekanan, dan katalis untuk mendapat **untung terbesar**. Suhu rendah memberi rendemen tinggi tetapi lambat; tekanan tinggi menambah rendemen tetapi mahal. Matikan katalis besi: apa yang terjadi pada produksi? Bandingkan temuanmu dengan kondisi pabrik sungguhan (±450 °C, ±200 atm). Grafik di kanan menunjukkan rendemen setimbang (biru), kecepatan mencapai setimbang (oranye), dan produksi amonia (hijau) terhadap suhu pada tekanan yang kamu pilih.



KIMIA NUSANTARA • PUPUK DARI UDARA DAN GAS ALAM

Pabrik pupuk di **Bontang** (Kalimantan Timur), **Gresik** (Jawa Timur), dan **Palembang** (Sumatra Selatan) menjalankan proses Haber-Bosch siang dan malam. Pabrik urea pertama di Indonesia mulai memproduksi di Palembang pada awal 1960-an, dekat sumber gas alam. Gas alam (metana) diubah menjadi hidrogen: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$, lalu $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Hebatnya, CO_2 "sisa" ini tidak dibuang, melainkan direaksikan dengan amonia menjadi urea: $2 \text{NH}_3 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$. Karung pupuk di sawah dekat rumahmu kemungkinan berisi nitrogen yang beberapa minggu sebelumnya masih melayang di udara!



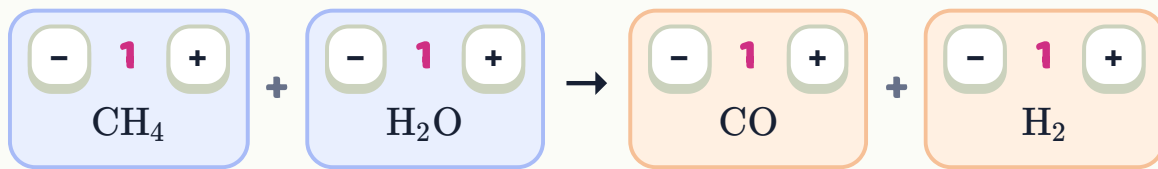
TAMU DARI MASA LALU

Pada 1909, **Fritz Haber** berhasil membuat amonia dari udara di laboratorium, tetes demi tetes. **Carl Bosch** kemudian memecahkan masalah raksasa untuk membesarkannya: baja yang tahan hidrogen bertekanan tinggi dan katalis besi yang murah. Pabrik pertamanya beroperasi pada 1913. Haber menerima Nobel Kimia 1918, Bosch pada 1931. Proses ini dijuluki "roti dari udara": diperkirakan sekitar separuh atom nitrogen di tubuh manusia hari ini pernah melewati pabrik Haber-Bosch. Namun Haber juga memimpin program senjata gas klorin pada Perang Dunia I, sisi kelam yang mengingatkan bahwa ilmu pengetahuan membutuhkan hati nurani.

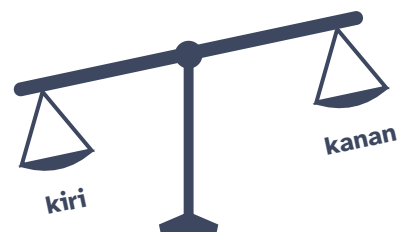


PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi pabrik pupuk dan asam sulfat



Unsur	Kiri	Kanan	
C	1 ●	1 ●	✓
H	6 ○○○○○○	2 ○○	✗
O	1 ●	1 ●	✓



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

Petunjuk

Ulang

Persamaan berikutnya ►

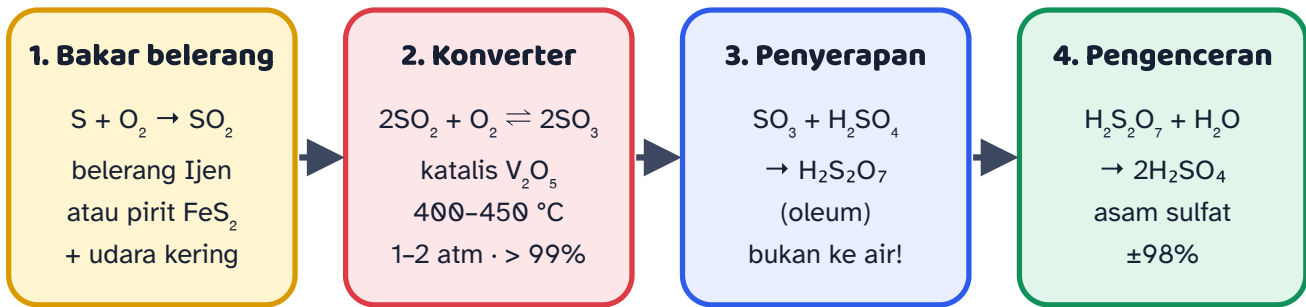
Persamaan 1 dari 6 null

Mulai dari pabrik pupuk (gas alam → hidrogen → amonia → urea), lalu pindah ke pabrik asam sulfat. Reaksi pirit, FeS_2 , adalah tantangan bonus: bijih pirit dipanggang untuk menghasilkan SO_2 bila belerang murni sulit didapat.

Asam sulfat adalah bahan kimia industri yang paling banyak dibuat di dunia: untuk pupuk fosfat dan amonium sulfat (ZA), aki kendaraan, deterjen, hingga pengolahan bijih nikel laterit di beberapa smelter di Sulawesi dan Maluku Utara. Pembuatannya disebut **proses kontak**, dan jantungnya juga sebuah kesetimbangan:



Proses kontak: dari belerang menjadi asam sulfat



Proses kontak memakai katalis **vanadium(V) oksida**, V₂O₅. Belerang dari Kawah Ijen, yang ditambang dan dipikul para penambang, adalah salah satu bahan bakunya.

Mengapa proses kontak cukup memakai tekanan **1–2 atm**, padahal 3 mol gas menjadi 2 mol gas? Karena pada 400–450 °C dengan katalis, konversinya sudah sangat tinggi; dengan beberapa lapis katalis dan penyerapan SO₃ di antaranya, konversi melebihi 99%. Tekanan tinggi tidak sebanding dengan biayanya. Lalu, mengapa SO₃ tidak langsung dilarutkan ke air? Reaksinya sangat eksoterm sehingga terbentuk kabut tetesan asam yang sulit ditangkap. Karena itu SO₃ diserap oleh asam sulfat pekat menjadi oleum, baru kemudian diencerkan.



KESELAMATAN

Amonia dan asam sulfat pekat adalah bahan industri yang wajib dihormati. Amonia disimpan sebagai gas cair bertekanan, berbau sangat menyengat, korosif, dan beracun bagi ikan. Asam sulfat pekat merusak kulit dan mata serta melepaskan banyak kalor bila bercampur air. Di laboratorium sekolah, keduanya hanya ditangani guru dengan kacamata pelindung, sarung tangan, dan lemari asam.



Gas bertekanan



Korosif



Toksik akut



Bahaya lingkungan

22.6 Tabel ICE dan alat tempur lanjutan

Bagaimana menghitung konsentrasi setimbang bila yang diketahui hanya jumlah awal dan K? Kimiawan memakai tabel tiga baris yang disebut **tabel ICE**: **I**nitial (awal), **C**hange (perubahan), **E**quilibrium (setimbang). Perubahan selalu mengikuti perbandingan koefisien.



Baris	[H ₂]	[I ₂]	[HI]
I • awal			
C • berubah			
E • setimbang			

Langkah 1. Tulis persamaan yang sudah setara, nilai K, dan siapkan tabel dengan satu kolom untuk setiap zat yang masuk ke ungkapan K.



Baris	[H ₂]	[I ₂]	[HI]
I • awal	1,00	1,00	0
C • berubah			
E • setimbang			

Langkah 2. I (awal): 1,00 mol H₂ dan 1,00 mol I₂ dimasukkan ke wadah 1,00 L, jadi konsentrasi awalnya 1,00 mol/L. HI belum ada.



Baris	[H ₂]	[I ₂]	[HI]
I • awal	1,00	1,00	0
C • berubah	- x	- x	+ 2x
E • setimbang			

Langkah 3. C (perubahan): bila x mol/L H₂ bereaksi, I₂ juga berkurang x, dan HI bertambah 2x (perbandingan koefisien 1 : 1 : 2). Q = 0 < K, jadi reaksi berjalan ke kanan.



Baris	[H ₂]	[I ₂]	[HI]
I • awal	1,00	1,00	0
C • berubah	- x	- x	+ 2x
E • setimbang	1,00 - x	1,00 - x	2x

Langkah 4. E (setimbang) = I + C. Sekarang semua konsentrasi dinyatakan dengan satu huruf x.



Baris	[H ₂]	[I ₂]	[HI]
I • awal	1,00	1,00	0
C • berubah	- x	- x	+ 2x
E • setimbang	1,00 - x	1,00 - x	2x

$$K_c = (2x)^2 \div (1,00 - x)^2 = 54,3$$

$$\text{akar kedua ruas: } 2x \div (1,00 - x) = 7,37 \rightarrow x = 0,787$$

Langkah 5. Masukkan baris E ke ungkapan K_c. Kebetulan kedua ruas kuadrat sempurna, jadi cukup diakarkan: $\frac{2x}{1,00-x} = 7,37$, sehingga x = 0,787.



Baris	[H ₂]	[I ₂]	[HI]
I • awal	1,00	1,00	0
C • berubah	- x	- x	+ 2x
E • setimbang	0,213	0,213	1,57

$$K_c = (2x)^2 \div (1,00 - x)^2 = 54,3$$

$$\text{akar kedua ruas: } 2x \div (1,00 - x) = 7,37 \rightarrow x = 0,787$$

$$[\text{H}_2] = [\text{I}_2] = 0,213 \text{ M} \cdot [\text{HI}] = 1,57 \text{ M}$$

Langkah 6. Hitung semua konsentrasi setimbang. Cek: $1,57^2 \div 0,213^2 \approx 54$ ✓. Hasil ini sama dengan percobaan 1 di tabel subbab 22.2.

$$K_c = \frac{(2x)^2}{(a-x)(b-x)} \Rightarrow [HI] = 2x$$

Masukkan konsentrasi awal H_2 dan I_2 serta K_c . Mesin menyelesaikan persamaan kuadrat dalam x (H_2 yang bereaksi) sehingga hasil baginya tepat sama dengan K_c .

a $[H_2]$ awal mol/L

b $[I_2]$ awal mol/L

K_c Tetapan K_c

[HI] $[HI]$ setimbang mol/L

[HI] SETIMBANG

1,573

mol/L

$x = 0,787$ mol/L. Saat setimbang: $[H_2] = 0,213$, $[I_2] = 0,213$, $[HI] = 1,573$ mol/L. Persentase H_2 yang bereaksi: **78,653%**.

Cek satuan: $\Delta n = 0$, jadi K_c tidak bersatuan dan volume wadah tidak memengaruhi hasil ✓

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

Sebanyak 0,100 mol N_2O_4 dimasukkan ke labu 1,00 L pada 25 °C. Untuk $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NO}_2(\text{g})$, $K_c = 4,6 \times 10^{-3}$. Hitung konsentrasi setimbang kedua gas dan persentase N_2O_4 yang terurai.

1 ICE: I: N_2O_4 0,100; NO_2 0. C: $-x$; $+2x$. E: $0,100 - x$; $2x$.

2 $K_c = \frac{(2x)^2}{0,100 - x} = 4,6 \times 10^{-3}$, sehingga $4x^2 + 0,0046x - 0,00046 = 0$.

3 Rumus abc (ambil akar positif): $x = \frac{-0,0046 + \sqrt{0,0046^2 + 16(0,00046)}}{8} = \frac{-0,0046 + 0,0859}{8} = 0,0102$.

4 $[\text{NO}_2] = 2x = 0,0203 \text{ mol/L}$; $[\text{N}_2\text{O}_4] = 0,100 - 0,0102 = 0,0898 \text{ mol/L}$.

5 Cek: $0,0203^2 / 0,0898 = 4,6 \times 10^{-3}$ ✓. Persen terurai = $0,0102 / 0,100 \times 100\% \approx 10\%$.

$[\text{NO}_2] \approx 0,020 \text{ mol/L}$ dan $[\text{N}_2\text{O}_4] \approx 0,090 \text{ mol/L}$: hanya $\pm 10\%$ yang terurai pada 25 °C, sehingga gasnya cokelat pucat. Dipanaskan, persentase ini naik tajam dan warnanya menjadi cokelat tua.



PENDEKATAN "X KECIL"

Bila K sangat kecil dibanding konsentrasi awal (misalnya $K/[]_0 < 10^{-3}$), x jauh lebih kecil daripada konsentrasi awal sehingga $0,100 - x \approx 0,100$. Persamaan kuadrat menjadi sederhana. Selalu cek: bila x lebih dari 5% konsentrasi awal, pendekatan itu tidak boleh dipakai. Pada contoh di atas $x = 10\%$, jadi rumus abc wajib.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MEMANIPULASI K SEPERTI BERMAIN LEGO

- Persamaan dibalik: $K_{\text{baru}} = 1/K$. Jika $\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$ punya $K_c = 4,6 \times 10^{-3}$, maka $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4$ punya $K_c \approx 217$.
- Koefisien dikali n : $K_{\text{baru}} = K^n$. Untuk $\text{NO}_2 \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{N}_2\text{O}_4$, $K_c = \sqrt{217} \approx 14,7$.
- Dua persamaan dijumlahkan: $K_{\text{total}} = K_1 \times K_2$. Contoh: $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$ (K_1) ditambah $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$ (K_2) menghasilkan $\text{N}_2 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$ dengan $K = K_1 K_2$.

 **ΔG° DAN K: JEMBATAN TERMODINAMIKA**

Di Bab 20 kamu bertemu energi bebas Gibbs. Kesetimbangan adalah keadaan ketika $\Delta G = 0$, dan nilai K terhubung langsung dengan ΔG° :

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad \Longleftrightarrow \quad K = e^{-\Delta G^\circ/RT}$$

Untuk sembarang campuran, $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q = RT \ln(Q/K)$. Jadi $Q < K$ memberi $\Delta G < 0$ (reaksi maju spontan), persis seperti aturan di subbab 22.3. Bila ΔH° dianggap tetap, pengaruh suhu terhadap K mengikuti **persamaan van 't Hoff**:

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = -\frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Untuk reaksi eksoterm ($\Delta H^\circ < 0$), menaikkan T membuat $K_2 < K_1$: inilah bukti matematis asas Le Chatelier untuk suhu.

RUMUS HIDUP**K dari ΔG°**

$$K = e^{-\Delta G^\circ/RT}$$

Semakin negatif ΔG° , semakin besar K: reaksi sangat 'ingin' menuju produk.

ΔG° Energi bebas standar kJ/mol

T Suhu K

K Tetapan kesetimbangan

TETAPAN KESETIMBANGAN

687.335,711

$\Delta G^\circ < 0 \rightarrow K > 1$: produk lebih disukai

$\Delta G^\circ = -33,3$ kJ/mol pada **298** K memberi **K = 687.335,711**.

Cek satuan: kJ diubah ke J ($\times 1000$) karena $R = 8,314$ J/(mol·K); pangkat e tidak bersatuan ✓

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

**DERAJAT DISOSIASI DARI MASSA MOLAR RATA-RATA**

Bila 1 mol N_2O_4 terurai dengan derajat disosiasi α , terdapat $1 - \alpha$ mol N_2O_4 dan 2α mol NO_2 ; total $1 + \alpha$ mol, tetapi massanya tetap 92 g. Jadi massa molar rata-rata campuran $\bar{M} = 92/(1 + \alpha)$, yang bisa diukur dari massa jenis gas. Dengan fraksi mol, $K_p = \frac{4\alpha^2}{1 - \alpha^2} P$. Inilah cara klasik mengukur K tanpa memisahkan zat-zat dalam campuran.

Kimia di sekitarmu**Minuman bersoda**

$\text{CO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{aq})$. Saat tutup dibuka, tekanan CO_2 di atas cairan turun, kesetimbangan bergeser ke kiri, dan gelembung pun menyembur. Soda dingin lebih lama bersoda karena gas lebih mudah larut pada suhu rendah.

**Pendaki Jayawijaya**

$\text{Hb} + 4 \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Hb}(\text{O}_2)_4$. Di ketinggian lebih dari 4.000 m, tekanan oksigen tinggal $\pm 60\%$, jadi kesetimbangan bergeser ke kiri: pusing dan sesak napas. Setelah beberapa minggu, tubuh membuat lebih banyak hemoglobin dan menggeser kesetimbangan kembali ke kanan.

**Karung urea di sawah**

Pabrik pupuk di Bontang, Gresik, dan Palembang mengatur suhu, tekanan, dan katalis agar kesetimbangan amonia menguntungkan, lalu mengubah amonia menjadi urea.

**Gua kapur Gunung Sewu**

$\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{HCO}_3^{-}(\text{aq})$. Air hujan ber- CO_2 melarutkan batu kapur. Di langit-langit gua CO_2 lepas ke udara, kesetimbangan bergeser ke kiri, dan stalaktit tumbuh beberapa milimeter per abad.

**Terumbu karang**

Laut menyerap CO_2 yang makin banyak di udara. Rangkaian kesetimbangan karbonat bergeser sehingga ion karbonat berkurang, dan karang serta kerang lebih sulit membangun rangka kapurnya.

**Silika gel berindikator**

Butiran silika gel di kotak sepatu atau kamera ada yang berubah warna saat menyerap uap air. Pengikatan air ini reversibel: butiran yang dipanaskan kering kembali dan warnanya pulih.

**Cek Cepat**

Pada kesetimbangan dinamis, pernyataan yang benar adalah ...

konsentrasi pereaksi sama dengan konsentrasi produk

reaksi maju dan reaksi balik berhenti

laju reaksi maju sama dengan laju reaksi balik

hanya reaksi maju yang masih berlangsung

Untuk $2\text{SO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{SO}_3(\text{g})$ (ΔH negatif), cara menambah SO_3 saat setimbang adalah ...

memperbesar tekanan

menaikkan suhu

menambah katalis

memperbesar volume wadah

Ungkapan K_c untuk $\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$ adalah ...

$$\frac{[\text{CO}][\text{H}_2]}{[\text{C}][\text{H}_2\text{O}]}$$

$$\frac{[\text{CO}][\text{H}_2]}{[\text{H}_2\text{O}]}$$

$$[\text{CO}][\text{H}_2]$$

$$\frac{[\text{H}_2\text{O}]}{[\text{CO}][\text{H}_2]}$$

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. B

Tantangan Rumah: dua gelas, dua sedotan

Bahan: 2 gelas bening tinggi yang sama (atau 2 botol air mineral 600 mL yang dipotong bagian atasnya oleh orang dewasa), 1 sedotan besar (sedotan boba) dan 1 sedotan biasa, air keran + 2 tetes pewarna makanan, penggaris, spidol, nampan, lap.

1. Isi gelas A dengan air berwarna setinggi ± 10 cm. Gelas B kosong. Letakkan keduanya di atas nampan.
2. Kamu memegang sedotan besar ($A \rightarrow B$), anggota keluargamu memegang sedotan kecil ($B \rightarrow A$). Celupkan sedotan tegak sampai dasar, tutup ujung atasnya dengan jari, angkat, lalu lepaskan di atas gelas tujuan. Lakukan bersamaan.
3. Ukur tinggi air kedua gelas dengan penggaris setiap 5 kali pemindahan, sampai tidak berubah lagi (± 30 kali).
4. Tuang sedikit air lagi ke gelas A (gangguan!) dan lanjutkan 15 kali pemindahan.

Keselamatan: jangan menyedot dengan mulut, tutup sedotan dengan jari saja. Jangan meminum air percobaan. Bila memakai botol bekas, mintalah orang dewasa memotongnya dan lapiasi tepi potongan dengan selotip agar tidak melukai tangan. Lap tumpahan segera agar lantai tidak licin; pewarna dapat menodai pakaian.

Pertanyaan: Apakah tinggi air kedua gelas akhirnya sama? Apa yang sebenarnya sama? Setelah gangguan, apakah perbandingan tinggi airnya kembali seperti semula?

RINGKASAN KILAT Bab 22 dalam 3 menit

☒ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **reaksi reversibel** dan **kesetimbangan dinamis** pada tingkat partikel
- menuliskan ungkapan **Kc** dan **Kp** (termasuk kesetimbangan heterogen) lalu menghitung nilainya
- memakai **kuosien reaksi Q** untuk meramalkan arah reaksi
- meramalkan pengaruh konsentrasi, tekanan, suhu, dan katalis dengan **asas Le Chatelier**
- menjelaskan kondisi kompromi **proses Haber-Bosch** dan **proses kontak**, serta menghitung komposisi setimbang dengan **tabel ICE**

Istilah kunci

Reaksi reversibel

Kesetimbangan dinamis

hukum aksi massa

Tetapan kesetimbangan

kesetimbangan heterogen

Kuosien reaksi

proses kontak

tabel ICE

Rumus penting

$$K_c = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2][\text{H}_2]^3}$$

Hukum aksi massa: K_c (atau Q) pabrik amonia.

Konsentrasi produk dipangkatkan koefisiennya di atas, konsentrasi pereaksi dipangkatkan koefisiennya di bawah. Dengan konsentrasi setimbang hasilnya K_c; dengan konsentrasi sembarang hasilnya Q.

$$K_p = K_c (RT)^{\Delta n}$$

K_p dari K_c. Ubah 'bahasa konsentrasi' menjadi 'bahasa tekanan' dengan faktor RT yang dipangkatkan selisih mol gas.

$$K_c = \frac{(2x)^2}{(a-x)(b-x)} \Rightarrow [\text{HI}] = 2x$$

Hasil ICE: berapa HI yang terbentuk?. Masukkan konsentrasi awal H₂ dan I₂ serta K_c. Mesin menyelesaikan persamaan kuadrat dalam x (H₂ yang bereaksi) sehingga hasil baginya tepat sama dengan K_c.

$$K = e^{-\Delta G^\circ / RT}$$

K dari ΔG°. Semakin negatif ΔG°, semakin besar K: reaksi sangat 'ingin' menuju produk.

⚠ Jangan sampai terjebak

- "Setimbang" tidak berarti "sama banyak" dan tidak berarti "berhenti".
- Δn hanya menghitung mol gas.
- Hanya suhu yang mengubah nilai K.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=22

🧩 Teka-teki untuk Bab 23

Di bab ini kamu terus menulis kurung siku, [NH₃], [H₂], yang artinya "konsentrasi dalam mol per liter". Sekarang bayangkan dua gelas es teh: teh di gelas A terasa lebih manis daripada teh di gelas B. Bagaimana menyatakan "kemanisan" itu dengan angka, supaya penjual es teh bisa membuat setiap gelas sama manisnya?

▼ Intip petunjuk

Kemanisan bergantung pada berapa banyak gula yang larut dalam sejumlah air, bukan hanya berapa sendok gula yang dipakai. Itulah **konsentrasi**. Bab 23 membahas berbagai cara menyatakannya: molaritas (mol/L), persen massa, ppm, molalitas, dan cara mengencerkan larutan dengan rumus $M_1 V_1 = M_2 V_2$.

23 Larutan & Konsentrasi: Seberapa Manis Es Tehmu?

Gula yang diaduk ke dalam teh tidak lenyap. Ia bersembunyi di antara molekul air. Bab ini mengajarkanmu menghitung berapa banyak yang bersembunyi, dari segelas es teh sampai sekantong cairan infus di rumah sakit.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **pelarut**, **zat terlarut**, dan **larutan**, serta mengelompokkan **elektrolit kuat**, **elektrolit lemah**, dan **nonelektrolit** dari partikel penyusunnya;
- menjelaskan proses melarut pada tingkat partikel dan membaca **kurva kelarutan** (pengaruh suhu dan tekanan, hukum Henry);
- menyatakan kadar larutan dalam **persen massa**, **persen volume**, **persen b/v**, **ppm**, dan **ppb**;
- menghitung **molaritas**, **pengenceran** $M_1 V_1 = M_2 V_2$, **molalitas**, dan **fraksi mol**, serta mengonversi antarsatuan dengan massa jenis;
- membuat **larutan baku** dengan labu ukur secara tepat dan aman.

MISTERI ES TEH KANTIN

KOMIK • 4 PANEL

Jam istirahat, kantin sekolah

BIMA

Lho, es teh gelas A manis sekali, tapi gelas B kok hambar? Padahal harganya sama!

KANTIN SEKOLAH

**LARAS**

Aku sudah mengamati. Gula cair dituang "kira-kira", lalu ditambah teh dan es sampai penuh. Takarannya beda-beda, jadi manisnya juga beda.



KAK TIRTA

Rasa manis bisa diberi angka! Namanya **konsentrasi**: seberapa banyak zat terlarut ada di dalam sejumlah larutan. Es teh 8% berarti 8 g gula di setiap 100 g es teh.



8%
gula (massa)



TING!

Kimo ikut nimbrung...

KIMO

Rahasia penjual laris: satu takar gula cair, lalu tambah air **sampai** garis yang sama. Kimiawan menyebutnya **pengenceran**!

BIMA

Jadi es teh yang selalu pas itu... soal hitungan?



garis takar



Tebak Dulu!

Sesendok gula diaduk dalam segelas air sampai tidak terlihat lagi, lalu gelas itu ditimbang. Apa yang terjadi pada gula dan massa gelas?

Gula lenyap, jadi massanya sama dengan segelas air saja.

Gula bereaksi dengan air menjadi zat baru yang lebih ringan.

Molekul gula masih ada, tersebar di antara molekul air; massanya = massa air + massa gula.

Gula berubah menjadi air karena sama-sama bening.

Jawabannya: gula masih ada. Molekul gula hanya terpisah satu per satu dan menyelip di antara molekul air, terlalu kecil untuk dilihat. Tidak ada zat baru: biarkan airnya menguap, dan gula kembali. Timbangan pun membuktikannya: massa larutan = massa air + massa gula. Melarut bukan bereaksi!

23.1 Larutan: pelarut, zat terlarut, dan siapa yang menghantar listrik

Es teh manis, air laut, cuka dapur, cairan antiseptik, bahkan udara yang kamu hirup: semuanya larutan. Larutan ada di mana-mana karena hampir semua zat mau berbaur dengan zat lain sampai merata.

Bahasa sederhana • Larutkan sesendok gula dalam segelas air. Gulanya tidak tampak lagi, tetapi airnya terasa manis di setiap tegukan, dari atas sampai dasar gelas. Itulah larutan: campuran yang sama rata di mana-mana. Air disebut **pelarut**, gula disebut **zat terlarut**.



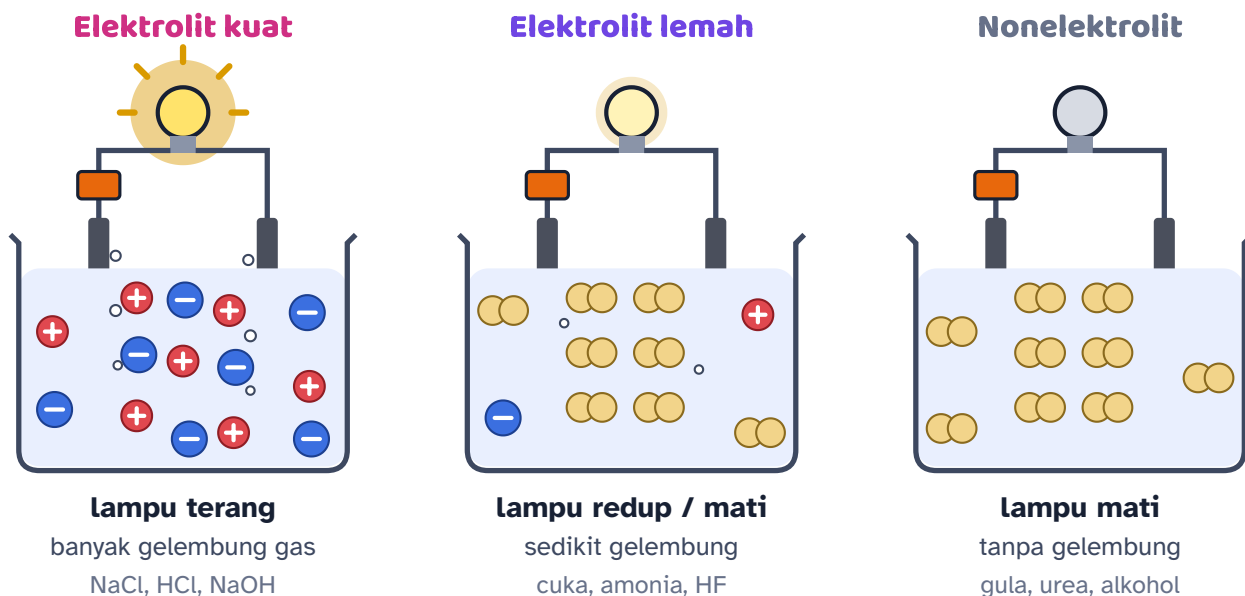
DEFINISI • LARUTAN

Larutan adalah campuran homogen dua zat atau lebih. Komposisinya sama di setiap bagian, partikelnya seukuran molekul atau ion (lebih kecil dari ± 1 nm), tidak mengendap, tidak dapat disaring, dan tembus cahaya (jernih, walaupun boleh berwarna). Komponen yang jumlahnya paling banyak, atau yang wujudnya sama dengan wujud larutan, disebut **pelarut**; komponen lainnya disebut **zat terlarut**. Larutan dengan pelarut air ditandai (aq), dari kata *aqueous*.

Zat terlarut	Pelarut	Contoh di sekitarmu
gas	gas	udara: oksigen, argon, dan CO ₂ dalam nitrogen
gas	cair	minuman bersoda (CO ₂ dalam air), oksigen terlarut di sungai untuk ikan
cair	cair	cairan antiseptik alkohol 70%, cuka dapur (asam asetat dalam air)
padat	cair	es teh manis, air laut, oralit, cairan infus
padat	padat	kuningan (seng dalam tembaga), emas perhiasan 18 karat
gas	padat	gas hidrogen yang terserap di dalam logam paladium

Siapa yang menghantar listrik?

Kak Tirta punya alat uji sederhana: dua batang elektrode, baterai, dan bola lampu kecil. Elektrode dicelupkan ke larutan. Bila lampu menyala, berarti ada **partikel bermuatan yang bergerak bebas** di dalam larutan, yaitu **ion**. Larutan yang menghantar listrik disebut **larutan elektrolit**.



Uji daya hantar listrik. Bulatan merah (+) dan biru (–) adalah ion yang bebas bergerak; bulatan kuning berpasangan adalah molekul utuh. Makin banyak ion, makin terang lampu dan makin banyak gelembung gas di elektrode.

Mengapa ada larutan yang menghasilkan banyak ion? Lihat persamaannya:

- Senyawa ion melepaskan ion yang sudah ada di kisinya (**disosiasi**):



- Senyawa kovalen polar tertentu membentuk ion baru saat bereaksi dengan air (**ionisasi**):



- Asam asetat dalam cuka hanya terionisasi sebagian kecil, dan reaksinya bolak-balik:



- Gula larut sebagai molekul utuh, tanpa ion:



ATURAN • DERAJAT IONISASI

Kekuatan elektrolit diukur dengan **derajat ionisasi** α :

$$\alpha = \frac{\text{mol zat yang terionisasi}}{\text{mol zat mula-mula}}$$

Elektrolit kuat $\alpha \approx 1$ (senyawa ion yang larut, asam kuat seperti HCl, HNO₃, H₂SO₄, dan basa kuat seperti NaOH, KOH). Elektrolit lemah $0 < \alpha < 1$ (asam dan basa lemah seperti CH₃COOH, NH₃, HF). Nonelektrolit $\alpha = 0$ (gula, urea, etanol). Contoh: dalam cuka 0,1 M, hanya ±1,3% molekul asam asetat yang terionisasi ($\alpha \approx 0,013$).

Ketuk unsurnya untuk mengenal ion-ion yang sering muncul di bab ini: **Na** **Cl** **K** **Ca** **Cu** **Mn**.



AWAS JEBAKAN

Di dalam larutan, yang membawa arus listrik adalah **ion yang bergerak**, bukan elektron yang berenang di air. Ingat juga: kristal NaCl padat **tidak** menghantar listrik walaupun tersusun atas ion, karena ion-ionnya terkunci di kisi. Baru setelah dilelehkan atau dilarutkan, ion-ionnya bebas bergerak.



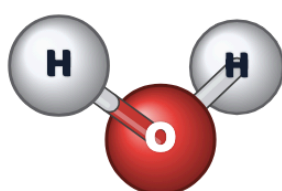
TAMU DARI MASA LALU

Pada 1884, **Svante Arrhenius**, mahasiswa doktoral di Uppsala, Swedia, mengajukan gagasan berani: garam yang larut di air terurai menjadi partikel bermuatan (ion), bahkan tanpa dialiri listrik. Para pengujinya ragu dan memberinya nilai pas-pasan. Sembilan belas tahun kemudian, gagasan yang sama mengantarnya meraih Hadiah Nobel Kimia 1903. Ide yang aneh hari ini bisa menjadi ilmu besar esok hari!

23.2 Proses melarut dan kelarutan

Mengapa garam dan gula mudah larut di air, tetapi minyak goreng tidak? Kimiawan punya semboyan pendek: **sejenis melarutkan sejenis** (*like dissolves like*). Zat polar dan senyawa ion larut dalam pelarut polar seperti air. Zat nonpolar, seperti minyak dan lilin, larut dalam pelarut nonpolar seperti bensin atau heksana.

MOLEKUL 3D Siapa yang akrab dengan air?



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Air H₂O

Mr ≈ 18,02

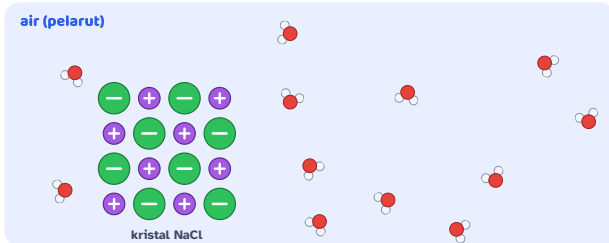
[PubChem](#)

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

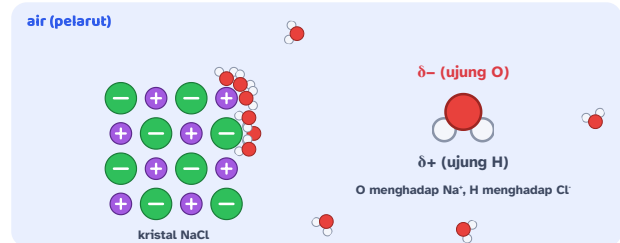
Hitung gugus –OH (atom O yang mengikat H) pada glukosa dan sukrosa. Setiap –OH dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air, sehingga gula sangat mudah larut. Bandingkan dengan heksana: tidak

ada satu pun bagian polar, jadi heksana menolak air tetapi bercampur dengan minyak.

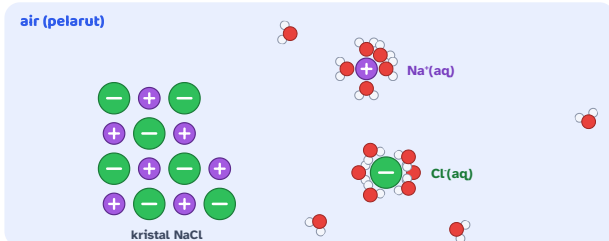
Untuk senyawa ion seperti garam dapur, molekul air yang polar bekerja seperti tim penarik tambang. Ikuti animasinya langkah demi langkah:



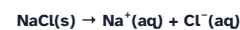
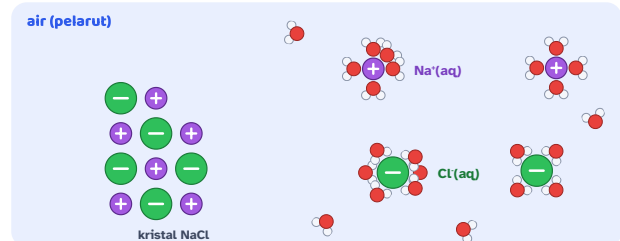
Langkah 1. Kristal garam dapur (NaCl) adalah kisi ion Na^+ (ungu) dan Cl^- (hijau) yang saling tarik. Di sekitarnya, molekul air bergerak bebas ke segala arah.



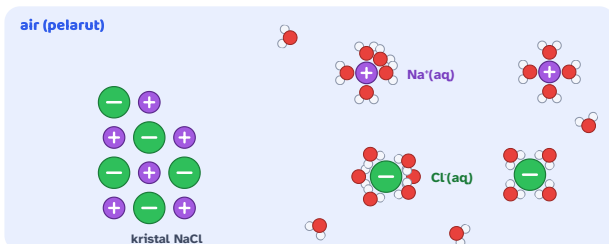
Langkah 2. Air adalah molekul polar: ujung O sedikit negatif (δ^-), ujung H sedikit positif (δ^+). Molekul air berbalik arah: ujung O menghadap Na^+ , ujung H menghadap Cl^- .



Langkah 3. Tarikan banyak molekul air cukup kuat untuk mencabut ion di sudut dan tepi kristal. Ion yang lepas langsung diselubungi air. Peristiwa ini disebut **hidrasi**.



Langkah 4. Ion-ion terhidrasi menyebar merata ke seluruh air, dan kristal makin kecil lalu habis:
 $\text{NaCl(s)} \rightarrow \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$.



Memutus kisi ion butuh energi $\uparrow$ - Hidrasi ion melepas energi $\downarrow$
Untuk NaCl keduanya hampir impas: ΔH pelarutan $\approx +3,9 \text{ kJ/mol}$

Langkah 5. Neraca energinya: memutus kisi butuh energi, hidrasi melepas energi. Bila hidrasi menang, larutan menghangat (NaOH); bila kalah, larutan mendingin (kompres dingin instan berisi amonium nitrat).

Apakah air bisa melarutkan garam tanpa batas? Tidak. Pada suhu tertentu, ada jumlah maksimum zat yang dapat larut.



DEFINISI • KELARUTAN

Kelarutan (S) adalah massa maksimum zat terlarut yang dapat larut dalam 100 g pelarut pada suhu tertentu (bisa juga dinyatakan dalam mol/L). Larutan yang sudah berisi zat terlarut sebanyak kelarutannya disebut **larutan jenuh**; yang kurang dari itu **larutan tak jenuh**. Bila berisi lebih banyak daripada kelarutannya tanpa mengendap, ia disebut **larutan lewat jenuh**, keadaan yang rapuh: sebutir kristal kecil saja dapat memicu pengkristalan besar-besaran.

Madu yang lama disimpan sering "berpasir" karena madu adalah larutan gula yang lewat jenuh. Gula batu dibuat dengan mendinginkan larutan gula panas yang sangat pekat secara perlahan, sehingga kristal tumbuh besar di sepanjang benang.



Tebak Dulu!

Gelas P berisi larutan gips (kalsium sulfat) yang sudah jenuh, dengan endapan di dasarnya. Gelas Q berisi 100 g gula dalam 100 g air yang belum jenuh. Mana yang lebih pekat?

Gelas P, karena larutan jenuh pasti paling pekat.

Gelas Q, jauh lebih pekat walaupun belum jenuh.

Sama pekat, karena keduanya sama-sama larutan.

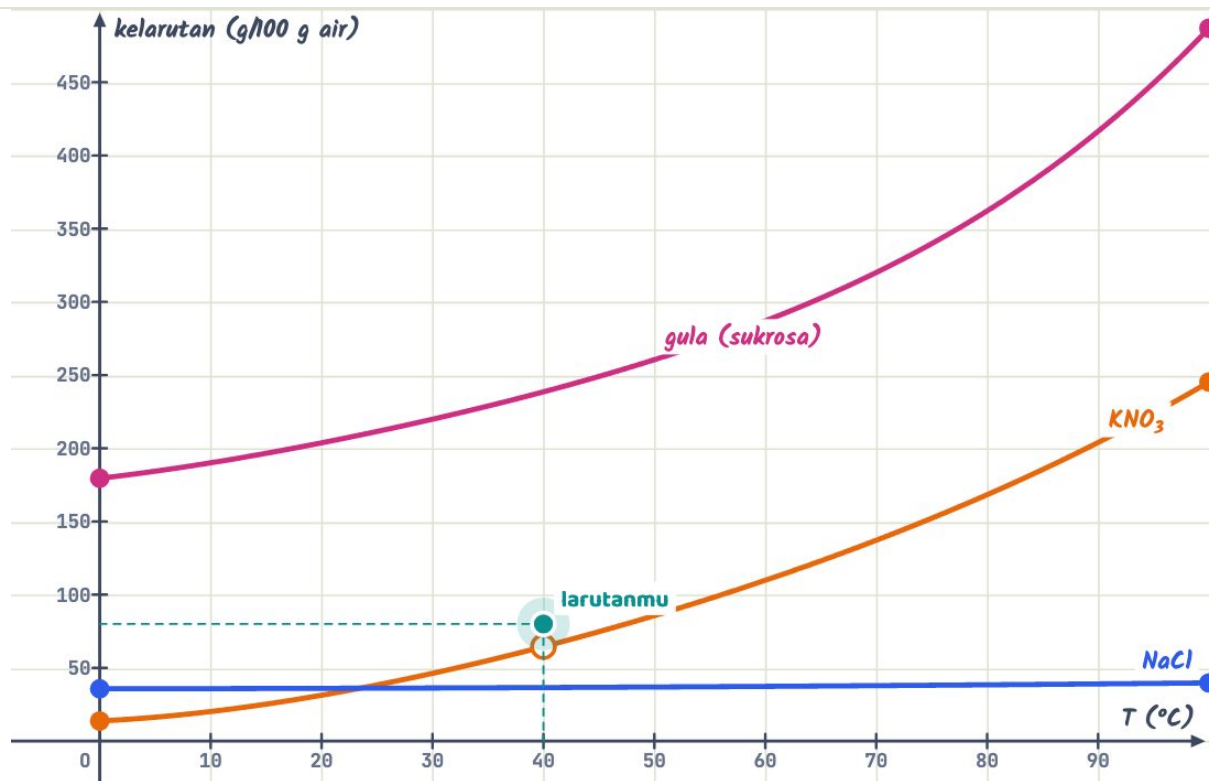
Tidak bisa dibandingkan karena zatnya berbeda.

Jawabannya: gelas Q. Kelarutan kalsium sulfat hanya $\pm 0,2$ g per 100 g air pada suhu kamar, jadi larutan jenuhnya sangat encer. Gelas Q berisi 100 g gula per 100 g air (kelarutan gula ± 200 g), belum jenuh tetapi ratusan kali lebih pekat. "Jenuh" berarti tidak bisa melarutkan lagi, bukan "pekat".

Kelarutan dipengaruhi **suhu**. Kebanyakan padatan lebih mudah larut di air panas, misalnya kalium nitrat (KNO_3 , bahan pupuk dan pengawet) yang kelarutannya naik tajam. Garam dapur hampir tidak peduli suhu. Gas justru **kurang** larut di air hangat. Jelajahi grafiknya:

$$S = f(T) \quad (\text{gram zat per 100 g air})$$

$$T = 40^\circ\text{C} : S_{\text{KNO}_3} \approx 64,5, \quad S_{\text{NaCl}} \approx 36,6, \quad S_{\text{gula}} \approx 238,5$$



di atas kurva: kelebihan KNO_3 mengkristal (garis merah putus-putus)

S KNO_3

64,5 g

S NaCl

36,6 g

S gula

239 g

 KNO_3 yang mengkristal

15,5 g

Titik hijau toska adalah "larutanmu": sejumlah KNO_3 dalam 100 g air. Mulailah dari 80 g pada 60 °C (tak jenuh), lalu seret titiknya ke kiri seolah larutan didinginkan. Pada suhu berapa kristal mulai muncul? Berapa gram yang mengkristal pada 20 °C? Perhatikan juga garis NaCl yang hampir datar.



KIMIA NUSANTARA • GARAM DARI TAMBAK

Air laut Nusantara berkadar garam $\pm 3,5\%$. Di tambak garam Madura, Rembang, dan Pati, air laut dialirkan dari petak ke petak dan diuapkan oleh matahari. Ketika kadar NaCl mencapai $\pm 26\%$ massa, larutannya jenuh (± 36 g per 100 g air) dan kristal garam mulai tumbuh di dasar petak. Karena kelarutan NaCl hampir tidak dipengaruhi suhu, petani garam mengandalkan **penguapan**, bukan pendinginan. Itulah sebabnya panen garam terbaik datang di puncak musim kemarau.

Untuk gas, ada faktor kedua yang sangat kuat: **tekanan**. Botol minuman bersoda diisi CO₂ bertekanan tinggi. Begitu tutupnya dibuka, tekanan turun dan gas yang terlarut keluar sebagai gelembung: *pssst!*



HUKUM HENRY

Pada suhu tetap, kelarutan gas dalam cairan sebanding dengan tekanan parsial gas itu di atas cairan:

$$C = k_H \times P$$

C = kelarutan gas (mol/L), P = tekanan parsial gas (atm), k_H = tetapan Henry yang khas untuk setiap gas, pelarut, dan suhu. Pada 25 °C, k_H untuk O₂ dalam air $\pm 1,3 \times 10^{-3}$ mol L⁻¹ atm⁻¹ dan untuk CO₂ $\pm 0,034$ mol L⁻¹ atm⁻¹.

RUMUS HIDUP

Hukum Henry: gas larut sebanding tekanannya

$$C = k_H \times P$$

Makin besar tekanan gas di atas cairan, makin banyak gas yang larut, asalkan suhunya tetap.

k_H

Tetapan Henry mol/(L·atm)

P

Tekanan parsial gas atm

C

Kelarutan gas mol/L

KELARUTAN GAS

$2,73 \times 10^{-4}$

mol/L

oksigen terlarut di air bersih $\pm 8-9$ mg/L: cukup untuk ikan

Gas yang larut: $2,73 \times 10^{-4}$ mol/L. Bila gasnya O₂ (Mr 32), itu **8,736** mg/L; bila CO₂ (Mr 44), **12,012** mg/L.

Cek satuan: mol/(L·atm) × atm = mol/L ✓

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



TAMU DARI MASA LALU

William Henry, kimiawan Inggris, menerbitkan hukumnya pada 1803 setelah mengukur berapa banyak gas yang diserap air pada berbagai tekanan. Sahabatnya, **John Dalton**, juga meneliti penyerapan gas oleh air, dan penelitian itu ikut menuntun Dalton ke teori atomnya (Bab 5). Dua sahabat, satu gelas air, dua ide besar!

MITOS

"Gula yang larut itu hilang."

FAKTA

Molekul gula hanya tersebar di antara molekul air. Massa larutan = massa air + massa gula, dan gula kembali bila airnya diuapkan.

MITOS

"Air murni penghantar listrik yang baik."

FAKTA

Air murni nyaris tidak menghantar. Yang menghantar adalah ion terlarut, dan air keran, air hujan, serta keringat selalu mengandung ion. Jadi tetap jauhkan alat listrik dari air!

MITOS

"Air panas selalu melarutkan lebih banyak zat."

FAKTA

Benar untuk kebanyakan padatan, tetapi gas justru kurang larut di air panas. Itu sebabnya minuman bersoda hangat cepat "kempes" dan ikan megap-megap di air yang terlalu hangat.

23.3

Persen, ppm, dan ppb: kadar untuk kehidupan sehari-hari

Kembali ke kantin. Untuk menyatakan "seberapa manis", kita membandingkan banyaknya zat terlarut dengan banyaknya larutan. Cara paling sederhana memakai persen. Ada tiga jenis persen yang sering tertukar:

$$\% \text{ massa} = \frac{m_{\text{zat terlarut}}}{m_{\text{larutan}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ volume} = \frac{V_{\text{zat terlarut}}}{V_{\text{larutan}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ b/v} = \frac{m_{\text{zat terlarut}} (\text{g})}{V_{\text{larutan}} (\text{mL})} \times 100\%$$

- **Persen massa** (% m/m): es teh 8% berisi 8 g gula dalam setiap 100 g es teh. Asam pekat di laboratorium juga dilabeli dengan persen massa.
- **Persen volume** (% v/v): cairan antiseptik alkohol 70% berisi 70 mL etanol dalam setiap 100 mL larutan.
- **Persen berat per volume** (% b/v): cairan infus NaCl 0,9% berisi 0,9 g NaCl dalam setiap 100 mL larutan.

CONTOH Seberapa manis es tehmu?

Ibu kantin melarutkan 20 g gula pasir ke dalam 230 g teh (anggap teh = air). Berapa persen massa gula dalam es teh itu?

1 Massa larutan = massa gula + massa teh = 20 + 230 = 250 g.

2 $\% \text{ massa} = \frac{20}{250} \times 100\% = 8\%$.

Es teh itu berkadar gula 8% massa. Penyebutnya massa larutan (250 g), bukan massa air (230 g).



AWAS JEBAKAN

Volume tidak selalu bisa dijumlahkan! Mencampur 70 mL etanol dengan 30 mL air menghasilkan larutan **kurang dari 100 mL** (± 97 mL), karena molekul air dan etanol saling mendekat lewat ikatan hidrogen dan mengisi celah satu sama lain. Itu sebabnya alkohol 70% dibuat dengan menambahkan air **sampai** volumenya 100 mL, bukan dengan menambahkan 30 mL air.

Untuk zat yang sangat sedikit, seperti logam berat di air minum, persen terlalu "besar". Kimiawan memakai **ppm** (*parts per million*, bagian per sejuta) dan **ppb** (*parts per billion*, bagian per semiliar).

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}}}{m_{\text{larutan}}} \times 10^6$$

$$\text{ppb} = \frac{m_{\text{zat}}}{m_{\text{larutan}}} \times 10^9$$

Untuk larutan encer dalam air, 1 L larutan bermassa ± 1 kg, sehingga **1 ppm $\approx$ 1 mg/L** dan **1 ppb $\approx$ 1 $\mu\text{g/L}$** .

Bahasa sederhana • Seberapa kecil 1 ppm? Satu ppm sama dengan 1 detik dalam $\pm 11,6$ hari. Satu ppb sama dengan 1 detik dalam ± 32 tahun! Atau bayangkan satu butir beras merah di antara satu juta butir beras putih: itulah 1 ppm.

RUMUS HIDUP ppm dan ppb dalam air

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}} \text{ (mg)}}{V_{\text{air}} \text{ (L)}}$$

Untuk air yang encer, 1 L beratnya ± 1 kg, jadi miligram per liter sama dengan bagian per sejuta.

m_{zat}

Massa zat terlarut mg

V_{air}

Volume sampel air L

ppm

Kadar ppm

KADAR

0,01

ppm

☒ **≤ 10 ppb: masih di bawah pedoman WHO untuk timbal dan arsen dalam air minum**

0,05 mg zat dalam 5 L air = 0,01 ppm = 10 ppb.

Cek satuan: $\text{mg} \div \text{L} \approx \text{mg} \div \text{kg} = \text{ppm}$ ✓

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



KIMIA NUSANTARA • TDS METER DI DEPOT AIR ISI ULANG

Banyak depot air minum isi ulang memamerkan angka dari **TDS meter** (*total dissolved solids*). Alat seharga puluhan ribu rupiah itu sebenarnya mengukur **daya hantar listrik** air, yaitu sumbangan ion-ion terlarut seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan HCO_3^- , lalu mengubahnya menjadi perkiraan ppm. Air hasil osmosis balik bisa di bawah 10 ppm, sedangkan air tanah dan air pegunungan umumnya puluhan sampai beberapa ratus ppm; aturan kualitas air minum Kementerian Kesehatan membatasinya di sekitar 300 ppm. Ingat: angka TDS yang rendah tidak menjamin air bebas kuman, karena bakteri tidak bermuatan seperti ion dan tidak terbaca alat ini.

Zat dalam air minum	Pedoman WHO	Dalam ppb	Sumber pencemar di sekitar kita
timbal	0,01 mg/L	10 ppb	pipa dan solder tua, aki bekas yang dibongkar sembarangan
arsen	0,01 mg/L	10 ppb	air tanah di daerah batuan tertentu, limbah tambang
merkuri (anorganik)	0,006 mg/L	6 ppb	penambangan emas skala kecil yang memakai merkuri
nitrat (NO_3^-)	50 mg/L	50.000 ppb	pupuk berlebih yang meresap ke sumur

23.4 Molaritas dan pengenceran

Persen enak untuk label makanan, tetapi kimiawan ingin tahu **jumlah partikelnya**, karena reaksi kimia terjadi antarpartikel. Karena itu kita memakai mol (Bab 17). Satuan konsentrasi yang paling sering dipakai di laboratorium adalah molaritas.



DEFINISI • MOLARITAS

Molaritas (M) adalah jumlah mol zat terlarut dalam setiap liter **larutan**:

$$M = \frac{n}{V} \quad n = \frac{m}{M_r}$$

Satuannya mol/L, sering ditulis M ("molar") atau mol dm^{-3} . Larutan NaCl 0,1 M berisi 0,1 mol NaCl (5,85 g) dalam setiap 1 L larutan. Kebalikannya, jumlah mol dalam sejumlah larutan adalah $n = M \times V$.

Bahasa sederhana • Bayangkan setiap liter larutan sebagai satu kotak. Molaritas menjawab pertanyaan: "Ada berapa mol zat di dalam satu kotak?" Larutan 2 M berisi dua kali lebih banyak partikel zat terlarut di setiap kotaknya daripada larutan 1 M.

$$M = \frac{m / M_r}{V}$$

Molaritas adalah jumlah mol zat terlarut di setiap liter larutan.

m Massa zat terlarut g

M_r Massa molar g/mol

V Volume larutan L

M Molaritas mol/L

MOLARITAS

0,154

mol/L

 seperti cairan infus NaCl 0,9% ($\pm 0,154$ M)

9 g zat (M_r 58,5) dalam 1 L larutan: $n = 0,154$ mol, jadi $M = 0,154$ mol/L = 153,846 mmol/L.

Satuan Nusantara: $\approx 100\%$ dari NaCl dalam cairan infus 0,9% $\cdot \approx 26\%$ dari garam di air laut ($\pm$) $\cdot \approx 19\%$ dari asam asetat dalam cuka dapur 5% ($\pm$)

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

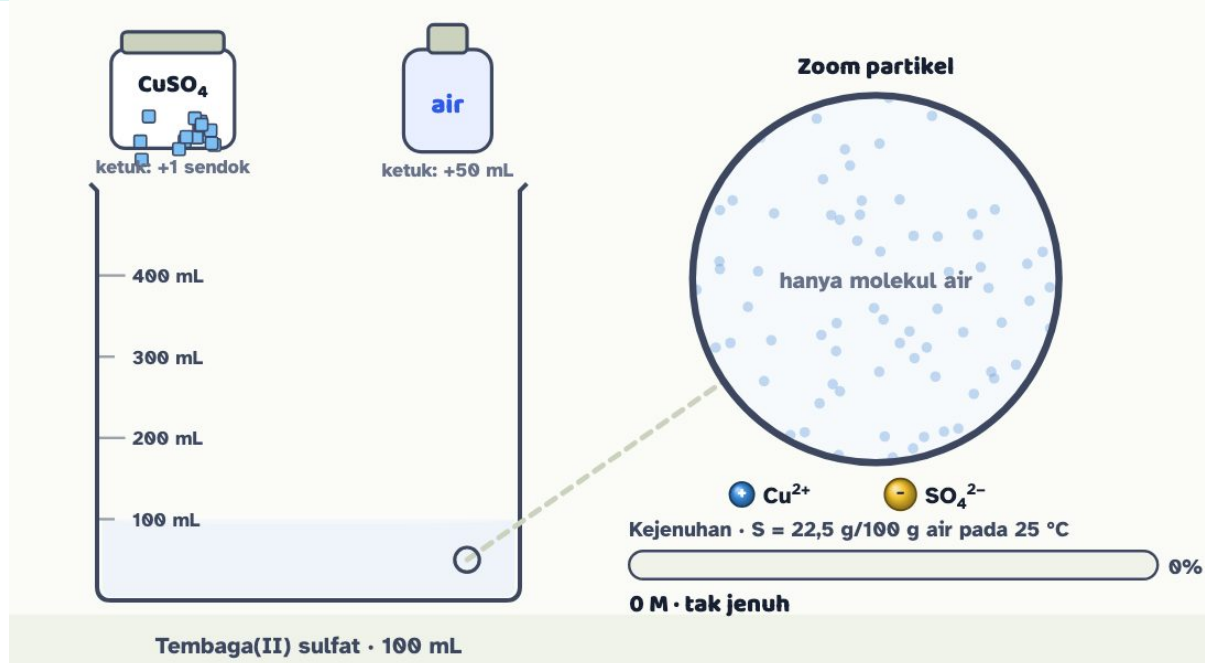
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-LAR-MOLARITAS



MOLARITAS DI LABORATORIUM KLINIK

Hasil cek gula darah sering ditulis dalam mg/dL atau mmol/L. Gula darah puasa 100 mg/dL berarti 1 g glukosa per liter darah. Dengan M_r glukosa 180, itu $1/180 = 0,0056$ mol/L = 5,6 mmol/L. Dokter di berbagai negara memakai satuan berbeda, tetapi kimianya sama.

Sekarang giliranmu menjadi peracik larutan. Tambahkan zat, tambahkan air, panaskan, dan perhatikan kapan larutan menjadi jenuh:



Volume
100 mL

Zat dimasukkan
0 g

Terlarut
0 g

Endapan
0 g

Molaritas
0 M

Keadaan
tak jenuh

Pilih zat, lalu ketuk **stoples zat** (atau tombol 🍴) dan **botol air** (atau tombol 💧). Apa yang terjadi pada warna dan molaritas ketika zat ditambah? Ketika air ditambah? Terus tambahkan zat sampai muncul endapan, lalu naikan suhunya. Coba juga "Buang separuh larutan": mengapa molaritasnya tidak berubah? Catatan: lab ini menganggap volume larutan $\approx$ volume air; pada larutan sangat pekat (misalnya garam jenuh) volume sebenarnya sedikit lebih besar sehingga molaritas aslinya lebih kecil ($\pm 5,4$ M untuk NaCl jenuh). Kalium permanganat sangat pekat warnanya: sedikit saja sudah ungu tua!



Tebak Dulu!

Segelas larutan gula 0,5 M (200 mL) dituang separuhnya ke gelas lain. Berapa molaritas larutan di gelas kedua?

0,25 M, karena isinya tinggal separuh.

0,5 M, sama seperti gelas pertama.

1 M, karena volumenya lebih kecil.

0,1 M, karena sebagian gula tertinggal.

Jawabannya: 0,5 M. Menuang tidak menambah pelarut. Jumlah mol dan volumenya sama-sama tinggal separuh, sehingga perbandingannya tetap. Konsentrasi adalah sifat intensif, seperti rasa: seteguk es teh sama manisnya dengan segelas penuh es teh yang sama.

Bagaimana dengan menambahkan air? Itulah **pengenceran**. Zat terlarutnya tidak bertambah dan tidak berkurang; hanya pelarutnya yang bertambah. Jadi jumlah mol sebelum dan sesudah pengenceran sama.



ATURAN • PENGECERAN

$$n_{\text{sebelum}} = n_{\text{sesudah}}$$

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

M_1, V_1 = molaritas dan volume larutan pekat (stok) yang diambil; M_2, V_2 = molaritas dan volume larutan setelah diencerkan. Aturan yang sama berlaku untuk persen dan ppm: $C_1 V_1 = C_2 V_2$.

Perbandingan V_2/V_1 disebut **faktor pengenceran**.

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

Saat diencerkan, mol zat terlarut tetap; yang bertambah hanya pelarutnya.

M_1 Molaritas larutan stok M

V_1 Volume stok yang diambil mL

V_2 Volume akhir setelah diencerkan mL

M_2 Molaritas akhir M

MOLARITAS AKHIR

0,2
M

pengenceran 10 kali

Ambil **25** mL larutan **2** M, tambahkan air sampai **250** mL: hasilnya **0,2** M, diencerkan **10** kali. Mol zat tetap **50** mmol.

Cek satuan: $M \times mL \div mL = M$ ✓

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



TRIK KAK TIRTA

"Yang kekal saat diencerkan adalah mol." Jadi $M_1 V_1 = M_2 V_2$ hanyalah "mol sebelum = mol sesudah". Volume boleh dalam mL atau L, asal sama di kedua ruas. Lalu cek kewajaran: hasil M_2 harus **lebih kecil** daripada M_1 . Kalau hasilmu lebih pekat, pasti ada yang tertukar!

Tiap langkah: ambil 25 mL + air sampai 50 mL → encer 2×

Sirup: 50% gula (b/v) = 1,46 M. Ketuk gelas untuk membaca kadarnya.

pipet



Terpilih

bottle sirup

Kadar gula

50 % (b/v)

Molaritas gula

1,462 M

Lebih encer dari sirup

1 kali

Volume

100 mL

Sirup di botol berkadar gula 50% (b/v). Pilih faktor pengenceran, lalu tekan **Encerkan berikutnya**: pipet memindahkan sebagian larutan ke gelas berikutnya, kemudian air ditambahkan sampai 50 mL. Ketuk gelas mana pun untuk membaca kadarnya. Setiap titik putih mewakili sejumlah molekul gula: hitung berapa yang tersisa! Setelah kelima gelas jadi, uji matamu dengan 🔍 **Gelas misteri**. Dengan pengenceran 10×, pada gelas seberapa warnanya tak lagi terlihat?

KERJAKAN BERSAMA

Isi sachet oralit

Satu sachet oralit dilarutkan dalam air sampai 200 mL. Sachet itu berisi 0,52 g NaCl dan 2,7 g glukosa. Hitung molaritas NaCl dan glukosa dalam larutan oralit. (M_r NaCl = 58,5; glukosa = 180)

1 $M_{\text{NaCl}} = 0,52/58,5 = 0,00889 \text{ mol}; \text{ mol glukosa} = 2,7/180 = 0,0150 \text{ mol.}$

2 $\text{Volume larutan} = 200 \text{ mL} = 0,200 \text{ L.}$

3 $M_{\text{NaCl}} = 0,00889/0,200 = 0,044 \text{ M} = 44 \text{ mmol/L}; M_{\text{glukosa}} = 0,0150/0,200 = 0,075 \text{ M} = 75 \text{ mmol/L.}$

NaCl ±0,044 M dan glukosa 0,075 M. Sitrat dalam sachet juga menyumbang natrium, sehingga total natrium ±75 mmol/L, sama dengan glukosanya. Perbandingan 1 : 1 ini yang membuat usus menyerap natrium dan air paling cepat.



KIMIA NUSANTARA · ORALIT, PENYELAMAT JUTAAN ANAK

Diare membuat tubuh kehilangan air dan garam dengan cepat. Sejak puluhan tahun lalu, puskesmas dan posyandu di seluruh Indonesia membagikan **oralit**, campuran garam dan gula dengan takaran yang dirumuskan WHO. Kuncinya ada pada konsentrasi: glukosa membantu usus menyerap natrium, dan air ikut terserap bersamanya. Larutan yang terlalu pekat justru menarik air ke dalam usus dan memperparah diare. Karena itu aturan pakai pada sachet harus diikuti persis: satu sachet untuk 200 mL air matang.

KERJAKAN BERSAMA

Mengencerkan cuka biang

Di warung dijual cuka biang berkadar asam asetat 25%. Kak Tirta ingin membuat 400 mL cuka masak 5%. Berapa mL cuka biang yang diambil, dan berapa mL air yang ditambahkan (kira-kira)?

1 $C_1V_1 = C_2V_2: 25\% \times V_1 = 5\% \times 400 \text{ mL}.$

2 $V_1 = \frac{5 \times 400}{25} = 80 \text{ mL cuka biang}.$

3 Tambahkan air sampai volumenya 400 mL, yaitu $\pm 320 \text{ mL air}.$

Ambil 80 mL cuka biang, lalu tambahkan air sampai 400 mL (pengenceran 5 kali). Cuka biang 25% tidak boleh diminum atau dipakai langsung untuk makanan karena dapat melukai mulut dan kerongkongan.



ADU CEPAT

Massa & volume → molaritas

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-23

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$M = (m \div Mr) \div V$ dalam liter. Contoh: 5,85 g NaCl hingga 500 mL $\rightarrow 0,1 \text{ mol} \div 0,5 \text{ L} = 0,2 \text{ M}.$



ADU CEPAT

Pengenceran kilat

ADU CEPAT · MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-23

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$M_2 = M_1 \times V_1 \div V_2.$ Mol zat tetap, volume bertambah, jadi M_2 selalu lebih kecil.



AWAS JEBAKAN

Melarutkan 0,1 mol zat ke dalam 1 L air **tidak** menghasilkan larutan 0,1 M. Zat terlarut ikut menempati ruang, sehingga volume larutannya lebih dari 1 L dan molaritasnya sedikit kurang dari 0,1 M. Cara yang benar: larutkan zat dalam sebagian air, lalu tambahkan air **sampai** volume larutan tepat 1 L (subbab 23.6).

23.5 Molalitas dan fraksi mol

Molaritas punya satu kelemahan kecil: volume larutan berubah bila suhunya berubah. Larutan yang dipanaskan memuai, sehingga molaritasnya sedikit turun walaupun tidak ada yang ditambahkan. Untuk percobaan yang melibatkan pemanasan atau pendinginan, seperti mendidihkan dan membekukan larutan di Bab 24, kimiawan memakai satuan berbasis **massa**, yang tidak terpengaruh suhu.



DEFINISI • MOLALITAS DAN FRAKSI MOL

Molalitas (m) adalah jumlah mol zat terlarut dalam setiap kilogram **pelarut** (bukan larutan):

$$m = \frac{n_{\text{zat terlarut}}}{\text{massa pelarut (kg)}}$$

$$m = \frac{m_t/M_r}{p} \times 1000 \quad (p \text{ dalam g})$$

Satuannya mol/kg atau "mola". **Fraksi mol** (X) adalah perbandingan mol suatu komponen dengan mol seluruh komponen:

$$X_A = \frac{n_A}{n_A + n_B}$$

$$X_A + X_B = 1$$

Fraksi mol tidak bersatuan. Udara kering, misalnya, memiliki $X_{\text{N}_2} \approx 0,78$ dan $X_{\text{O}_2} \approx 0,21$.

$$m = \frac{m_t / M_r}{p} \times 1000$$

Molalitas adalah mol zat terlarut untuk setiap kilogram pelarut, bukan larutan.

m_t Massa zat terlarut g

M_r Massa molar zat terlarut g/mol

p Massa pelarut (air) g

m Molalitas mol/kg

MOLALITAS

0,2

mol/kg

glukosa

n zat terlarut = 0,1 mol, n air = 27,778 mol. Fraksi mol air = 0,996; fraksi mol zat terlarut = 0,004.

Cek satuan: (g ÷ g/mol) ÷ g × 1000 = mol/kg ✓

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

Sebanyak 18 g glukosa ($C_6H_{12}O_6$, Mr 180) dilarutkan dalam 500 g air (Mr 18). Hitung molalitas glukosa serta fraksi mol glukosa dan air.

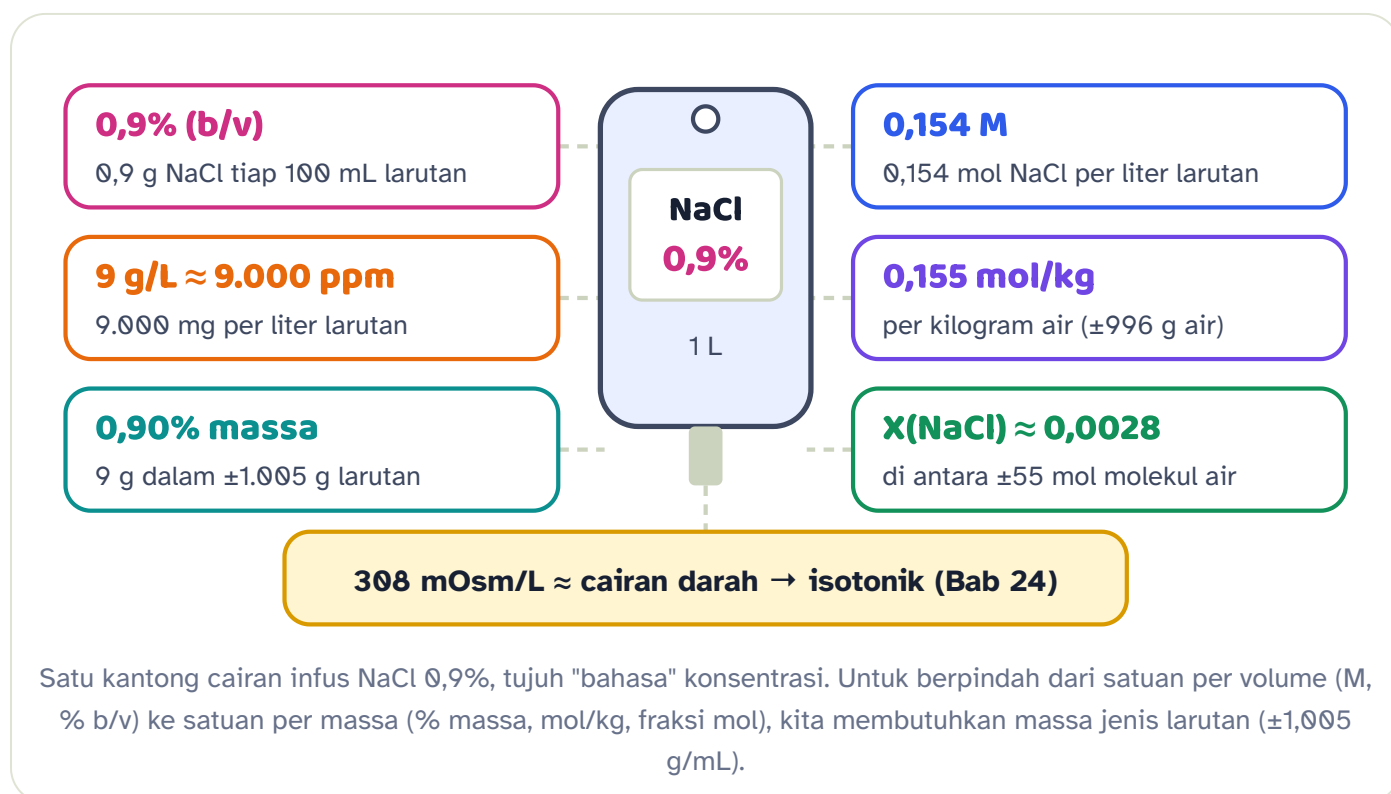
1 Mol glukosa = $18/180 = 0,100$ mol; mol air = $500/18 = 27,8$ mol.

2 Molalitas = $0,100/0,500 = 0,200$ mol/kg.

3 $X_{\text{glukosa}} = \frac{0,100}{0,100 + 27,8} = 0,0036$; $X_{\text{air}} = 1 - 0,0036 = 0,9964$.

Molalitas 0,200 mol/kg. Dari setiap 1.000 molekul di gelas itu, hanya ±4 yang molekul glukosa; sisanya air!

Satu larutan bisa "diceritakan" dengan banyak satuan. Lihat bagaimana sekantong cairan infus yang sama dinyatakan dalam tujuh cara:



Satuan	Pembilang	Penyebut	Berubah bila suhu berubah?	Sering dipakai untuk
% massa	massa zat terlarut	massa larutan	tidak	label pangan, asam pekat, bijih
% volume	volume zat terlarut	volume larutan	sedikit	alkohol, cairan antiseptik
% b/v	massa zat (g)	volume larutan (100 mL)	sedikit	infus, obat, pupuk cair
ppm, ppb	massa zat	massa larutan ($\times 10^6$, $\times 10^9$)	tidak	pencemar, logam berat, TDS
molaritas (M)	mol zat terlarut	volume larutan (L)	ya, sedikit	reaksi di laboratorium, titrasi
molalitas (m)	mol zat terlarut	massa pelarut (kg)	tidak	sifat koligatif (Bab 24)
fraksi mol (X)	mol satu komponen	mol semua komponen	tidak	campuran gas, tekanan uap



JEMBATAN MOLARITAS ↔ MOLALITAS

Untuk berpindah antara satuan "per volume" dan "per massa", kita butuh **massa jenis larutan** ρ (g/mL). Ambil 1 L larutan: massanya 1000ρ g, massa zat terlarutnya $M \cdot M_r$ g, sehingga massa pelarutnya $1000\rho - M M_r$ gram. Maka

$$m = \frac{1000 M}{1000 \rho - M M_r}$$

Untuk larutan encer dalam air, $\rho \approx 1$ dan $M M_r$ kecil, sehingga $m \approx M$. Cek dengan infus: $m = 154/(1004,6 - 9,0) = 0,155$ mol/kg ✓. Untuk larutan pekat, perbedaannya besar sekali. Larutan NaOH 50% massa ($\rho = 1,52$ g/mL) adalah $10 \times 1,52 \times 50/40 = 19,0$ M, tetapi molalitasnya $19\,000/(1520 - 760) = 25,0$ mol/kg, karena separuh massanya adalah zat terlarut.

▼ Mengapa molalitas dan fraksi mol bisa dikonversi tanpa massa jenis?

Keduanya hanya memakai massa dan mol, tanpa volume. Ambil 1 kg pelarut: ada m mol zat terlarut dan $1000/M_{r,\text{pelarut}}$ mol pelarut. Jadi $X_{\text{terlarut}} = \frac{m}{m + 1000/M_{r,\text{pelarut}}}$. Untuk air, $1000/18,02 = 55,5$ mol, sehingga larutan 1 molal dalam air memiliki $X = 1/56,5 = 0,0177$.



23.6 Membuat larutan baku di laboratorium

Hasil titrasi, uji kualitas air, dan pembuatan obat bergantung pada satu hal: larutan yang konsentrasinya diketahui dengan tepat. Larutan seperti itu disebut **larutan baku** (larutan standar). Bila dibuat langsung dengan menimbang zat yang sangat murni dan stabil, zat itu disebut **baku primer**, misalnya natrium karbonat anhidrat, asam oksalat dihidrat $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, atau kalium hidrogen ftalat. Natrium hidroksida bukan baku primer karena menyerap uap air dan bereaksi dengan CO_2 di udara.

Alat kuncinya adalah **labu ukur**: labu berleher panjang dengan satu garis melingkar, **tanda tera**. Bila cairan diisi tepat sampai garis itu pada suhu yang tertera (biasanya 20°C), volumenya tepat seperti yang tertulis, misalnya 250,0 mL. Ikuti langkah membuat 250,0 mL larutan tembaga(II) sulfat 0,100 M:

1 · Hitung massa zat

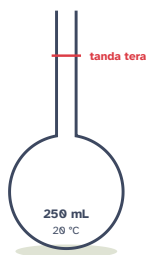
Target: 250,0 mL CuSO_4 0,100 M

$$n = M \times V = 0,100 \times 0,2500 = 0,0250 \text{ mol}$$

Ditimbang: kristal $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (terusi)

$$M_r = 63,5 + 32 + 4(16) + 5(18) = 249,5$$

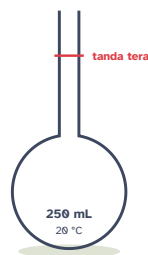
$$m = 0,0250 \times 249,5 = 6,24 \text{ g}$$



Langkah 1. Hitung dulu. Untuk 250,0 mL larutan 0,100 M dibutuhkan 0,0250 mol. Yang tersedia adalah kristal terusi $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (M_r 249,5), jadi massanya 6,24 g. Air kristal ikut ditimbang!

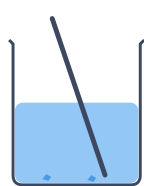
2 · Timbang dengan neraca

di atas kaca arloji, neraca analitik
catat massa sebenarnya, mis. 6,238 g

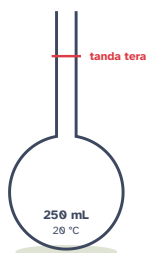


Langkah 2. Timbang $\pm 6,24$ g kristal dengan neraca analitik di atas kaca arloji atau gelas kimia kecil. Catat massa sebenarnya (misalnya 6,238 g) untuk menghitung konsentrasi yang tepat.

3 · Larutkan di gelas kimia

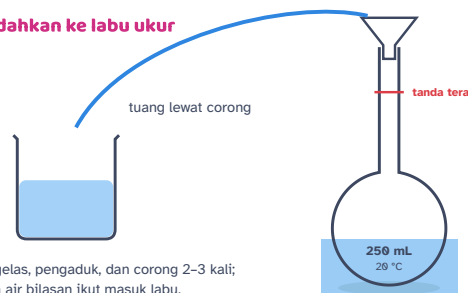


± 100 mL
akuades,
aduk sampai
larut



Langkah 3. Larutkan kristal dengan ± 100 mL akuades di gelas kimia sambil diaduk. Melarutkan langsung di dalam labu ukur lebih sulit dan lebih lama.

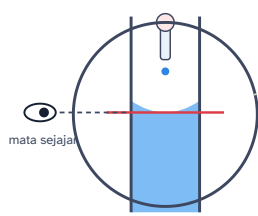
4 · Pindahkan ke labu ukur



Bilas gelas, pengaduk, dan corong 2-3 kali;
semua air bilasan ikut masuk labu.

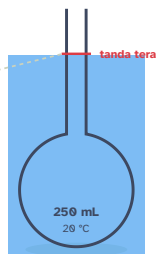
Langkah 4. Tuang larutan ke labu ukur 250 mL melalui corong. Bilas gelas kimia, batang pengaduk, dan corong 2-3 kali dengan akuades; semua air bilasan masuk ke labu agar tidak ada zat yang tertinggal.

5 · Tepatkan sampai tanda tera



mata sejajar

dasar meniskus tepat menyentuh garis



Langkah 5. Tambahkan akuades sampai ± 1 cm di bawah tanda tera, lalu tetes demi tetes dengan pipet tetes. Dasar meniskus harus tepat menyentuh tanda tera, dibaca dengan mata sejajar garis.

6 · Tutup, kocok, beri label

CuSO_4 0,100 M
volume: 250,0 mL
dibuat: (tanggal)
oleh: (nama pembuat)



Langkah 6. Tutup labu, lalu balikkan 10-20 kali agar konsentrasinya sama di semua bagian. Pindahkan ke botol bersih dan beri label: nama zat, konsentrasi, tanggal, dan pembuat.

Bila larutan baku dibuat dengan mengencerkan asam pekat, ada satu aturan keselamatan yang tidak boleh dilanggar.



KESELAMATAN

Selalu tuang **asam ke dalam air**, sedikit demi sedikit sambil diaduk, jangan sebaliknya. Pengenceran asam sulfat pekat melepaskan kalor yang sangat besar; bila air dituang ke asam, air bisa mendidih seketika dan memercikkan asam. Kerjakan di lemari asam, pakai kacamata pelindung, jas lab, dan sarung tangan, dan hanya di bawah pengawasan guru. Larutan sisa dibuang sesuai petunjuk guru, bukan langsung ke wastafel.



Korosif



Iritan



Bahaya lingkungan
(CuSO₄)



TRIK KAK TIRTA

Rumus kilat dari persen massa ke molaritas: $M = \frac{10 \times \rho \times \%}{M_r}$, dengan ρ dalam g/mL. Angka 10 muncul dari 1.000 mL ÷ 100%. Contoh: asam nitrat pekat 65% ($\rho = 1,40$ g/mL, M_r 63) memiliki $M = 10 \times 1,40 \times 65/63 = 14,4$ M.

COBA SENDIRI

Dari botol asam pekat ke larutan 0,10 M

Botol asam klorida pekat bertuliskan: HCl 37%, $\rho = 1,19$ g/mL. Hitung molaritasnya, lalu tentukan volume yang harus diambil untuk membuat 500 mL HCl 0,10 M. (M_r HCl = 36,5)

- 1 Ambil 1 L = 1.000 mL larutan pekat: massanya $1.000 \times 1,19 = 1.190$ g.
- 2 Massa HCl di dalamnya = $37\% \times 1.190 = 440$ g, yaitu $440/36,5 = 12,1$ mol. Jadi $M_1 = 12,1$ M.
- 3 Pengenceran: $V_1 = \frac{M_2 V_2}{M_1} = \frac{0,10 \times 500}{12,1} = 4,1$ mL.
- 4 Isi labu ukur 500 mL dengan ± 300 mL akuades, tambahkan 4,1 mL HCl pekat perlahan di lemari asam, goyangkan, lalu tepatkan sampai tanda tera.

HCl pekat $\approx 12,1$ M; ambil $\pm 4,1$ mL untuk membuat 500 mL HCl 0,10 M. Karena HCl pekat mudah menguap, larutan hasilnya biasanya dibakukan lagi dengan titrasi (Bab 27).

**AKTIVITAS: KONSENTRASI YANG "EFEKTIF"**

Dalam **larutan ideal**, setiap partikel zat terlarut berperilaku seolah-olah sendirian di tengah pelarut. Larutan ion yang nyata tidak begitu: setiap kation dikelilingi "awan" anion dan sebaliknya (*atmosfer ion*), sehingga ion tampak kurang "aktif" daripada jumlahnya. Konsentrasi efektif ini disebut **aktivitas**:

$$a = \gamma \cdot \frac{c}{c^\circ}$$

$$\log \gamma_{\pm} = -0,509 |z_+ z_-| \sqrt{I}$$

γ adalah koefisien aktivitas dan $I = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2$ adalah *kekuatan ion*. Rumus kedua adalah hukum pembatas Debye-Hückel (air, 25 °C), akurat hanya untuk larutan sangat encer. Untuk NaCl 0,010 M: $I = 0,010$, $\log \gamma_{\pm} = -0,0509$, $\gamma_{\pm} = 0,89$. Ion bermuatan ganda jauh lebih terpengaruh: untuk MgSO_4 0,010 M, $I = 0,040$ dan $\gamma_{\pm} \approx 0,4$ (perkiraan kasar). Itulah sebabnya pH sejati didefinisikan sebagai $-\log a_{\text{H}^+}$, dan tetapan kesetimbangan termodinamika ditulis dengan aktivitas, bukan konsentrasi.

Kimia di sekitarmu**Es teh & sirup**

Sirup gula pekat diencerkan 5–10 kali di setiap gelas. Penjual yang memakai gelas takar dan "garis batas" membuat es teh yang selalu sama manisnya: pengenceran yang rapi!

**Oralit**

Satu sachet untuk 200 mL air memberi glukosa dan natrium dengan perbandingan mol $\pm 1 : 1$, agar usus menyerap air paling cepat. Terlalu pekat justru memperparah diare.

**Infus NaCl 0,9%**

Konsentrasinya 0,154 M, isotonik dengan darah. Cairan yang terlalu encer atau terlalu pekat dapat merusak sel darah merah (Bab 24).

**Air minum isi ulang**

TDS meter membaca daya hantar listrik dari ion terlarut, lalu menampilkannya sebagai ppm. Kuman tidak terbaca oleh alat ini.

**Pupuk cair**

Label "larutkan 2 mL per liter air" berarti pengenceran ± 500 kali. Larutan yang terlalu pekat membuat akar "terbakar" karena air justru tertarik keluar dari sel akar.

**Cuka biang 25%**

Cuka masak biasanya 4–5% asam asetat. Cuka biang harus diencerkan ± 5 kali; meminumnya langsung dapat melukai kerongkongan.

Cek Cepat

Manakah larutan yang termasuk elektrolit lemah?

NaCl(aq)

HCl(aq)

CH₃COOH (aq) (cuka)

C₁₂H₂₂O₁₁ (aq) (gula)

Sebanyak 50 mL larutan 0,4 M diencerkan menjadi 200 mL. Berapa molaritas akhirnya?

0,1 M

1,6 M

0,4 M

0,2 M

Mengapa minuman bersoda yang hangat lebih cepat "kempes" daripada yang dingin?

CO₂ lebih mudah larut dalam air hangat.

Kelarutan gas berkurang ketika suhu naik.

Gula di dalamnya menguap.

Tekanan di dalam botol menjadi nol.

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. B



Tantangan Rumah: pelangi pengenceran sirup

Bahan: sirup merah (atau air dengan beberapa tetes pewarna makanan), air matang, 5 gelas plastik bening, gelas takar dapur, sendok, kertas putih, senter HP, spidol.

1. Gelas A: 50 mL sirup + air sampai 200 mL, aduk rata (sirup diencerkan 4 kali).
2. Gelas B: ambil 100 mL dari gelas A, tambahkan air sampai 200 mL, aduk.
3. Ulangi: 100 mL dari B ke gelas C, dari C ke D, dan dari D ke E, setiap kali ditambah air sampai 200 mL.
4. Jajarkan kelima gelas di atas kertas putih. Foto dari samping dengan senter HP menyinari dari belakang.
5. Hitung faktor pengenceran setiap gelas dibanding sirup asli (A = 4 kali, B = 8 kali, dan seterusnya).

Keselamatan: kerjakan bersama orang dewasa. Pakai gelas plastik agar tidak pecah, lap tumpahan sirup agar lantai tidak licin dan tidak mengundang semut, dan jangan meminum larutan percobaan. Buang sisanya ke wastafel dan bilas dengan banyak air.

Pertanyaan: Pada gelas seberapa warna merah hampir tak terlihat? Apakah gula dan zat warna di gelas itu benar-benar habis? Berapa kali lebih encer gelas E dibandingkan sirup aslinya?



RINGKASAN KILAT

Bab 23 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **pelarut**, **zat terlarut**, dan **larutan**, serta mengelompokkan **elektrolit kuat**, **elektrolit lemah**, dan **nonelektrolit** dari partikel penyusunnya
- menjelaskan proses melarut pada tingkat partikel dan membaca **kurva kelarutan** (pengaruh suhu dan tekanan, hukum Henry)
- menyatakan kadar larutan dalam **persen massa**, **persen volume**, **persen b/v**, **ppm**, dan **ppb**
- menghitung **molaritas**, **pengenceran** $M_1V_1 = M_2V_2$, **molalitas**, dan **fraksi mol**, serta mengonversi antarsatuan dengan massa jenis
- membuat **larutan baku** dengan labu ukur secara tepat dan aman



Istilah kunci

Larutan

pelarut

zat terlarut

ion

larutan elektrolit

disosiasi

ionisasi

derajat ionisasi

sejenis melarutkan sejenis

Kelarutan

larutan jenuh

larutan tak jenuh

larutan lewat jenuh

ppm

ppb

Molaritas



Rumus penting

$$C = k_H \times P$$

Hukum Henry: gas larut sebanding tekanannya.

Makin besar tekanan gas di atas cairan, makin banyak gas yang larut, asalkan suhunya tetap.

$$\text{ppm} = \frac{m_{\text{zat}} (\text{mg})}{V_{\text{air}} (\text{L})}$$

ppm dan ppb dalam air. Untuk air yang encer, 1 L beratnya ± 1 kg, jadi miligram per liter sama dengan bagian per sejuta.

$$M = \frac{m / M_r}{V}$$

Molaritas dari massa zat. Molaritas adalah jumlah mol zat terlarut di setiap liter larutan.

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

Pengenceran. Saat diencerkan, mol zat terlarut tetap; yang bertambah hanya pelarutnya.

$$m = \frac{m_t / M_r}{p} \times 1000$$

Molalitas dan fraksi mol. Molalitas adalah mol zat terlarut untuk setiap kilogram pelarut, bukan larutan.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Di dalam larutan, yang membawa arus listrik adalah ion yang bergerak, bukan elektron yang berenang di air.
- Volume tidak selalu bisa dijumlahkan!
- Melarutkan 0,1 mol zat ke dalam 1 L air tidak menghasilkan larutan 0,1 M.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=23

🧩 Teka-teki untuk Bab 24

Penjual es puter menaburkan garam kasar di antara bongkahan es yang mengelilingi tabung adonan. Termometer menunjukkan campuran es dan garam itu bisa turun sampai sekitar -10°C , jauh lebih dingin daripada es biasa. Padahal garam tidak dingin, bukan? Dari mana "dingin" itu datang?

▼ Intip petunjuk

Garam larut di lapisan air tipis di permukaan es dan **menurunkan titik beku** air. Es terus meleleh pada suhu di bawah 0°C , dan untuk meleleh ia menyerap kalor dari sekelilingnya, termasuk dari adonan es krim. Besarnya penurunan titik beku bergantung pada **jumlah partikel** terlarut, dan untuk menghitungnya kamu butuh **molalitas** dari bab ini. Selamat datang di dunia sifat koligatif!

24 Sifat Koligatif: Yang Dihitung Hanya Jumlah Partikelnya

Penjual es puter menabur garam kasar ke es batu, dan adonan santan pun membeku. Ikan asin awet, sayur asinan layu, dan cairan infus harus sama "pekat"-nya dengan darah. Semua itu diatur oleh satu hal sederhana: berapa banyak partikel yang larut, bukan partikel apa.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **sifat koligatif** sebagai sifat yang hanya bergantung pada **jumlah partikel** zat terlarut, bukan jenisnya;
- menghitung **penurunan tekanan uap** dengan hukum Raoult, **kenaikan titik didih**, dan **penurunan titik beku** larutan;
- menjelaskan **osmosis** dan menghitung **tekanan osmotik**, misalnya cairan infus yang isotonik dengan darah;
- memakai **faktor van 't Hoff i** untuk larutan elektrolit;
- menentukan **massa molekul relatif** suatu zat dari data sifat koligatif.

GARAM YANG BIKIN BEKU

KOMIK • 4 PANEL

Siang terik di depan sekolah

BIMA

Laras, lihat! Abang es puter menabur garam ke es batu. Biar es puternya asin, ya?



SRAK!

**LARAS**

Bukan, Bim. Coba lihat termometerku: $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$! Padahal es batu biasa cuma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Garam kan tidak dingin...



KAK TIRTA

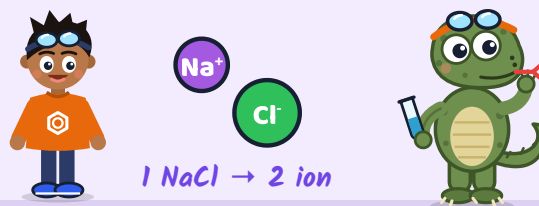
Garam memang tidak dingin. Garam membuat es mencair di bawah $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es yang mencair menyedot kalor dari sekitarnya, termasuk dari adonan santan!

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

Rahasianya: yang dihitung cuma **jumlah partikel**, bukan jenisnya. Satu NaCl pecah jadi dua ion!

BIMA

Jadi garam dua kali lebih jago daripada gula?

**Tebak Dulu!**

Bima memasak air untuk mi instan. Ia menambahkan satu sendok teh garam ($\pm 6\text{ g}$) ke dalam 1 liter air "supaya cepat mendidih". Apa yang sebenarnya terjadi pada titik didih air itu?

Turun, sehingga air lebih cepat mendidih.

Tidak berubah sama sekali.

Naik, tetapi sangat sedikit (sekitar $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), sehingga tidak mempercepat apa pun.

Naik banyak, sampai sekitar $110\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jawabannya: naik sedikit sekali. Garam membuat titik didih *naik*, bukan turun. Untuk 6 g garam dalam 1 kg air, kenaikannya hanya $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, jadi tidak terasa. Air yang tiba-tiba bergolak saat garam ditabur bukan tanda mendidih lebih cepat: butir garam menjadi tempat lahirnya gelembung uap yang sudah "siap" terbentuk. Bab ini menjelaskan mengapa, dan cara menghitungnya.

24.1**Sifat koligatif: yang dihitung kepala, bukan wajah**

Ambil dua gelas air. Ke gelas pertama larutkan satu sendok gula, ke gelas kedua satu sendok garam. Rasanya jelas berbeda: manis dan asin. Namun ada empat sifat larutan yang sama sekali tidak peduli pada rasa, warna, atau bau zat terlarut. Keempat sifat itu hanya "menghitung kepala": berapa banyak partikel zat terlarut yang menyelip di antara molekul pelarut.

Bahasa sederhana • Bayangkan pintu gerbong kereta pada jam sibuk. Molekul air adalah penumpang yang ingin turun ke peron. Zat terlarut adalah penumpang lain yang berdiri di dekat pintu dan tidak ikut turun. Siapa pun mereka, makin banyak orang yang menghalangi pintu, makin sedikit penumpang yang berhasil turun setiap menit. Yang penting jumlahnya, bukan siapa orangnya. Begitulah cara kerja sifat koligatif.



DEFINISI • SIFAT KOLIGATIF

Sifat koligatif larutan adalah sifat yang hanya bergantung pada **banyaknya partikel zat terlarut** (molekul atau ion) dalam sejumlah pelarut, tidak bergantung pada jenis zat terlarutnya. Ada empat sifat koligatif: **penurunan tekanan uap, kenaikan titik didih, penurunan titik beku, dan tekanan osmotik**. Kata *koligatif* berasal dari bahasa Latin *colligatus*, "terikat bersama". Rumus-rumus di bab ini berlaku tepat untuk larutan **encer** dengan zat terlarut yang **tidak mudah menguap**.

Sifat koligatif	Apa yang terjadi	Rumus (nonelektrolit)	Satuan konsentrasi	Contoh di sekitar kita
Penurunan tekanan uap	uap pelarut di atas larutan berkurang	$\Delta P = X_t P^\circ$	fraksi mol	air laut lebih lambat menguap daripada air tawar
Kenaikan titik didih	larutan mendidih di atas titik didih pelarut	$\Delta T_b = K_b m$	molalitas	cairan pendingin radiator lebih tahan mendidih
Penurunan titik beku	larutan membeku di bawah titik beku pelarut	$\Delta T_f = K_f m$	molalitas	es puter; air laut baru membeku pada $\pm -1,9^\circ\text{C}$
Tekanan osmotik	pelarut merembes melewati membran menuju larutan	$\pi = M R T$	molaritas	cairan infus, ikan asin, air minum dari air laut

Untuk larutan elektrolit seperti garam dapur, setiap rumus di atas dikalikan dengan **faktor van 't Hoff** i , yaitu banyaknya partikel yang dihasilkan setiap satuan zat (subbab 24.6). Kedua satuan konsentrasi yang paling sering dipakai di bab ini sudah kamu kenal dari Bab 23:

$$m = \frac{n_t}{\text{kg pelarut}} = \frac{g}{M_r} \times \frac{1000}{p} \qquad X_t = \frac{n_t}{n_t + n_l}$$

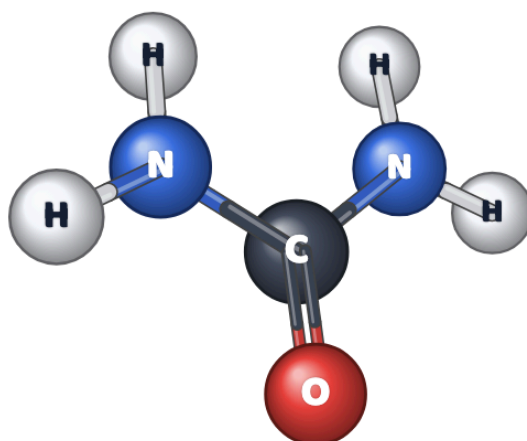
Di sini g adalah massa zat terlarut (gram), p massa pelarut (gram), n_t mol zat terlarut, dan n_p mol pelarut. Satu kilogram air berisi $1000/18 = 55,5$ mol molekul air.



AWAS JEBAKAN

Molalitas tidak sama dengan molaritas. **Molalitas** (m , mol/kg) dihitung per kilogram **pelarut**; **molaritas** (M , mol/L) dihitung per liter **larutan**. Titik didih dan titik beku memakai molalitas karena massa tidak ikut memuai saat suhu berubah, sedangkan tekanan osmotik memakai molaritas. Untuk larutan encer dalam air, nilai keduanya hampir sama.

MOLEKUL 3D Satu molekul, satu partikel: zat terlarut nonelektrolit



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Urea $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$

Mr $\approx 60,06$

[PubChem](#)

Pupuk nitrogen paling banyak dipakai petani Indonesia (46% N).

Kelima zat ini larut dalam air tanpa pecah menjadi ion, jadi satu molekul tetap satu partikel. Bandingkan ukurannya: sukrosa (gula pasir, 45 atom) jauh lebih besar daripada urea (8 atom). Namun dalam larutan 1 molal, titik beku keduanya sama persis, yaitu $-1,86^\circ\text{C}$. Etilen glikol adalah bahan utama cairan pendingin radiator.

24.2 Penurunan tekanan uap: hukum Raoult

Petani garam di pesisir Madura mengalirkan air laut ke petak-petak tambak lalu membiarkan matahari bekerja. Air menguap, garam tertinggal. Pernahkah kamu memperhatikan bahwa air laut menguap sedikit lebih lambat daripada air tawar? Molekul air di permukaan air laut lebih "sulit" melepaskan diri.

Di dalam botol tertutup, sebagian molekul air di permukaan terus lepas menjadi uap, sementara sebagian uap kembali mengembun. Saat laju keduanya sama, tekanan yang diberikan uap itu disebut **tekanan uap jenuh**, P° . Makin panas airnya, makin banyak molekul yang cukup bertenaga untuk lepas, sehingga P° makin besar.

Suhu air

20 $^\circ\text{C}$

25 $^\circ\text{C}$

30 $^\circ\text{C}$

40 $^\circ\text{C}$

60 $^\circ\text{C}$

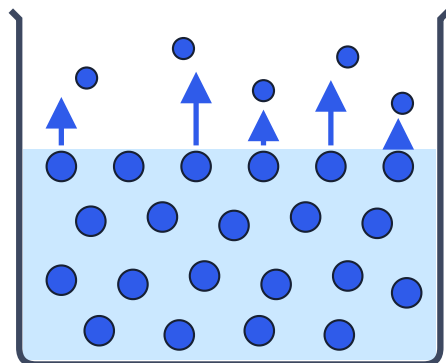
80 $^\circ\text{C}$

100 $^\circ\text{C}$

Tekanan uap jenuh P°

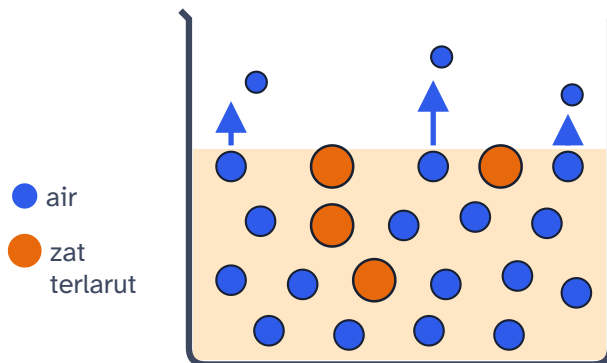
17,5 mmHg	23,8 mmHg	31,8 mmHg	55,3 mmHg	149 mmHg	355 mmHg	760 mmHg (1 atm)
--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------	---------------------

Air murni



semua tempat di permukaan diisi air
banyak yang lolos $\rightarrow P^\circ$

Larutan



sebagian permukaan diisi zat terlarut
lebih sedikit yang lolos $\rightarrow P < P^\circ$

Molekul air (biru) di permukaan larutan harus berbagi tempat dengan partikel zat terlarut (oranye), yang juga menarik molekul air di sekitarnya. Lebih sedikit molekul air yang lolos per detik, sehingga tekanan uap larutan lebih rendah.



HUKUM RAOULT

Untuk larutan dengan zat terlarut yang tidak mudah menguap, tekanan uap larutan sama dengan fraksi mol pelarut dikali tekanan uap pelarut murni:

$$P = X_p \cdot P^\circ \quad \Delta P = P^\circ - P = X_t \cdot P^\circ$$

X_p = fraksi mol pelarut, X_t = fraksi mol zat terlarut, dan $X_p + X_t = 1$. Penurunan tekanan uap ΔP sebanding dengan fraksi mol zat terlarut, tidak peduli zat apa itu.



TAMU DARI MASA LALU

Pada tahun 1880-an, kimiawan Prancis **François-Marie Raoult** dengan tekun mengukur titik beku dan tekanan uap puluhan larutan. Ia menemukan pola yang mengejutkan: satu mol zat terlarut apa pun (gula, urea, atau gliserol) menurunkan tekanan uap dan titik beku pelarut yang sama dengan besar yang hampir sama. Pola inilah yang kini kita sebut hukum Raoult. Data titik bekunya juga menjadi cara pertama yang praktis untuk menentukan massa molekul zat-zat baru.

$$P = \frac{n_p}{n_p + i n_t} \times P^\circ$$

Tekanan uap larutan = bagian pelarut di antara semua partikel $\times$ tekanan uap pelarut murni.

n_t Mol zat terlarut mol

n_p Mol pelarut mol

i Faktor van 't Hoff

P° Tekanan uap pelarut murni mmHg

P Tekanan uap larutan mmHg

TEKANAN UAP LARUTAN

31,24

mmHg

1 molal nonelektrolit dalam air: tekanan uap turun $\pm 1,8\%$

Fraksi mol pelarut **0,982**; tekanan uap turun **0,563** mmHg, yaitu **1,77** % dari tekanan uap pelarut murni.

Cek satuan: mol/mol (tanpa satuan) $\times$ mmHg = mmHg ✓

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

Sebanyak 18 g glukosa ($M_r = 180$) dilarutkan dalam 90 g air pada 30 °C. Tekanan uap air murni pada suhu itu 31,82 mmHg. Hitung tekanan uap larutan dan penurunannya.

- 1 Mol zat terlarut: $n_t = 18/180 = 0,1$ mol. Mol pelarut: $n_p = 90/18 = 5$ mol.
- 2 Fraksi mol air: $X_p = \frac{5}{5 + 0,1} = 0,980$.
- 3 Hukum Raoult: $P = 0,980 \times 31,82 = 31,20$ mmHg.
- 4 Penurunan: $\Delta P = 31,82 - 31,20 = 0,62$ mmHg (atau langsung $X_t P^\circ = \frac{0,1}{5,1} \times 31,82$).

$P = 31,20$ mmHg, turun 0,62 mmHg ($\pm 2\%$). Kecil, tetapi cukup untuk menaikkan titik didih dan menurunkan titik beku, seperti yang akan kamu lihat.



MENGAPA GARAM DAPUR "BASAH" DI MUSIM HUJAN?

Garam dapur biasa mengandung sedikit pengotor seperti magnesium klorida yang sangat suka air. Pengotor itu menyerap uap air dan membentuk lapisan tipis larutan garam jenuh di permukaan kristal. Tekanan uap larutan jenuh itu lebih rendah daripada tekanan uap air di udara yang lembap, sehingga uap air terus mengembun ke garam. Garamnya pun menggumpal dan basah. Inilah penurunan tekanan uap yang bisa kamu lihat di dapur!

24.3 Kenaikan titik didih

Air mendidih ketika tekanan uapnya sama dengan tekanan udara di atasnya. Di tepi pantai (1 atm = 760 mmHg), hal itu terjadi pada 100 °C. Larutan punya tekanan uap yang lebih rendah, jadi pada 100 °C tekanan uapnya belum mencapai 760 mmHg. Larutan harus dipanaskan *sedikit lebih tinggi* untuk mendidih. Selisih suhu itu disebut **kenaikan titik didih**, ΔT_b (b dari *boiling*).

Bahasa sederhana • Ingat pintu kereta tadi. Karena zat terlarut menghalangi molekul air keluar, air harus diberi "dorongan" lebih kuat agar cukup banyak molekul yang lolos untuk membentuk gelembung uap. Dorongan itu adalah suhu yang lebih tinggi. Jadi air garam mendidih sedikit di atas 100 °C.



ATURAN • KENAIKAN TITIK DIDIH

Untuk larutan encer nonelektrolit:

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \qquad T_b \text{ larutan} = T_b \text{ pelarut} + \Delta T_b$$

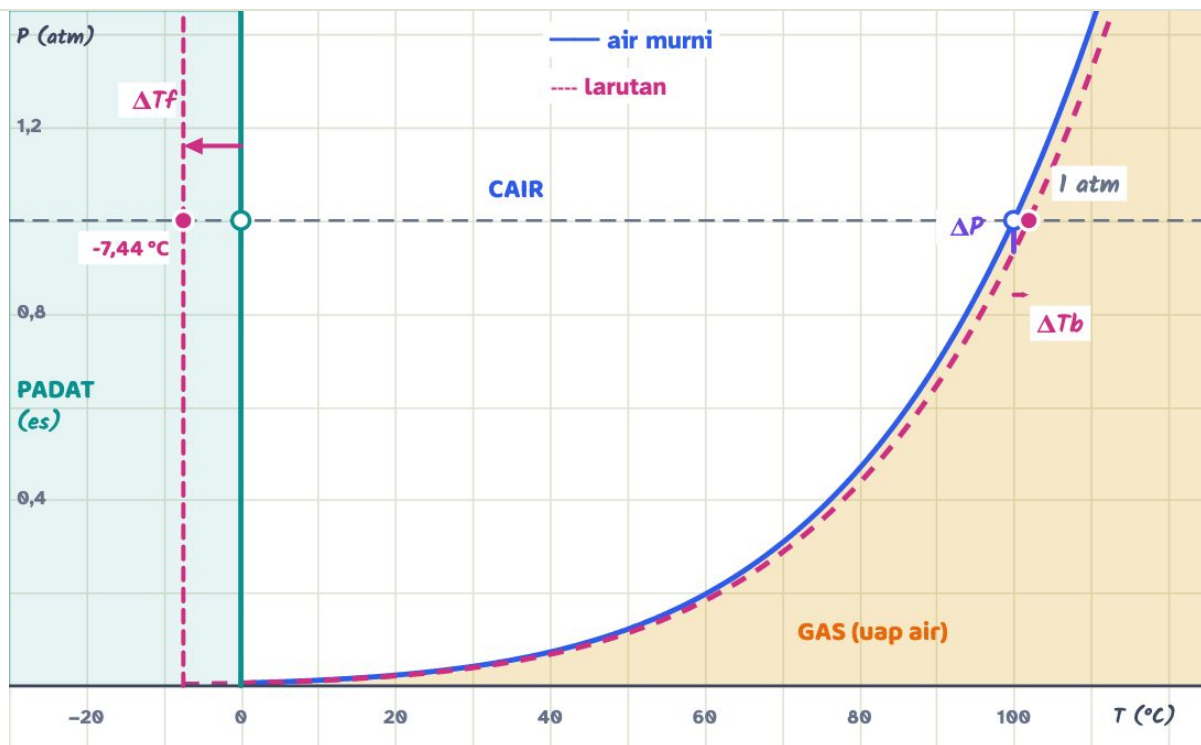
K_b adalah **tetapan kenaikan titik didih molal**, khas untuk setiap pelarut (air: 0,52 °C·kg/mol). Artinya, setiap 1 mol partikel zat terlarut dalam 1 kg air menaikkan titik didih sebesar 0,52 °C.

Pelarut	Titik beku (°C)	K_f (°C·kg/mol)	Titik didih (°C)	K_b (°C·kg/mol)
Air	0	1,86	100	0,52
Benzena	5,5	5,12	80,1	2,53
Etanol	-114,6	1,99	78,4	1,22
Asam asetat	16,6	3,90	117,9	2,93
Sikloheksana	6,6	±20	80,7	2,79
Kamfer (kapur barus alami)	±179	±40	±207	±5,6

Grafik Hidup berikut adalah **diagram fasa** air (Bab 2) yang diperbesar di sekitar 0–100 °C. Garis biru adalah air murni, garis putus-putus magenta adalah larutan. Tambahkan zat terlarut dan perhatikan: kurva tekanan uap larutan **turun**, sehingga baru memotong garis 1 atm pada suhu yang lebih tinggi. Garis beku larutan **bergeser ke kiri**. Satu penyebab, tiga akibat.

$$\Delta T_f = K_f m i \quad \Delta T_b = K_b m i$$

$$T_f = -7,44^\circ\text{C} \quad T_b \approx 102,08^\circ\text{C}$$



i = 2: seperti NaCl yang terionisasi sempurna

$$\Delta T_f = K_f \cdot m \cdot i$$

$$7,44^\circ\text{C}$$

titik beku larutan

$$-7,44^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$$

$$2,08^\circ\text{C}$$

titik didih (kurva Raoult)

$$101,95^\circ\text{C}$$

P uap larutan pada 100 °C

$$0,933 \text{ atm}$$

Geser molalitas dari 0 ke 4. Panah magenta di kiri adalah ΔT_f , panah di kanan adalah ΔT_b , dan garis ungu di 100 °C adalah penurunan tekanan uap ΔP . Perhatikan: ΔT_f selalu $\pm 3,6$ kali ΔT_b karena $K_f/K_b = 1,86/0,52$. Bandingkan dua bacaan titik didih: kurva Raoult dan rumus $K_b m i$ cocok untuk larutan encer, tetapi mulai berbeda saat larutan pekat. Wilayah kuning adalah daerah gas.

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$$

Setiap mol partikel zat terlarut dalam satu kilogram pelarut menaikkan titik didih sebesar K_b derajat.

K_b Tetapan titik didih molal $^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg/mol}$

m Molalitas mol/kg

i Faktor van 't Hoff

ΔT_b Kenaikan titik didih $^{\circ}\text{C}$

KENAIKAN TITIK DIDIH

0,52

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

💧 pelarut air

Konsentrasi partikel **1** mol/kg. Kalau pelarutnya air (K_b 0,52), larutan ini mendidih pada **100,52 $^{\circ}\text{C}$** .

Cek satuan: $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg/mol}) \times (\text{mol/kg}) = ^{\circ}\text{C}$ ✓

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

CONTOH Seberapa tinggi air gula mendidih?

Sebanyak 34,2 g gula pasir (sukrosa, $M_r = 342$) dilarutkan dalam 500 g air. Pada tekanan 1 atm, berapa titik didih larutan? (K_b air = $0,52\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg/mol}$)

- 1 Mol gula: $n = 34,2/342 = 0,1\text{ mol}$.
- 2 Molalitas: $m = 0,1\text{ mol}/0,500\text{ kg} = 0,2\text{ mol/kg}$.
- 3 $\Delta T_b = K_b \cdot m = 0,52 \times 0,2 = 0,104\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 4 $T_b = 100 + 0,104 = 100,104\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Larutan mendidih pada $\pm 100,10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tiga sendok makan gula hanya menaikkan titik didih seperseratus derajat. Memasak sirup kental, yang gulanya jauh lebih banyak, bisa mencapai $105\text{--}115\text{ }^{\circ}\text{C}$.

MITOS

"Garam membuat air lebih cepat mendidih."

MITOS

"Air radiator diberi cairan pendingin supaya tidak beku. Di Indonesia itu tidak perlu."

FAKTA

Garam justru menaikkan titik didih, walau hanya sedikit. Air garam butuh sedikit lebih banyak kalor untuk mendidih. Gelembung yang muncul saat garam ditabur berasal dari butir garam yang menjadi tempat gelembung terbentuk.

FAKTA

Di negeri tropis, cairan pendingin (campuran air dan etilen glikol) terutama menaikkan titik didih sehingga mesin panas tidak cepat membuat air mendidih, dan mengandung zat antikarat.

MITOS

"Minum air laut bisa menghilangkan haus saat terdampar di laut."

MITOS

"Garam mendinginkan es karena garam itu dingin."

FAKTA

Air laut jauh lebih pekat daripada cairan tubuh. Ginjal harus membuang garam berlebih memakai air dari tubuh, sehingga dehidrasi makin parah.

FAKTA

Garam bersuhu ruang. Garam membuat es mencair di bawah $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan pencairan menyerap kalor dari sekitarnya. Dingin itu datang dari es yang mencair.

24.4 Penurunan titik beku: rahasia es puter

Pada 0 °C, es dan air murni hidup berdampingan dengan damai. Setiap detik, sejumlah molekul air menempel ke kristal es, dan jumlah yang sama lepas dari kristal. Sekarang larutkan garam ke dalam airnya. Ion-ion garam tidak bisa masuk ke dalam kisi kristal es, tetapi mereka "mengganggu" molekul air yang hendak menempel. Laju membeku turun, laju mencair tetap. Hasilnya: es mencair. Supaya keseimbangan kembali, suhu harus diturunkan. Inilah **penurunan titik beku**, ΔT_f (*f* dari *freezing*).

Bahasa sederhana • Gampangnya: zat terlarut membuat air "malas" membeku. Air garam baru membeku jika didinginkan di bawah 0 °C. Makin banyak partikel garam, makin dingin yang dibutuhkan. Karena itulah es di dalam campuran es dan garam terus mencair, dan pencairan itu menyedot panas dari sekitarnya.



ATURAN • PENURUNAN TITIK BEKU

Untuk larutan encer nonelektrolit:

$$\Delta T_f = K_f \cdot m \qquad T_f \text{ larutan} = T_f \text{ pelarut} - \Delta T_f$$

K_f adalah **tetapan penurunan titik beku molal** (air: 1,86 °C·kg/mol). Bila molalitas ditulis dari massa: $\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p}$.

$$\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p} \cdot i$$

Penurunan titik beku = $K_f \times \text{molalitas} \times \text{jumlah partikel per satuan zat}$.

g

Massa zat terlarut g

M_r

Massa molar zat terlarut g/mol

p

Massa air g

i

Faktor van 't Hoff

 ΔT_f

Penurunan titik beku °C

PENURUNAN TITIK BEKU

3,72

°C



garam dapur NaCl

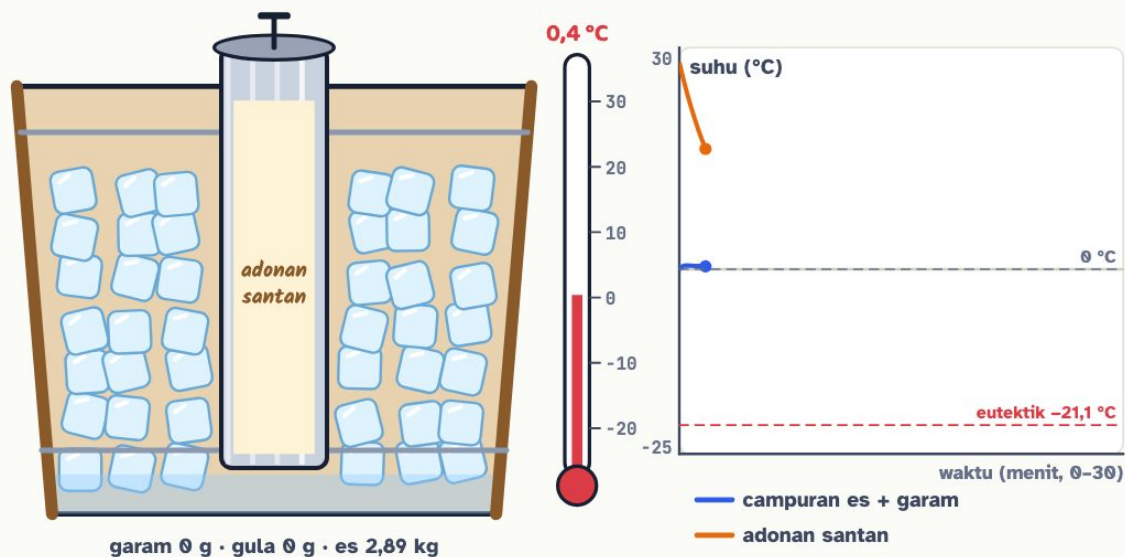
Molalitas **1** mol/kg, jadi larutan baru membeku pada **-3,72 °C**.

Cek satuan: (°C·kg/mol) × (g ÷ g/mol) × (1/kg) = °C ✓

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

Lalu dari mana datangnya dingin pada es puter? Saat garam ditabur ke es, garam larut di lapisan tipis air di permukaan es. Titik beku air garam itu jauh di bawah 0 °C, jadi es di sekitarnya mencair. Untuk mencair, setiap gram es membutuhkan 334 joule **kalor lebur**. Kalor itu diambil dari apa saja di dekatnya: dari es itu sendiri, dari air garam, dari dinding tong, dan dari adonan santan di dalam tabung logam. Suhu campuran terus turun sampai sama dengan titik beku air garamnya. Cobalah sendiri di Lab Mini berikut.

Tanpa garam, campuran es tertahan di 0 °C



Waktu

1,8 menit

Suhu es + air garam

0,4 °C

Titik beku air lelehan

-0 °C

Kadar garam air lelehan

0 %

Suhu adonan

16,1 °C

Adonan

masih cair

Tong berisi 3 kg es batu dan sedikit air lelehan. Adonan santan (28 °C) ada di tabung logam di tengah. Jalankan dulu **tanpa garam**: apakah adonan bisa membeku? Lalu tekan **Tabur garam** dan bandingkan dengan **Tabur gula** dalam takaran gram yang sama. Nyalakan **Putar tabung** seperti abang es puter. Bisakah suhunya turun di bawah -21 °C?

**KIMIA NUSANTARA • ES PUTER, ES KRIM TRADISIONAL**

Es puter disebut "puter" karena tabung adonannya diputar terus-menerus di dalam tong kayu berisi es batu dan garam kasar. Adonannya santan, gula, sedikit garam, dan rasa pilihan: kelapa muda, durian, nangka, alpukat, atau kacang hijau. Garam kasar dari tambak garam Madura dan pantai utara Jawa dipakai karena murah dan butirannya larut perlahan, sehingga dinginnya awet. Campuran es dan garam di dalam tong bisa mencapai ± -10 sampai -20 °C. Sambil memutar, penjual mengerok adonan yang membeku di dinding tabung agar kristal esnya kecil-kecil dan teksturnya lembut.

**FAKTA DARI KIMO**

Air laut (kadar garam $\pm 3,5\%$) baru membeku pada $\pm -1,9$ °C. Es yang terbentuk di laut kutub ternyata hampir tawar, karena ion garam tidak bisa masuk ke dalam kisi kristal es dan tertinggal di air laut di sekitarnya. Prinsip yang sama terjadi di tong es puter: es tetap air murni, garamnya berkumpul di air lelehan.



AWAS JEBAKAN

ΔT_f adalah **besarnya penurunan**, selalu bernilai positif, bukan titik bekunya. Titik beku larutan = titik beku pelarut $- \Delta T_f$. Untuk air, $\Delta T_f = 3,72^\circ\text{C}$ berarti larutan membeku pada $-3,72^\circ\text{C}$. Untuk pelarut benzena (titik beku $5,5^\circ\text{C}$), $\Delta T_f = 1,02^\circ\text{C}$ berarti larutan membeku pada $4,48^\circ\text{C}$, masih di atas nol!

COBA SENDIRI

Zat putih misterius

Laras menemukan sebungkus serbuk putih berlabel "pupuk N". Ia melarutkan 6,0 g serbuk itu (nonelektrolit) dalam 250 g air. Larutan membeku pada $-0,744^\circ\text{C}$. Tentukan M_r zat itu dan tebak identitasnya. (K_f air = $1,86^\circ\text{C}\cdot\text{kg/mol}$)

1 $\Delta T_f = 0 - (-0,744) = 0,744^\circ\text{C}.$

2 Rumus: $\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p}$, sehingga $M_r = \frac{K_f \cdot g \cdot 1000}{\Delta T_f \cdot p}.$

3 $M_r = \frac{1,86 \times 6,0 \times 1000}{0,744 \times 250} = \frac{11\,160}{186} = 60.$

$M_r = 60$. Pupuk nitrogen nonelektrolit dengan M_r 60 adalah urea, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (Bab 17). Sifat koligatif menjadi "timbangan molekuler"!



ADU CEPAT

Kilat titik beku

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-24

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$\Delta T_f = K_f \times m \times i$. Contoh: $m = 0,5$ dan $i = 2 \rightarrow 1,86 \times 0,5 \times 2 = 1,86^\circ\text{C}.$

**DARI MANA ANGKA 1,86 DAN 0,52? JUGA: BATAS EUTEKTIK**

Termodinamika (lewat hukum Raoult dan persamaan Clausius–Clapeyron) memberi rumus tetapan untuk larutan encer:

$$K_f = \frac{R T_f^2 M_{\text{pelarut}}}{\Delta H_{\text{lebur}}} \qquad K_b = \frac{R T_b^2 M_{\text{pelarut}}}{\Delta H_{\text{uap}}}$$

Untuk air ($M = 0,018015 \text{ kg/mol}$, $\Delta H_{\text{lebur}} = 6,01 \text{ kJ/mol}$, $\Delta H_{\text{uap}} = 40,7 \text{ kJ/mol}$): $K_f = \frac{8,314 \times 273,15^2 \times 0,018015}{6010} = 1,86 \text{ K}\cdot\text{kg/mol}$ dan $K_b = \frac{8,314 \times 373,15^2 \times 0,018015}{40660} = 0,513$

K·kg/mol. Kalor lebur air jauh lebih kecil daripada kalor uapnya, sehingga K_f lebih besar. Kamfer punya $K_f \approx 40$ karena kalor leburnya kecil dan titik lelehnya tinggi; itulah sebabnya kamfer dipakai untuk menentukan M_r dengan **metode Rast**.

Apakah es puter bisa terus didinginkan dengan menambah garam? Tidak. Pada kadar 23,3% NaCl dan suhu **−21,1 °C**, air garam berada dalam kesetimbangan dengan es *dan* kristal garam ($\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sekaligus. Titik ini disebut **titik eutektik**. Garam tambahan tidak lagi larut, jadi suhu tidak bisa turun lebih jauh. Rumus ideal memberi $\Delta T_f = 1,86 \times 5,19 \times 2 = 19,3 \text{ °C}$ untuk kadar itu; nilai nyata 21,1 °C lebih besar karena ion-ion terhidrasi "mengikat" sebagian molekul air sehingga air bebasnya lebih sedikit. Larutan pekat tidak lagi ideal.



Tantangan Rumah: es krim dalam kantong

Bahan: 2 kantong plastik klip berukuran kecil, 1 kantong plastik klip besar (atau kantong tebal), ± 2 gelas es batu yang dihancurkan, 6 sendok makan garam kasar, 1 gelas susu cair, 1 sendok makan gula, termometer dapur (bila ada), handuk kecil atau sarung tangan kain.

1. Masukkan susu dan gula ke kantong kecil, tutup rapat. Masukkan ke kantong kecil kedua (lapisan ganda supaya air garam tidak bocor masuk).
2. Isi kantong besar dengan es hancur. Ukur suhunya bila ada termometer.
3. Taburkan garam ke es, masukkan kantong susu, tutup kantong besar rapat.
4. Bungkus dengan handuk, lalu kocok dan remas perlahan selama 8–10 menit. Ukur lagi suhu campuran es dan garam.
5. Ulangi dengan gula sebagai pengganti garam di kantong besar. Mana yang lebih dingin?

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Campuran es dan garam bisa mencapai -10°C atau lebih rendah dan dapat melukai kulit seperti luka bakar dingin, jadi selalu pegang kantong dengan handuk atau sarung tangan dan jangan menempelkannya ke kulit lebih dari beberapa detik. Bila semua alat bersih dan khusus untuk makanan, es krimnya boleh dinikmati: bilas dulu bagian luar kantong kecil agar air garam tidak ikut masuk. Buang air garam ke wastafel sambil dialiri air.

Pertanyaan: Mengapa es yang ditaburi garam lebih dingin daripada es yang ditaburi gula dengan massa sama? Hitung perbandingan jumlah partikel dalam 1 g garam (M_r 58,5, $i = 2$) dan 1 g gula (M_r 342).

24.5

Tekanan osmotik: dinding yang pilih-pilih



Tebak Dulu!

Sebatang kentang mentah direndam dalam air garam pekat selama satu jam. Apa yang terjadi?

Garam masuk ke kentang, sehingga kentang makin berat dan makin keras.

Tidak terjadi apa-apa, karena garam tidak bisa menembus kentang.

Garam masuk dan air masuk sama banyak, sehingga massanya tetap.

Air keluar dari sel-sel kentang, sehingga kentang menjadi lemas dan lebih ringan.

Jawabannya: air keluar dari sel kentang. Membran sel kentang mudah dilewati air, tetapi sulit dilewati ion garam. Air berpindah dari cairan sel (lebih encer) ke air garam (lebih pekat). Sel kehilangan air, mengempis, dan kentang menjadi lentur. Peristiwa ini disebut **osmosis**, dan yang berpindah adalah *pelarutnya*, bukan garamnya.

Mengapa sawi yang diremas dengan garam menjadi layu dan berair saat membuat asinan? Mengapa ikan asin bisa awet berbulan-bulan tanpa kulkas? Jawabannya ada pada dinding tipis yang pilih-pilih.

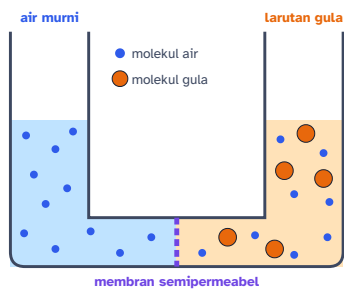


DEFINISI • OSMOSIS DAN TEKANAN OSMOTIK

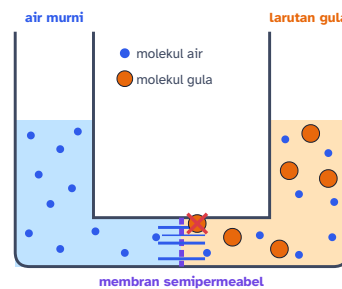
Membran semipermeabel adalah selaput yang dapat dilewati molekul pelarut (misalnya air), tetapi tidak dapat dilewati partikel zat terlarut. **Osmosis** adalah perpindahan pelarut melalui membran semipermeabel dari larutan yang **lebih encer** (atau pelarut murni) ke larutan yang **lebih pekat**.

Tekanan osmotik (π) adalah tekanan yang harus diberikan pada larutan untuk tepat menghentikan osmosis.

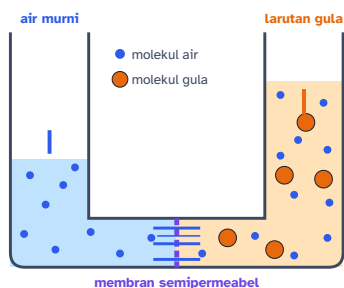
Bahasa sederhana • Membran semipermeabel bekerja seperti saringan teh yang sangat-sangat halus: lubangnya cukup besar untuk molekul air yang kecil, tetapi terlalu sempit bagi molekul gula yang besar atau bagi ion yang terbungkus molekul air. Air merembes ke sisi yang lebih pekat seolah-olah ingin "mengencerkan" larutan itu.



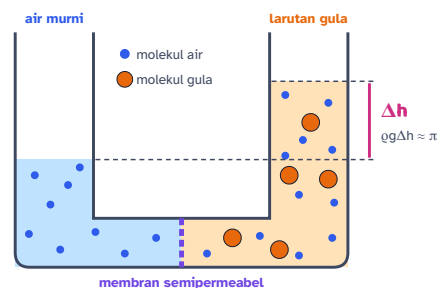
Langkah 1. Pipa U dengan membran semipermeabel di dasar. Kiri: air murni. Kanan: larutan gula. Mula-mula tinggi permukaan keduanya sama.



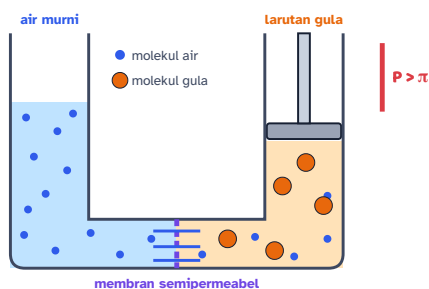
Langkah 2. Molekul air menembus membran ke dua arah, tetapi dari kiri lebih sering, karena di kanan sebagian molekul air "sibuk" di sekitar molekul gula. Molekul gula terlalu besar: tidak bisa lewat.



Langkah 3. Akibatnya air mengalir bersih ke kanan. Permukaan kanan naik, kiri turun. Larutan gula menjadi sedikit lebih encer.



Langkah 4. Aliran berhenti saat tekanan hidrostatis kolom setinggi Δh kira-kira sama dengan tekanan osmotik larutan: $\pi \approx \rho g \Delta h$.



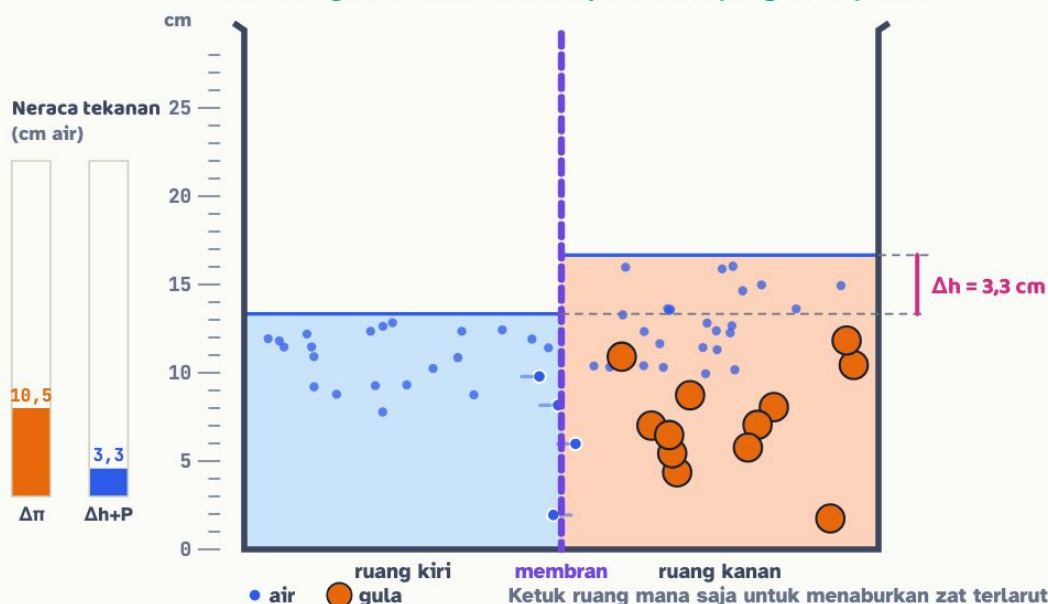
Langkah 5. Osmosis balik: tekan larutan dengan piston bertekanan lebih besar daripada π . Air didorong ke kiri, gula tertahan. Begitulah air tawar dibuat dari air laut.



AWAS JEBAKAN

Dalam osmosis, yang berpindah adalah **pelarut** (air), bukan zat terlarut. Arahnya dari larutan encer ke larutan pekat, seolah-olah air "mengejar" partikel zat terlarut. Kalau zat terlarut yang menyebar dari pekat ke encer, itu namanya **difusi**, dan difusi tidak membutuhkan membran semipermeabel.

Air mengalir ke kanan, menuju larutan yang lebih pekat



Beda tinggi Δh (kanan – kiri)
3,3 cm

Selisih tekanan osmotik $\Delta\pi$
10,5 cm air

Aliran air bersih
ke kanan →

Molekul air menyeberang
→ 9 • ← 2

Molekul air (titik biru kecil) menyeberangi membran ke dua arah; partikel zat terlarut selalu terpantul. Atur jumlah zat terlarut di kiri dan kanan, atau **ketuk salah satu ruang** untuk menaburkan zat terlarut. Kapan permukaan berhenti bergerak? Coba samakan kepekatan kedua ruang (isotonik). Lalu ganti gula dengan garam dalam jumlah satuan yang sama: mengapa kolom naik lebih tinggi? Terakhir, beri tekanan piston yang besar untuk melihat **osmosis balik**.



HUKUM VAN 'T HOFF • TEKANAN OSMOTIK

Untuk larutan encer nonelektrolit, tekanan osmotik mirip dengan tekanan gas ideal:

$$\pi = M \cdot R \cdot T \quad (\text{bandingkan } P = \frac{n}{V}RT)$$

M = molaritas (mol/L), $R = 0,082 \text{ L}\cdot\text{atm}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, dan T = suhu dalam **kelvin**. Hasilnya dalam atm.

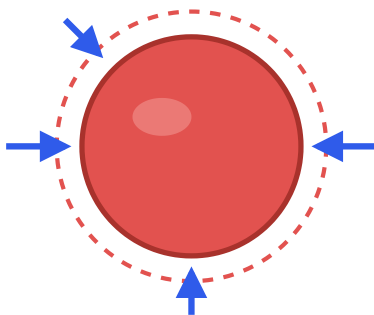


TAMU DARI MASA LALU

Pada 1748, **Jean-Antoine Nollet** dari Prancis menutup bejana berisi alkohol dengan selaput kandung kemih hewan lalu merendamnya dalam air. Selaputnya menggebu, bahkan pecah: air merembes masuk. Tahun 1877, ahli botani Jerman **Wilhelm Pfeffer** membuat membran semipermeabel buatan di dalam pot tanah liat berpori dan berhasil mengukur tekanan osmotik larutan gula. Dari data Pfeffer, **Jacobus van 't Hoff** dari Belanda menemukan (1886) bahwa tekanan osmotik mengikuti rumus yang mirip hukum gas ideal. Atas penemuan ini dan karyanya tentang laju reaksi, ia menerima **Hadiah Nobel Kimia yang pertama** pada 1901.

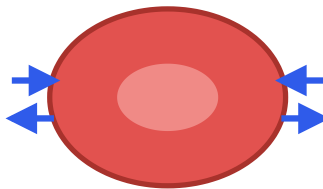
Sel-sel tubuh kita dibungkus membran yang bersifat semipermeabel. Karena itu, kepekatan cairan di sekeliling sel sangat penting. Dua larutan yang tekanan osmotiknya sama disebut **isotonik**. Larutan yang tekanan osmotiknya lebih rendah disebut **hipotonik**, dan yang lebih tinggi disebut **hipertonik**.

Hipotonik (air suling)



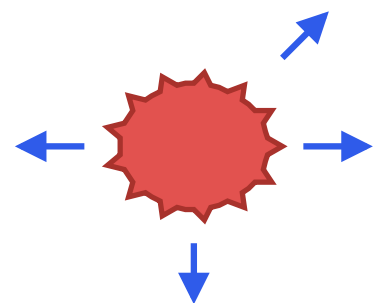
air masuk → sel menggebu,
bisa pecah (hemolisis)

Isotonik (NaCl 0,9%)



air masuk = air keluar
→ bentuk sel normal

Hipertonik (NaCl 3%)



air keluar → sel mengerut
(krenasi)

Sel darah merah dalam tiga lingkungan. Panah biru menunjukkan arah aliran air. Itulah sebabnya cairan infus harus isotonik dengan darah.

$$\pi = M \cdot R \cdot T \cdot i$$

Tekanan osmotik = konsentrasi partikel $\times R \times$ suhu mutlak, seperti tekanan gas ideal.

M Molaritas mol/L

T Suhu mutlak K

i Faktor van 't Hoff

π Tekanan osmotik atm

TEKANAN OSMOTIK

7,83

atm

💧 **±isotonik dengan darah (±7,7 atm)**

Konsentrasi partikel **0,308** mol/L. Tekanan sebesar ini setara dengan kolom air setinggi **80,877** meter!

Cek satuan: (mol/L) $\times$ (L·atm/(mol·K)) $\times$ K = atm ✓

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

COBA SENDIRI

Mengapa infus memakai NaCl 0,9%?

Cairan infus "NaCl 0,9%" berisi 0,9 g NaCl dalam setiap 100 mL larutan. Hitung tekanan osmotiknya pada suhu tubuh (37 °C), dengan menganggap NaCl terionisasi sempurna, lalu bandingkan dengan tekanan osmotik darah (±7,7 atm). (M_r NaCl = 58,5; $R = 0,082$ L·atm/(mol·K))

1 Massa NaCl per liter: $0,9 \text{ g} \times 10 = 9 \text{ g/L}$, jadi $M = 9/58,5 = 0,154 \text{ mol/L}$.

2 $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$, jadi $i = 2$.

3 $T = 37 + 273 = 310 \text{ K}$.

4 $\pi = MRTi = 0,154 \times 0,082 \times 310 \times 2 = 7,8 \text{ atm}$.

$\pi \approx 7,8 \text{ atm}$, hampir sama dengan darah (±7,7 atm): isotonik. Sel darah merah tidak menggembung dan tidak mengerut. Infus glukosa 5% (50 g/L, M_r 180, $i = 1$) memberi $\pi = 0,278 \times 0,082 \times 310 = 7,1 \text{ atm}$, juga mendekati isotonik.

Bagaimana jika osmosis kita "putar balik"? Bila larutan pekat ditekan dengan tekanan yang lebih besar daripada tekanan osmotiknya, air murni justru terdorong keluar melewati membran, meninggalkan garam di belakang. Inilah **osmosis balik** (*reverse osmosis*). Air laut punya tekanan osmotik $\pm 27\text{--}30$ atm, sehingga mesin desalinasi menekannya dengan $\pm 55\text{--}80$ atm melewati membran polimer berpori sangat halus. Air tawar keluar di satu sisi, air yang sangat asin dibuang di sisi lain.



KIMIA NUSANTARA • DARI IKAN ASIN SAMPAI KAPAL DI TENGAH LAUT

Ikan asin di pesisir utara Jawa dan banyak pantai Nusantara dibuat dengan menimbun ikan dalam garam lalu menjemurnya. Garam menarik air keluar dari sel daging ikan. Bakteri pembusuk yang hinggap juga ikut kehilangan air, sehingga tidak bisa berkembang biak. **Manisan pala** khas Bogor dan manisan mangga memakai gula dengan prinsip yang sama.

Asinan sayur dibuat dengan meremas sawi atau kol bersama garam: sayur menjadi layu dan airnya keluar, sehingga bumbu lebih meresap dan sayur lebih awet. Petani juga tahu bahwa pupuk yang ditabur terlalu banyak membuat tanaman layu, karena tanah di sekitar akar menjadi hipertonik.

Di tengah laut, banyak **kapal** membuat air minum sendiri dengan mesin **osmosis balik**. Beberapa pulau kecil yang sulit mendapat air tanah tawar juga memakai instalasi serupa.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MENGAPA OSMOSIS TERJADI? BUKAN "DIDORONG", MELAINKAN ENTROPI

Molekul gula tidak "menarik" air seperti magnet. Penyebab osmosis adalah kecenderungan alami zat untuk bercampur (entropi). Dalam bahasa termodinamika, **potensial kimia** air dalam larutan lebih rendah daripada dalam air murni: $\mu_{\text{air}} = \mu^\circ + RT \ln X_{\text{air}}$, dengan $X_{\text{air}} < 1$. Air berpindah dari potensial kimia tinggi ke rendah. Tekanan tambahan π menaikkan potensial kimia larutan sebesar $\pi \bar{V}$ ($\bar{V}$ = volume molar air), sehingga kesetimbangan tercapai bila

$$\pi \bar{V} = -RT \ln X_{\text{air}} \approx RT X_t \implies \pi \approx \frac{n_t}{V} RT$$

Pendekatan $-\ln X_{\text{air}} \approx X_t$ hanya berlaku untuk larutan encer. Itulah sebabnya rumus van 't Hoff, sama seperti hukum gas ideal, adalah pendekatan.



Tantangan Rumah: kentang yang kehausan

Bahan: 1 kentang besar (atau wortel), pisau dapur dan talenan, penggaris, timbangan dapur digital, 3 gelas plastik bening, garam, sendok makan, air, tisu, stopwatch HP.

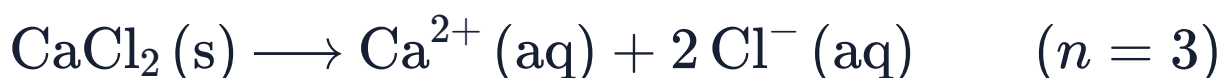
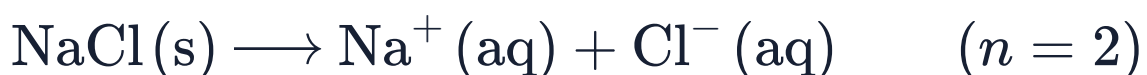
1. Bersama orang dewasa, potong kentang menjadi 3 batang berukuran sama ($\pm 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$). Ukur panjang dan timbang massanya.
2. Gelas A: air tawar. Gelas B: 1 sendok teh garam dalam 1 gelas air. Gelas C: 3 sendok makan garam dalam 1 gelas air.
3. Rendam satu batang di setiap gelas selama 45–60 menit.
4. Angkat, keringkan permukaannya dengan tisu, lalu ukur panjang dan massanya lagi. Coba tekuk perlahan: mana yang kaku, mana yang lentur?

Keselamatan: pisau tajam: potong di atas talenan, arahkan pisau menjauhi tubuh, dan minta orang dewasa memotongkan bila belum terbiasa. Buang bagian kentang yang berwarna hijau, dan jangan memakan kentang mentah yang sudah direndam. Air garam pekat terasa perih pada luka dan mata; bila terkena mata, bilas dengan air mengalir. Cuci tangan setelah selesai, buang kentang ke tempat sampah organik.

Pertanyaan: Pada gelas mana kentang bertambah berat dan pada gelas mana berkurang? Ke arah mana air bergerak? Kira-kira berapa kepekatan garam yang membuat massa kentang tidak berubah (isotonik)?

24.6 Larutan elektrolit dan faktor van 't Hoff

Kimo benar: garam memang lebih "jago" daripada gula. Satu molekul gula yang larut tetap satu partikel. Namun satu satuan rumus garam dapur yang larut pecah menjadi dua ion, ion natrium **Na** dan ion klorida **Cl**. Untuk sifat koligatif yang hanya menghitung kepala, dua ion berarti dua partikel.



Bahasa sederhana • Bayangkan satu bungkus kerupuk yang dibuka dan isinya tumpah menjadi beberapa keping. Gula seperti bungkus yang tidak dibuka: tetap satu. Garam dapur pecah menjadi dua keping, kalsium klorida menjadi tiga keping. Makin banyak keping, makin kuat pengaruhnya pada titik beku dan titik didih.



ATURAN • FAKTOR VAN 'T HOFF

Untuk elektrolit yang terurai menjadi n ion dengan **derajat ionisasi** α (bagian zat yang terionisasi, 0 sampai 1):

$$i = 1 + (n - 1) \alpha$$

Semua rumus sifat koligatif dikalikan i : $\Delta T_b = K_b m i$, $\Delta T_f = K_f m i$, $\pi = MRT i$, dan pada hukum Raoult $X_t = \frac{i n_t}{i n_t + n_p}$. Elektrolit kuat: $\alpha \approx 1$, jadi $i \approx n$. Nonelektrolit: $i = 1$.

▼ Mengapa $i = 1 + (n - 1) \alpha$?

Misalkan mula-mula ada 1 mol zat. Sebanyak α mol terionisasi, masing-masing menghasilkan n ion; sisanya $(1 - \alpha)$ mol tetap utuh. Jumlah partikel = $(1 - \alpha) + n\alpha = 1 + (n - 1)\alpha$. Contoh: asam asetat 0,1 M dengan $\alpha = 0,013$ memberi $i = 1 + 0,013 = 1,013$, nyaris seperti nonelektrolit.

RUMUS HIDUP Faktor van 't Hoff

$$i = 1 + (n - 1) \alpha$$

Jumlah partikel dari setiap satuan zat setelah sebagian atau seluruhnya terurai menjadi ion.

 n

Jumlah ion per satuan rumus

 α

Derajat ionisasi

 i

Faktor van 't Hoff

FAKTOR VAN 'T HOFF

2elektrolit kuat ideal: $i = n$ NaCl, KCl, KNO₃

Setiap 100 satuan zat menjadi **200** partikel di dalam larutan.

Cek satuan: tanpa satuan (partikel per satuan zat)

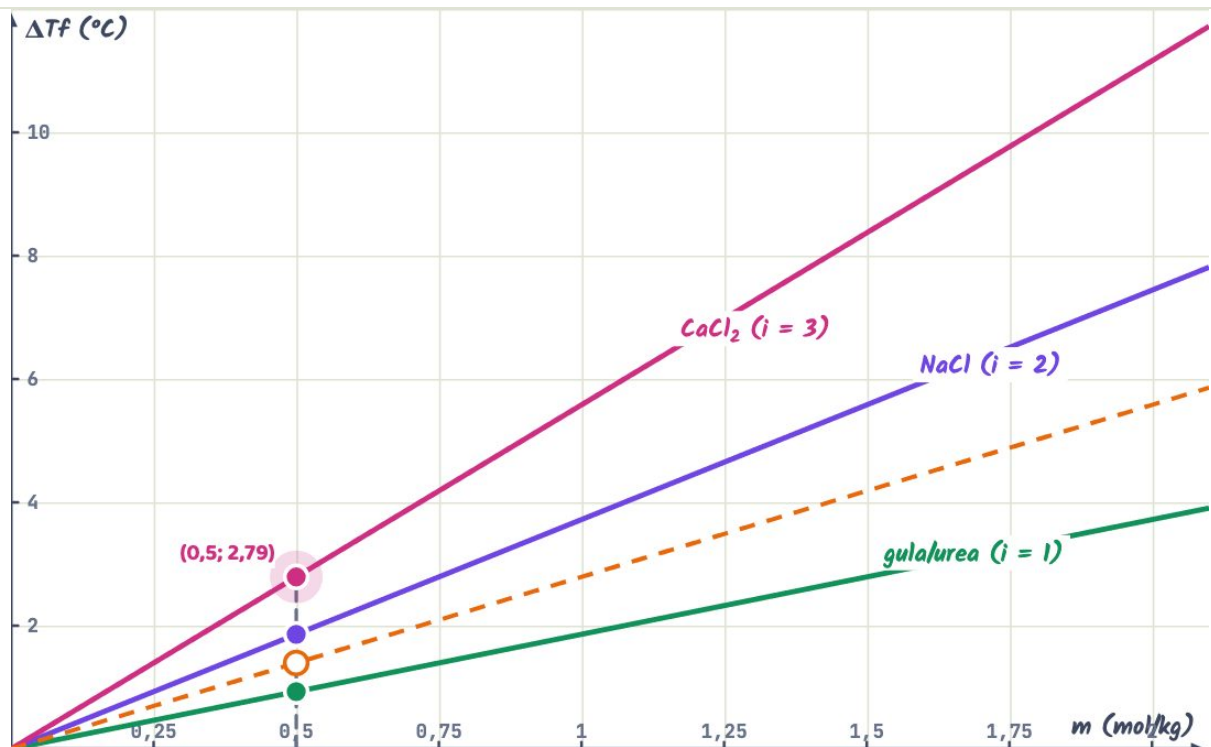
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KOLIGATIF-VANTHOFF

Kenyataannya sedikit berbeda dari hitungan ideal. Ion-ion yang muatannya berlawanan kadang saling menempel sesaat membentuk **pasangan ion**, sehingga jumlah partikel bebas sedikit lebih kecil. Efek ini makin besar untuk ion bermuatan tinggi dan larutan pekat.

Zat ($\pm 0,05$ mol/L)	Ion yang terbentuk	i ideal	i terukur (perkiraan)
Sukrosa (gula pasir)	tidak ada (molekul utuh)	1	1,0
NaCl	Na^+ , Cl^-	2	1,9
MgSO_4	Mg^{2+} , SO_4^{2-}	2	1,3
MgCl_2	Mg^{2+} , 2Cl^-	3	2,7
FeCl_3	Fe^{3+} , 3Cl^-	4	3,4

$$\Delta T_f = K_f \cdot m \cdot i$$

$m = 0,5$: $\Delta T_f(\text{gula}) = 0,93$, $\Delta T_f(\text{NaCl}) = 1,86$, $\Delta T_f(\text{CaCl}_2)$

gula ($i = 1$)**0,93 °C**NaCl ($i = 2$)**1,86 °C**CaCl₂ ($i = 3$)**2,79 °C**

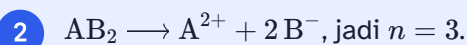
elektrolit AB (oranye)

1,4 °C i elektrolit AB**1,5**

Seret titik magenta ke kanan. Pada molalitas yang sama, garis CaCl₂ tiga kali lebih curam daripada garis gula, karena setiap satuannya menghasilkan tiga partikel. Garis oranye putus-putus adalah elektrolit AB yang hanya sebagian terionisasi: geser α dari 0 ke 1 dan lihat garisnya berpindah dari "gula" ke "NaCl".

Larutan 0,1 molal suatu elektrolit AB_2 dalam air membeku pada $-0,465\text{ }^{\circ}\text{C}$. Berapa derajat ionisasi α elektrolit itu? (K_f air = $1,86\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg/mol}$)

$$1 \quad \Delta T_f = 0,465\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ jadi } i = \frac{\Delta T_f}{K_f m} = \frac{0,465}{1,86 \times 0,1} = 2,5.$$



$$3 \quad i = 1 + (n - 1)\alpha \Rightarrow 2,5 = 1 + 2\alpha \Rightarrow \alpha = 0,75.$$

$\alpha = 0,75$: tiga perempat satuan AB_2 terionisasi. Cek: $i = 1 + 2(0,75) = 2,5$ dan $\Delta T_f = 1,86 \times 0,1 \times 2,5 = 0,465\text{ }^{\circ}\text{C}$ ✓



TRIK KAK TIRTA

Keempat rumus sifat koligatif punya pola yang sama: **tetapan $\times$ konsentrasi partikel**. $\Delta P = P^{\circ} \cdot X_i$, $\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$, $\Delta T_f = K_f \cdot m \cdot i$, $\pi = RT \cdot M \cdot i$. Ingat tiga pertanyaan sebelum menghitung: **(1)** Ada ion? Kalikan i . **(2)** Titik didih/beku? Pakai molalitas (per kg pelarut). **(3)** Tekanan osmotik? Pakai molaritas dan suhu dalam kelvin. Seperti resep sambal: bahannya sedikit, tetapi urutannya jangan tertukar.



TAMU DARI MASA LALU

Van 't Hoff bingung: larutan garam selalu memberi penurunan titik beku dan tekanan osmotik yang hampir dua kali lipat dari perhitungan. Ia terpaksa menambahkan faktor koreksi i tanpa tahu sebabnya. Pada 1884–1887, ilmuwan muda Swedia **Svante Arrhenius** mengajukan gagasan berani: garam di dalam air terurai menjadi ion-ion bermuatan, bahkan tanpa dialiri listrik. Banyak profesor menertawakan gagasan itu, tetapi data sifat koligatif mendukungnya. Arrhenius menerima Hadiah Nobel Kimia pada 1903.

**MENENTUKAN M_R : MEMILIH SIFAT KOLIGATIF YANG TEPAT**

Keempat sifat koligatif dapat dipakai sebagai "timbangan molekul": ukur ΔT_f , ΔT_b , atau π , hitung jumlah mol partikel, lalu $M_r = \frac{\text{massa}}{\text{mol}}$. Namun kepekaannya sangat berbeda. Bayangkan 1,00 g protein hemoglobin ($M_r \approx 65\,000$) dalam 100 mL larutan pada 25 °C:

- Konsentrasi: $M = \frac{1,00/65\,000}{0,100} = 1,54 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$.
- $\Delta T_f \approx 1,86 \times 1,54 \times 10^{-4} = 2,9 \times 10^{-4} \text{ °C}$: terlalu kecil untuk diukur termometer biasa.
- $\pi = 1,54 \times 10^{-4} \times 0,082 \times 298 = 3,8 \times 10^{-3} \text{ atm} \approx 2,9 \text{ mmHg}$, setara kolom air $\pm 3,9 \text{ cm}$: mudah diukur!

Karena itu, M_r protein dan polimer ditentukan dengan **osmometri**, sedangkan zat kecil cukup dengan krioskopi (penurunan titik beku), termasuk metode Rast memakai kamfer.

Faktor i juga bisa **kurang dari 1** bila partikel bergabung. Dalam benzena, asam asetat membentuk dimer lewat ikatan hidrogen: $2 \text{CH}_3\text{COOH} \rightleftharpoons (\text{CH}_3\text{COOH})_2$. Jika fraksi β molekul berdimer, jumlah partikel = $(1 - \beta) + \beta/2 = 1 - \beta/2$. Data titik beku yang memberi $i \approx 0,5$ berarti hampir semua asam asetat berpasangan, sehingga M_r terukurnya ± 120 , bukan 60.

Kimia di sekitarmu**Es puter & es krim**

Es batu + garam kasar menurunkan titik beku air lelehan sampai suhu campuran ± -10 hingga -20 °C, cukup dingin untuk membekukan adonan santan.

**Infus & tetes mata**

Cairan infus NaCl 0,9%, infus glukosa 5%, obat tetes mata, dan cairan lensa kontak dibuat isotonik agar sel tidak menggembung atau mengerut.

**Ikan asin & manisan**

Garam dan gula pekat menarik air keluar dari sel bahan makanan dan dari sel bakteri, sehingga makanan awet tanpa kulkas.

**Air tawar dari laut**

Mesin osmosis balik di kapal dan pulau kecil menekan air laut melewati membran dengan tekanan di atas ± 27 atm sehingga garam tertahan.

**Cairan pendingin radiator**

Etilen glikol menaikkan titik didih air radiator di negeri tropis dan menurunkan titik bekunya bila mobil dibawa ke negeri bersalju.

**Asinan & pupuk**

Sawi yang diremas garam menjadi layu karena osmosis. Pupuk yang terlalu banyak membuat tanah di sekitar akar hipertonic sehingga tanaman layu.

Cek Cepat

Larutan-larutan berikut sama-sama 0,1 molal dalam air. Manakah yang titik didihnya paling tinggi?

Glukosa

Urea

MgCl₂

NaCl

Sel darah merah dimasukkan ke dalam air suling. Apa yang terjadi?

Sel menggembung dan bisa pecah

Sel mengerut

Sel tidak berubah

Garam dari sel berpindah ke air dan sel tetap utuh

Berapa tekanan osmotik larutan glukosa 0,1 M pada 27 °C? ($R = 0,082 \text{ L}\cdot\text{atm}/(\text{mol}\cdot\text{K})$)

0,22 atm

2,46 atm

4,92 atm

24,6 atm

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. B

RINGKASAN KILAT Bab 24 dalam 3 menit

☒ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **sifat koligatif** sebagai sifat yang hanya bergantung pada **jumlah partikel** zat terlarut, bukan jenisnya
- menghitung **penurunan tekanan uap** dengan hukum Raoult, **kenaikan titik didih**, dan **penurunan titik beku** larutan

- menjelaskan **osmosis** dan menghitung **tekanan osmotik**, misalnya cairan infus yang isotonik dengan darah
- memakai **faktor van 't Hoff** i untuk larutan elektrolit
- menentukan **massa molekul relatif** suatu zat dari data sifat koligatif

Istilah kunci

Sifat koligatif

tekanan uap jenuh

kenaikan titik didih

tetapan kenaikan titik didih molal

diagram fasa

penurunan titik beku

tetapan penurunan titik beku molal

titik eutektik

Membran semipermeabel

Osmosis

Tekanan osmotik

isotonik

hipotonik

hipertonik

osmosis balik

derajat ionisasi

Rumus penting

$$P = \frac{n_p}{n_p + i n_t} \times P^\circ$$

Hukum Raoult: tekanan uap larutan. Tekanan uap larutan = bagian pelarut di antara semua partikel $\times$ tekanan uap pelarut murni.

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i$$

Kenaikan titik didih. Setiap mol partikel zat terlarut dalam satu kilogram pelarut menaikkan titik didih sebesar K_b derajat.

$$\Delta T_f = K_f \cdot \frac{g}{M_r} \cdot \frac{1000}{p} \cdot i$$

Penurunan titik beku larutan dalam air. Penurunan titik beku = $K_f \times$ molalitas $\times$ jumlah partikel per satuan zat.

$$\pi = M \cdot R \cdot T \cdot i$$

Tekanan osmotik. Tekanan osmotik = konsentrasi partikel $\times R \times$ suhu mutlak, seperti tekanan gas ideal.

$$i = 1 + (n - 1) \alpha$$

Faktor van 't Hoff. Jumlah partikel dari setiap satuan zat setelah sebagian atau seluruhnya terurai menjadi ion.

Jangan sampai terjebak

- Molalitas tidak sama dengan molaritas.
- ΔT_f adalah besarnya penurunan, selalu bernilai positif, bukan titik bekunya.
- Dalam osmosis, yang berpindah adalah pelarut (air), bukan zat terlarut.

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

Teka-teki untuk Bab 25

Santan yang baru diperas tampak putih merata seperti larutan. Namun saat dimasak terlalu lama atau tidak diaduk, santan bisa "pecah": minyaknya memisah dan mengambang. Larutan gula tidak pernah pecah seperti itu. Apa sebenarnya santan? Dan mengapa partikel di dalam santan hampir tidak memengaruhi titik beku air?

▼ Intip petunjuk

Santan bukan larutan, melainkan **koloid** jenis emulsi: tetesan minyak yang sangat kecil tersebar di dalam air dan dijaga oleh protein kelapa. Partikel koloid jauh lebih besar dan jumlahnya jauh lebih sedikit daripada molekul gula, jadi efek koligatifnya sangat kecil, persis seperti hemoglobin di kotak Lanjut tadi. Di Bab 25 kamu akan menyorotkan senter ke santan dan melihat "pedang cahaya"!

25 Sistem Koloid: Dunia di Antara Larut dan Mengendap

Mengapa berkas senter tampak di kabut tetapi lenyap di air gula? Mengapa santan bisa "pecah", dan bagaimana sejumput tawas mengubah air sungai coklat menjadi jernih? Semua jawabannya ada pada partikel mungil berukuran 1 sampai 1000 nanometer.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **larutan**, **koloid**, dan **suspensi** dari ukuran partikel (1–1000 nm), efek Tyndall, pengendapan, dan penyaringan;
- menggolongkan **jenis koloid** (sol, emulsi, buih, gel, aerosol, buih padat, sol padat) dari fase terdispersi dan medium pendispersinya;
- menjelaskan **sifat koloid**: efek Tyndall, gerak Brown, adsorpsi, muatan, elektroforesis, koagulasi (aturan Hardy–Schulze), dan dialisis;
- membedakan koloid **liofil** dan **liofob**, serta menjelaskan kerja **sabun dan pengemulsi** dengan model misel;
- menjelaskan cara **membuat koloid** (kondensasi & dispersi) dan menghitung **dosis tawas** pada penjernihan air.

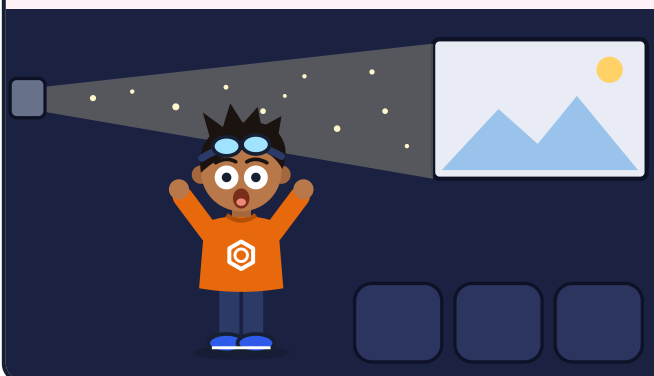
PEDANG CAHAYA

KOMIK • 4 PANEL

Malam nonton film di aula sekolah

BIMA

Lihat! Berkas proyekturnya kelihatan seperti pedang cahaya. Kok bisa, ya?

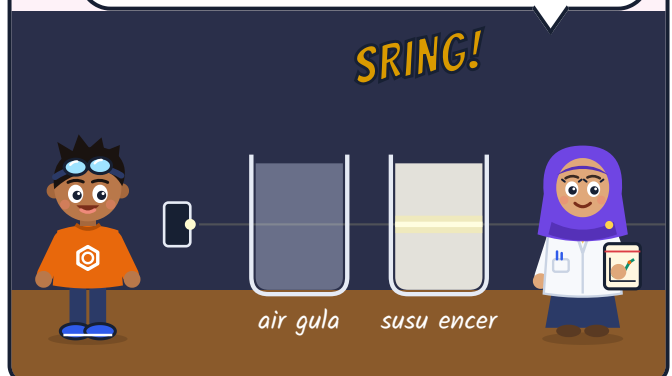


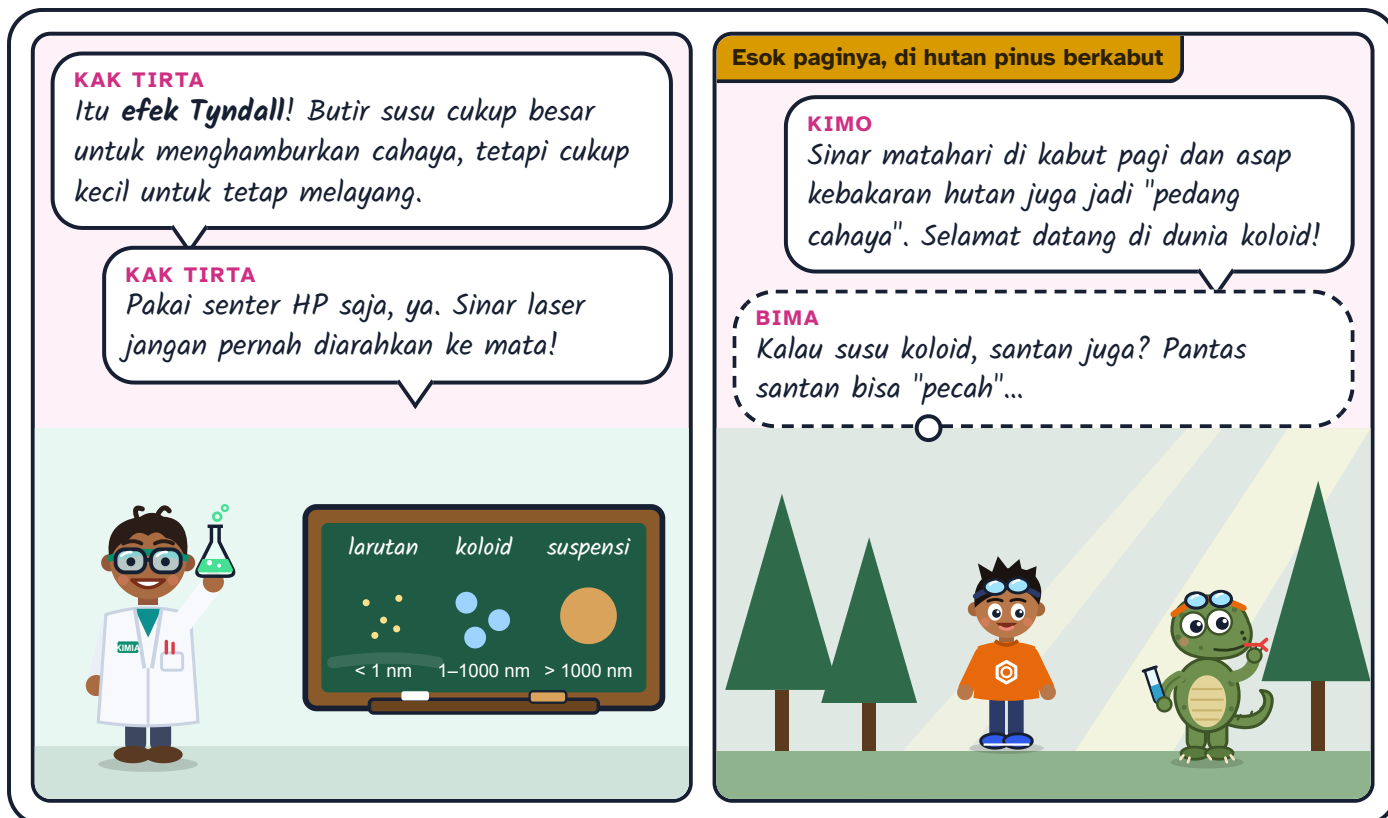
BIMA

Di air gula berkas senternya lenyap. Di susu encer malah terang!

LARAS

Dua-duanya cairan. Pasti bedanya di ukuran partikel. Aku catat dulu!





Tebak Dulu!

Di kamar gelap, Bima menyorotkan senter HP dari samping ke segelas air gula dan segelas susu encer. Di gelas mana berkas cahaya tampak jelas bila dilihat dari samping?

Di kedua gelas, karena keduanya cairan yang dilewati cahaya.

Hanya di air gula, karena air gula bening sehingga cahaya mudah lewat.

Hanya di susu encer.

Tidak di keduanya; berkas cahaya hanya tampak di udara berdebu.

Jawabannya: hanya di susu encer. Kita melihat berkas cahaya dari samping hanya jika ada partikel yang *menghamburkan* cahaya ke mata kita. Molekul gula terlalu kecil untuk itu, sehingga cahaya lewat "diam-diam". Butir lemak dan protein susu jauh lebih besar dan memantulkan cahaya ke segala arah. Ini disebut **efek Tyndall**, ciri khas koloid.

25.1 Larutan, koloid, atau suspensi?

Di Bab 3 kamu sudah mengenal **campuran homogen** (merata, satu fase) dan **campuran heterogen** (tidak merata). Ternyata ada "daerah abu-abu" di antara keduanya: campuran yang tampak merata oleh mata, tetapi di bawah mikroskop super ternyata berbutir. Inilah **koloid**.

Bahasa sederhana • Bayangkan tiga gelas air. Gelas pertama diberi gula: gulanya "hilang" karena terpecah menjadi molekul yang sangat kecil. Gelas kedua diberi susu: tampak putih merata, tetapi sebenarnya berisi butiran lemak mungil yang melayang. Gelas ketiga diberi tanah: butirannya besar, jadi lama-lama tenggelam ke dasar. Ketiganya berbeda karena **ukuran partikelnya** berbeda.

Penentunya adalah ukuran **partikel terdispersi** (zat yang tersebar) di dalam **medium pendispersi** (zat tempat menyebar). Satuan yang pas adalah **nanometer**: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, sepersejuta milimeter. Selebar rambutmu kira-kira 70.000 nm tebalnya!



DEFINISI • KOLOID

Koloid adalah campuran yang partikel terdispersinya berukuran sekitar **1-1000 nm** (10^{-9} – 10^{-6} m) dan tersebar dalam medium pendispersi. Koloid tampak homogen oleh mata, tetapi sebenarnya **heterogen** (dua fase). Bandingkan: **larutan** sejati berpartikel $< 1 \text{ nm}$ (ion atau molekul tunggal), sedangkan **suspensi** berpartikel $> 1000 \text{ nm}$.



Skala logaritma: setiap garis = 10 kali lebih besar

Dari ion sampai rambut. Koloid menempati wilayah luas di tengah, tiga "angka nol" lebarnya, dari 1 nm sampai 1000 nm (= 1 μm).

Sifat	Larutan	Koloid	Suspensi
Ukuran partikel	$< 1 \text{ nm}$	1-1000 nm	$> 1000 \text{ nm}$
Partikel terdispersi	ion atau molekul tunggal	gugus molekul, makromolekul, misel, butir halus	butir kasar
Jumlah fase	satu (homogen)	dua (tampak homogen)	dua (heterogen)
Kenampakan	jernih (boleh berwarna)	jernih sampai keruh	keruh
Bila didiamkan	tidak memisah	tidak memisah (stabil)	mengendap

Kertas saring biasa	lolos	lolos	tertahan
Membran semipermeabel	lolos	tertahan	tertahan
Efek Tyndall	tidak	ya , berkas tampak	cahaya terhalang butir kasar; butir lalu mengendap
Contoh	air gula, air garam, cuka, udara bersih	susu, santan, kabut, agar-agar, cat	air lumpur, kopi tubruk, air kapur sirih yang baru diaduk

Mengapa ukuran begitu penting? Partikel yang makin kecil punya **luas permukaan** yang makin besar untuk setiap gramnya. Permukaan yang luas inilah "panggung" bagi banyak sifat istimewa koloid, misalnya menyerap zat lain dan membawa muatan listrik. Geser diameternya dan saksikan permukaannya "meledak".

RUMUS HIDUP

Skala ukuran partikel

$$A = \frac{6000}{\rho d}$$

Luas permukaan setiap gram butiran bulat berbanding terbalik dengan diameternya: pecah butir menjadi sepuluh kali lebih kecil, permukaannya sepuluh kali lebih luas.

d Diameter partikel nm

ρ Massa jenis partikel g/cm³

A Luas permukaan per gram m²/g

LUAS PERMUKAAN PER GRAM

46,2
m²/g

 **1-1000 nm: koloid, permukaannya sangat luas**

Diameter **50** nm termasuk **koloid**. Partikel ini **±178,571** kali diameter molekul air. Satu gramnya berpermukaan **46,2** m², kira-kira **0,565** lapangan bulu tangkis.

Cek satuan: 6000 menyatukan satuan: 1 ÷ (g/cm³ × nm) → m²/g ✓

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

Cara paling cepat membedakan larutan dan koloid? Matikan lampu, lalu sorotkan cahaya! Cobalah di laboratorium virtual berikut. Ketuk kanvas untuk menaikkan atau menurunkan berkas, lalu biarkan campurannya diam beberapa saat.

LAB MINI Pedang Cahaya: Uji Efek Tyndall

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25



Jenis campuran
koloid (emulsi)

Ukuran partikel
 $\pm 100-1000$ nm (misel kasein, butir lemak)

Berkas dari samping
tampak sangat terang

Saat didiamkan
tetap tersebar (tidak mengendap)

Cahaya tembus
32 %

Pilih campuran dan sumber cahaya. Campuran mana yang memperlihatkan berkas dari samping? Bandingkan **agar-agar cair** yang bening dengan **kopi saring** yang gelap. Lalu amati **air lumpur** dan **susu kapur** saat didiamkan: apa yang terjadi pada berkasnya? Lingkaran kecil memperbesar partikelnya sekitar sejuta kali.



Tebak Dulu!

Agar-agar encer yang masih hangat tampak bening seperti air. Apa yang terjadi bila disorot senter dari samping?

Berkas tidak tampak, karena cairan bening pasti larutan.

Berkas tampak: agar-agar adalah koloid walaupun bening.

Cahaya dipantulkan seluruhnya seperti cermin.

Seluruh cahaya diserap sehingga gelas tampak gelap.

Jawabannya: berkas tampak. Rantai panjang agarosa dari rumput laut berukuran koloid. Karena hanya sedikit dan indeks biasnya mirip air, agar-agar encer tampak bening, tetapi tetap menghamburkan cukup cahaya untuk memperlihatkan "pedang cahaya". Bening tidak berarti larutan!



AWAS JEBAKAN

Koloid tidak selalu keruh, dan cairan berwarna tidak selalu koloid. Air sabun encer dan agar-agar cair tampak hampir bening tetapi menunjukkan efek Tyndall, sedangkan teh atau sirup berwarna pekat bisa saja larutan. Warna muncul karena cahaya *diserap*; efek Tyndall muncul karena cahaya *dihamburkan*. Jadi ujilah dengan berkas cahaya, bukan dengan menebak dari warna.

CONTOH Golongkan empat campuran

Golongkan sebagai larutan, koloid, atau suspensi: (a) air gula, (b) susu, (c) air kapur sirih yang baru diaduk, (d) kabut pagi.

- 1 (a) Air gula: jernih, tidak mengendap, berkas senter tidak tampak. Partikelnya molekul sukrosa (± 1 nm) → **larutan**.
- 2 (b) Susu: putih merata, tidak mengendap, lolos kertas saring, berkas tampak → **koloid** (emulsi lemak dalam air).
- 3 (c) Air kapur sirih yang baru diaduk: keruh, butir kapur mengendap dalam beberapa menit → **suspensi**.
- 4 (d) Kabut: titik-titik air sangat halus melayang di udara dan memperlihatkan sorot lampu kendaraan → **koloid** (aerosol cair).

Larutan: (a). Koloid: (b) dan (d). Suspensi: (c). Tiga uji kilat: sorot (Tyndall), diamkan (mengendap?), saring (tertahan?).

25.2 Delapan jenis koloid

Setiap koloid punya dua "pemain": **fase terdispersi** (si penumpang yang tersebar) dan **medium pendispersi** (si "kendaraan"). Masing-masing bisa berwujud padat, cair, atau gas. Dari $3 \times 3 = 9$ pasangan, hanya **8** yang menjadi koloid. Pasangan gas dalam gas selalu bercampur sempurna menjadi larutan, misalnya udara.

Fase terdispersi	Medium pendispersi	Nama koloid	Contoh di sekitarmu
gas	cair	buih	busa sabun, putih telur kocok untuk bolu, buih ombak, busa sampo
gas	padat	buih padat	batu apung, roti dan bolu yang mengembang, kerupuk, gabus styrena
cair	gas	aerosol cair	kabut pagi di Dieng, awan, semprotan obat nyamuk, percikan air terjun
cair	cair	emulsi	santan, susu, mayones, saus salad
cair	padat	emulsi padat (gel)	agar-agar, jeli, keju, mentega, dodol

padat	gas	aerosol padat	asap kebakaran hutan, abu vulkanik di udara, debu jalanan
padat	cair	sol	cat, tinta, air tajin (kanji), lateks karet, sol emas
padat	padat	sol padat	kaca rubi merah berisi butir emas, kaca patri, batu opal
gas	gas	bukan koloid	udara: gas-gas selalu bercampur homogen (larutan)



TRIK KAK TIRTA

Baca nama koloid dari **mediumnya** dulu. Medium gas → **aerosol**. Medium cair → **sol, emulsi, buih**. Medium padat → nama yang sama ditambah kata "**padat**". Lalu lihat **penumpangnya**: padat = sol, cair = emulsi, gas = buih. Jembatan keledainya: "**SEB = Padat, Cair, Gas**", seperti **Sate-Es-Balon**: sate itu padat, es teh itu cair, balon berisi gas. (Pengecualian nama: cair dalam padat lebih sering disebut **gel**.)



KIMIA NUSANTARA • KOLOID DI MEJA MAKAN

Kerupuk yang digoreng mengembang karena air di dalam adonan kanji berubah menjadi uap, lalu terperangkap sebagai gelembung: jadilah buih padat yang renyah. **Agar-agar** dibuat dari rumput laut *Gracilaria* dan *Gelidium*, dan Indonesia termasuk penghasil rumput laut terbesar di dunia. Rantai agarosanya membentuk jaring yang memerangkap air, sehingga "air menjadi padat". **Dodol** Garut dan Kudus pun gel kental: kanji ketan, santan, dan gula aren diaduk berjam-jam sampai jaring patinya menahan minyak dan air. Bahkan **batu apung** dari pantai Lombok adalah buih padat alami: lava berbuih gas yang membeku seketika.

MITOS

"Koloid selalu keruh."

MITOS

"Santan adalah larutan karena tampak merata."

FAKTA

Agar-agar encer, jeli, dan air sabun encer tampak hampir bening, tetapi menunjukkan efek Tyndall. Keruh atau bening bergantung pada jumlah partikel dan perbedaan indeks bias, bukan penentu jenis campuran.

FAKTA

Santan adalah

emulsi

: butiran minyak kelapa (sekitar 1 μm atau lebih) tersebar dalam air dan dijaga protein kelapa. Didiamkan lama, kepala santan naik ke atas. Larutan tidak pernah memisah begitu.

MITOS

"Campuran dua gas bisa jadi koloid kalau warnanya berbeda."

FAKTA

Molekul gas selalu bergerak bebas dan bercampur sempurna, jadi campuran gas selalu larutan. Yang membuat udara berkabut atau berasap adalah titik cair atau butir padat di dalamnya.

25.3 Efek Tyndall, gerak Brown, adsorpsi, dan muatan

Efek Tyndall: cahaya yang dihamburkan

Efek Tyndall adalah penghamburan cahaya oleh partikel koloid sehingga jalannya berkas cahaya tampak dari samping. Partikel koloid berukuran sebanding dengan panjang gelombang cahaya tampak (400–700 nm), jadi mereka "memantulkan" cahaya ke segala arah. Ion dan molekul dalam larutan terlalu kecil, sehingga hamburannya hampir tidak ada.

Efek Tyndall ada di mana-mana: sorot lampu motor di jalan berkabut, berkas cahaya matahari yang menembus sela daun di hutan pinus pagi hari, dan sorot proyektor di aula berdebu. Langit biru dan matahari terbenam yang jingga di Bromo pun berasal dari penghamburan cahaya oleh partikel yang sangat kecil.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

HAMBURAN RAYLEIGH: $I \propto D^6 / \lambda^4$

Untuk partikel yang jauh lebih kecil daripada panjang gelombang, intensitas hamburan sebanding dengan d^6 / λ^4 . Akibatnya ada dua hal mengejutkan:

- **Ukuran sangat menentukan.** Partikel 10 kali lebih besar menghamburkan 10^6 kali lebih kuat. Itulah sebabnya molekul gula (± 1 nm) "tak terlihat", sedangkan misel kasein (± 150 nm) bercahaya.
- **Warna biru dihamburkan lebih kuat.** Cahaya biru (450 nm) dihamburkan $(700/450)^4 \approx 6$ kali lebih kuat daripada merah (700 nm). Langit siang tampak biru; saat matahari rendah, cahaya biru sudah "habis" dihamburkan sepanjang jalan, sehingga yang tersisa jingga-merah. Laser hijau juga tampak lebih terang daripada laser merah di kabut.

Untuk butir yang seukuran atau lebih besar dari panjang gelombang (titik air awan, ± 10 μm), semua warna dihamburkan hampir sama kuat. Hasilnya awan dan kabut tampak **putih**.

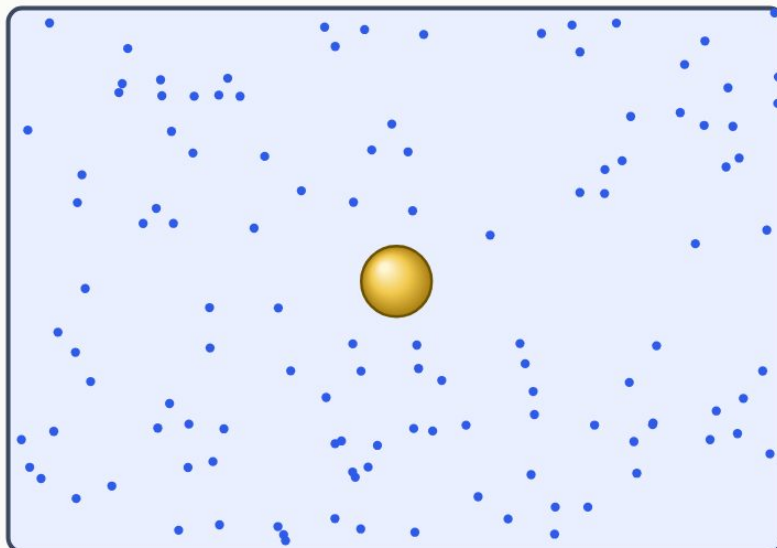
Gerak Brown: tarian zig-zag

Di bawah mikroskop, partikel koloid tidak pernah diam. Mereka bergerak **gerak Brown**: gerak acak zig-zag akibat ditabrak molekul medium dari segala arah secara tidak seimbang. Partikel koloid cukup kecil sehingga tabrakan

ini tidak saling meniadakan, tetapi cukup besar untuk terlihat. Gerak Brown inilah yang membuat koloid **tidak mengendap**: setiap kali gravitasi menarik ke bawah, tabrakan acak mengaduknya kembali.

LAB MINI Gerak Brown: Siapa yang Menendang?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25



Gerak Brown

Suhu 25 °C (298 K)

molekul air ± 643 m/s

partikel: sedang (± 200 nm)

≈ 150 kali massa "molekul" di layar

Model 2D, diperlambat dan diperbesar.



Kecepatan rata-rata molekul air
643 m/s

Tumbukan per detik (layar)
5

Jarak dari titik awal
1 px

Bola besar adalah partikel koloid, titik-titik biru adalah molekul air. Matikan "Tampilkan molekul air" untuk melihat apa yang dilihat Robert Brown di mikroskopnya. Naikkan suhu: apa yang terjadi pada tariannya? Bandingkan partikel kecil dan besar. Partikel mana yang lebih "gelisah"?



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1827, ahli botani Skotlandia **Robert Brown** mengamati butir-butir sangat halus dari serbuk sari bunga yang bergerak gelisah di dalam air. Ia mengira itu tanda "kehidupan", sampai ia melihat butir debu batu pun bergerak sama! Pada 1905 **Albert Einstein** menjelaskan bahwa gerak itu akibat tumbukan molekul air, dan pada 1908 **Jean Perrin** membuktikannya dengan percobaan sekaligus menghitung bilangan Avogadro (Bab 17). Sementara itu, pada 1869 **John Tyndall** dari Irlandia meneliti mengapa berkas cahaya tampak di udara berdebu tetapi tidak di udara yang sangat bersih. Nama keduanya kini menjadi nama sifat koloid.

Adsorpsi: permukaan yang lengket

Adsorpsi adalah penyerapan zat **pada permukaan** partikel. Karena luas permukaannya sangat besar (ingat Rumus Hidup di 25.1!), partikel koloid jago mengadsorpsi ion, molekul pewarna, dan bau. Contohnya:

- **Norit** (karbon aktif) untuk diare dan keracunan ringan: racun dan bakteri menempel di permukaannya.
- **Pemutihan gula tebu**: nira yang cokelat dilewatkan karbon aktif atau tanah pemucat sehingga zat warnanya teradsorpsi.

- **Pewarnaan batik alam:** kain dicelup larutan tawas (proses *fiksasi*) agar zat warna dari kayu tingi, jambal, atau indigo menempel kuat di serat.
- **Penjernihan air:** flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ mengadsorpsi lumpur dan zat warna (subbab 25.7).



AWAS JEBAKAN

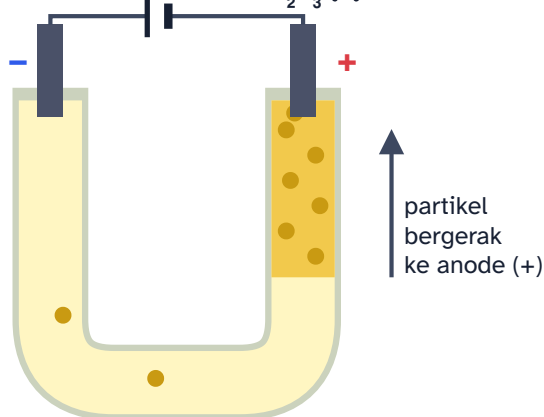
Adsorpsi berbeda dengan absorpsi. **Adsorpsi** hanya di permukaan, seperti debu menempel di kaca. **Absorpsi** masuk ke seluruh bagian, seperti air diserap spons. Karbon aktif bekerja dengan adsorpsi; karena itulah ia dibuat berpori-pori sangat banyak: satu gram karbon aktif bisa berpermukaan ratusan sampai lebih dari seribu meter persegi.

Muatan koloid dan elektroforesis

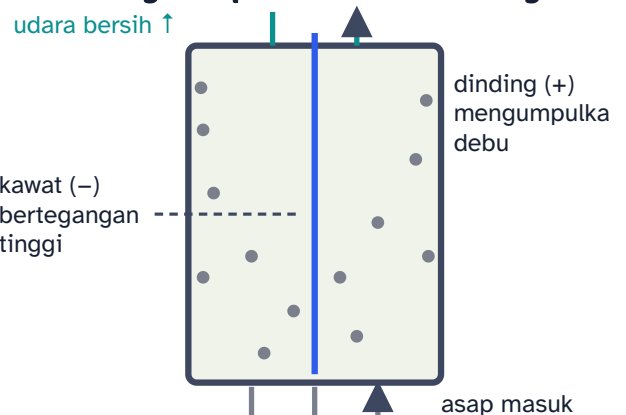
Banyak partikel koloid bermuatan listrik karena **mengadsorpsi ion** pada permukaannya, biasanya ion yang sejenis dengan penyusunnya. Sol besi(III) hidroksida, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, mengadsorpsi ion Fe^{3+} sehingga bermuatan **positif**. Sol arsen(III) sulfida, As_2S_3 , mengadsorpsi ion HS^- sehingga bermuatan **negatif**. Butir lempung di air sungai juga bermuatan negatif. Karena muatannya sejenis, partikel-partikel itu **saling tolak** dan tidak bergabung. Inilah rahasia kestabilan koloid.

Bila dua elektrode dicelupkan ke dalam koloid dan diberi arus searah, partikel bergerak ke elektrode yang muatannya berlawanan. Peristiwa ini disebut **elektroforesis**, dan dipakai untuk menentukan muatan koloid, memisahkan protein dan DNA (tes DNA forensik), serta menyaring asap pabrik.

Elektroforesis sol As_2S_3 (-)



Pengendap Cottrell di cerobong



Kiri: elektroforesis menunjukkan muatan koloid. Kanan: di cerobong pabrik semen atau pembangkit listrik, partikel asap diberi muatan oleh kawat bertegangan tinggi, lalu tertarik ke dinding dan berjatuh ke penampung.

25.4 Koagulasi dan dialisis

Kalau muatan sejenis membuat koloid stabil, apa yang terjadi bila muatannya **dinetralkan**? Partikel tidak lagi saling tolak. Setiap kali bertabrakan (ingat gerak Brown!), mereka menempel, menjadi gumpalan besar, lalu mengendap. Peristiwa ini disebut **koagulasi**.



DEFINISI · KOAGULASI

Koagulasi adalah penggumpalan partikel koloid sehingga koloid rusak dan fase terdispersinya memisah (mengendap atau mengapung). Penyebabnya antara lain: penambahan **elektrolit**, **pemanasan**, perubahan **pH**, **pencampuran** dua koloid yang berlawanan muatan, dan **elektroforesis** (partikel kehilangan muatan di elektrode).

Ion dari elektrolit yang muatannya **berlawanan** dengan muatan koloid berkerumun di sekitar partikel dan "menyelimuti" muatannya. Makin besar muatan ion itu, makin sedikit yang dibutuhkan.



ATURAN HARDY-SCHULZE

Daya penggumpal suatu elektrolit ditentukan oleh ionnya yang bermuatan **berlawanan** dengan muatan koloid. Makin besar muatan ion itu, makin kuat daya penggumpalnya, kira-kira sebanding dengan z^6 :



LAB MINI

Gumpalkan Koloidnya!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25

Koloid
Lempung air sungai (-)

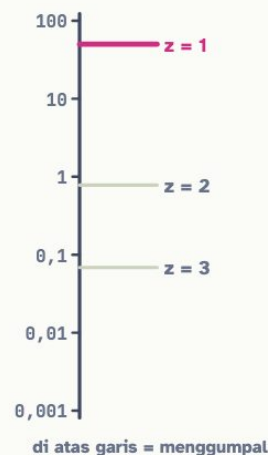
Elektrolit
NaCl

Ion lawan (penggumpal)
Na⁺
muatan $z = 1 \rightarrow \text{daya} \approx 1 \times$

partikel koloid +
"selimut" muatan

Selimut menipis bila ion
lawan makin banyak; partikel
lalu bisa saling menempel.

Batas koagulasi
(mmol/L, skala log)



Ion penggumpal
Na⁺ (muatan +1)

Konsentrasi ion lawan
0 mmol/L

Batas koagulasi (model)
±50 mmol/L Na⁺

Keadaan
stabil: partikel saling tolak

Kejernihan
0 %

Mulailah dengan koloid lempung bermuatan negatif dan **NaCl**. Naikkan konsentrasinya setingkat demi setingkat dengan tombol **Teteskan**. Pada konsentrasi berapa partikelnya mulai menggumpal? Ulangi dengan **CaCl₂** dan **tawas**. Lalu ganti ke sol positif **Fe(OH)₃**: elektrolit mana yang kini paling jago? Perhatikan "selimut" muatan di sekitar partikel yang menipis.

$$C_z \approx \frac{C_1}{z^6}$$

Konsentrasi ion yang cukup untuk menggumpalkan koloid turun drastis bila muatan ionnya naik: ion bermuatan 3 sekitar 729 kali lebih jago daripada ion bermuatan 1.

 z

Muatan ion penggumpal

 C_1

Konsentrasi kritis ion bermuatan 1 mmol/L

 C_z Konsentrasi kritis ion bermuatan z mmol/L

KONSENTRASI KRITIS ION BERMUATAN z

0,0686
mmol/L

Al^{3+} , Fe^{3+} (atau PO_4^{3-}): inilah kekuatan tawas!

Ion bermuatan **3** kira-kira **729** kali lebih kuat daripada ion bermuatan 1. Cukup **0,0686** mmol/L untuk mulai menggumpalkan koloid.

Cek satuan: mmol/L ÷ (tanpa satuan) = mmol/L ✓

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



TRIK KAK TIRTA

"Lawan muatan, besar muatan, dialah juara." Untuk koloid negatif, lihat *kation*nya saja; untuk koloid positif, lihat *anion*nya saja. Ion yang muatannya sejenis dengan koloid hanyalah penonton.

Koloid lempung (bermuatan negatif) di air sungai mulai menggumpal bila konsentrasi Na^+ mencapai 50 mmol/L. Dengan aturan z^6 , perkirakan konsentrasi kritis Ca^{2+} dan Al^{3+} . Lalu bandingkan massa NaCl (Mr 58,5) dan AlCl_3 (Mr 133,5) yang dibutuhkan untuk 1 L air.

1 Ca^{2+} : $c = 50/2^6 = 50/64 \approx 0,78 \text{ mmol/L}$.

2 Al^{3+} : $c = 50/3^6 = 50/729 \approx 0,069 \text{ mmol/L}$.

3 NaCl: $50 \text{ mmol} \times 58,5 \text{ mg/mmol} \approx 2.900 \text{ mg} = 2,9 \text{ g}$ per liter (hampir setengah sendok teh garam!).

4 AlCl_3 : satu satuan rumus memberi satu Al^{3+} , jadi $0,069 \text{ mmol} \times 133,5 \text{ mg/mmol} \approx 9 \text{ mg}$ per liter = 9 ppm.

$\text{Ca}^{2+} \pm 0,78 \text{ mmol/L}$ dan $\text{Al}^{3+} \pm 0,069 \text{ mmol/L}$. Massa garam aluminium yang dibutuhkan ± 300 kali lebih kecil daripada garam dapur, dan airnya tidak menjadi asin. Itulah sebabnya PDAM memakai garam aluminium (tawas), bukan garam dapur.



KIMIA NUSANTARA • TAHU DAN KARET: KOAGULASI YANG KITA MAKAN DAN PAKAI

Tahu adalah koagulasi protein kedelai. Sari kedelai panas diberi **batu tahu** (kalsium sulfat, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuka, atau "air biang" asam sisa pembuatan tahu sebelumnya. Ion Ca^{2+} atau ion H^+ menetralkan muatan negatif protein sehingga protein menggumpal menjadi dadih putih yang lalu dicetak dan dipres. Di kebun karet Sumatra dan Kalimantan, **lateks** (sol partikel karet bermuatan negatif) digumpalkan petani dengan asam semut (asam format) atau cuka menjadi lembaran karet. Bahkan **delta sungai** seperti delta Mahakam terbentuk karena lumpur koloid dari sungai menggumpal saat bertemu ion-ion garam di air laut.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

LAPISAN GANDA LISTRIK DAN POTENSIAL ZETA

Sebuah partikel koloid bermuatan dikelilingi dua lapisan: lapisan ion lawan yang melekat erat (lapisan Stern) dan "awan" ion lawan yang makin renggang ke luar (lapisan difus). Beda potensial di batas lapisan yang ikut bergerak bersama partikel disebut **potensial zeta**, ζ . Koloid dalam air umumnya stabil bila $|\zeta|$ lebih dari sekitar 30 mV.

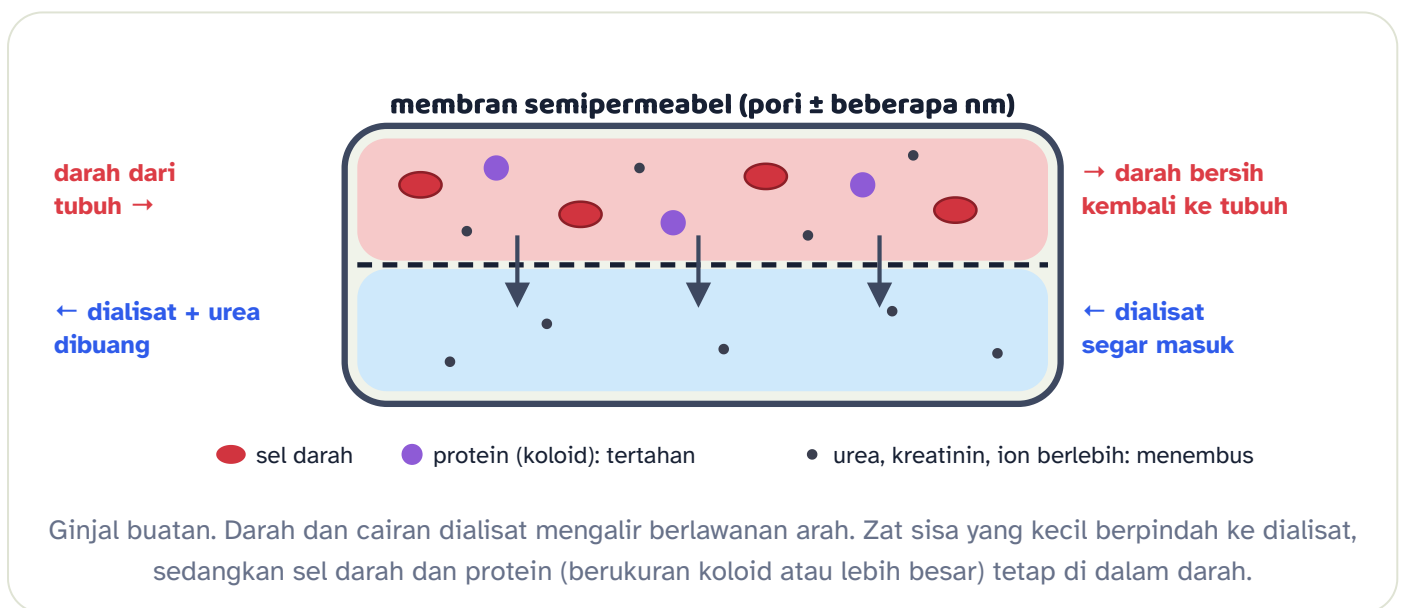
Tebal awan ion diukur dengan **panjang Debye**. Untuk elektrolit 1:1 dalam air 25 °C, $\kappa^{-1} \approx 0,304/\sqrt{c}$ nm (c dalam mol/L): 9,6 nm pada 1 mmol/L, tetapi hanya 0,96 nm pada 0,1 mol/L. Elektrolit "memampatkan" awan itu sehingga gaya tarik van der Waals antarpartikel menang. Teori DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek) menggabungkan kedua gaya ini, dan untuk potensial permukaan yang tinggi meramalkan konsentrasi koagulasi kritis $\propto 1/z^6$: asal-usul aturan Hardy-Schulze.

Koloid pelindung

Kadang kita justru ingin koloid **tidak** menggumpal. Caranya: tambahkan **koloid pelindung**, yaitu koloid liofil yang membungkus partikel koloid lain. Gelatin menjaga kristal es dan gula pada es krim tetap halus, gom arab menjaga partikel tinta tetap tersebar, dan kasein menjaga butir lemak susu tidak bergabung.

Dialisis: menyaring dengan membran

Koloid hasil pembuatan sering tercemar ion-ion yang bisa menggumpalkannya. Ion itu dapat dibuang dengan **dialisis**: koloid dimasukkan ke kantong **membran semipermeabel**, lalu dicelupkan ke air yang terus mengalir. Ion dan molekul kecil menembus pori membran, sedangkan partikel koloid tertahan. Prinsip yang sama menyelamatkan nyawa jutaan orang lewat **cuci darah** (hemodialisis).



TAMU DARI MASA LALU

Kata **koloid** diciptakan kimiawan Skotlandia **Thomas Graham** pada 1861, dari bahasa Yunani *kolla* yang berarti lem. Graham memperhatikan bahwa zat seperti lem, gelatin, dan kanji sangat lambat menembus kertas perkamen, sedangkan garam dan gula menembusnya dengan cepat. Ia menamai cara pemisahan itu **dialisis**. Delapan puluh tahun kemudian, pada 1943, dokter Belanda **Willem Kolff** membangun ginjal buatan pertama dari membran selofan, drum berputar, dan tangki cairan. Kini pasien gagal ginjal di banyak rumah sakit Indonesia menjalani cuci darah biasanya 2-3 kali seminggu, sekitar 4 jam setiap kali.

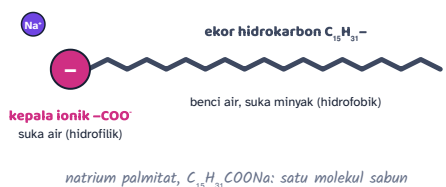
25.5 Liofil, liofob, dan rahasia pengemulsi

Koloid dengan medium cair dibedakan menurut "hubungan" partikelnya dengan medium. **Koloid liofil** (Yunani: *suka cairan*) menarik dan menyerap medium di sekitarnya. **Koloid liofob** (*takut cairan*) hampir tidak menarik medium dan hanya stabil berkat muatan listriknya. Bila mediumnya air, keduanya disebut **hidrofil** dan **hidrofob**.

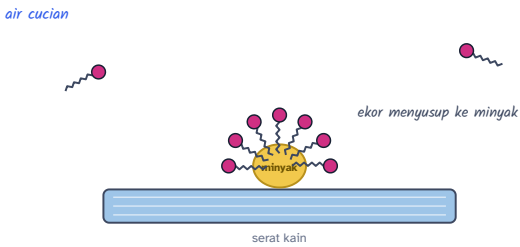
Sifat	Liofil (suka medium)	Liofob (takut medium)

Hubungan dengan medium	menyerap medium, dibungkus lapisan solvasi tebal	sedikit menarik medium; stabil karena muatan
Cara membuat	cukup didispersikan (gelatin + air hangat)	perlu cara khusus (kondensasi, busur Bredig)
Kekentalan	lebih kental daripada mediumnya	hampir sama dengan medium
Bila diberi sedikit elektrolit	tetap stabil; perlu elektrolit sangat banyak	mudah menggumpal
Setelah dikeringkan	dapat didispersikan kembali (reversibel)	sulit kembali (tak reversibel)
Efek Tyndall	lemah	jelas
Contoh	gelatin, agar-agar, kanji, protein, sabun	sol emas, sol belerang, sol $\text{Fe}(\text{OH})_3$, sol As_2S_3 , sol AgCl

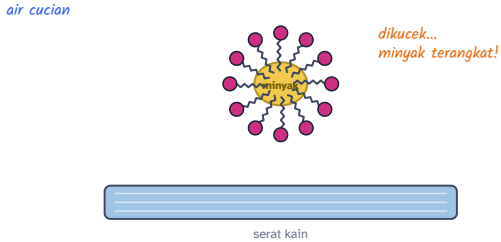
Minyak dan air dikocok sekuat apa pun akan segera memisah lagi. Agar menjadi emulsi yang stabil, kita butuh **pengemulsi** (emulgator): zat yang molekulnya punya satu ujung **suka air** dan satu ujung **suka minyak**. Sabun, deterjen, **kuning telur** (mengandung lesitin) pada mayones, **kasein** pada susu, dan **garam empedu** yang mengemulsi lemak makanan di ususmu adalah pengemulsi.



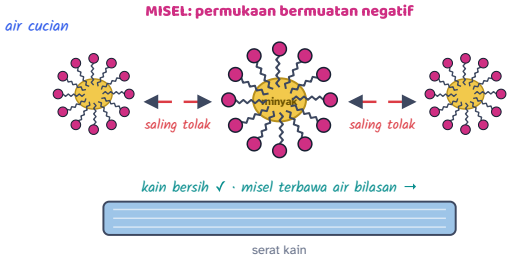
Langkah 1. Molekul sabun punya dua "kepribadian": kepala ionik $-\text{COO}-$ yang suka air (hidrofilik) dan ekor hidrokarbon panjang yang benci air tetapi suka minyak (hidrofobik).



Langkah 2. Di air cucian, ekor-ekor sabun menyusup ke dalam noda minyak, sedangkan kepalanya tetap "berenang" di air.



Langkah 3. Saat kain dikecek, air menarik kepala-kepala sabun sehingga tetesan minyak terangkat dari serat, dan makin banyak molekul sabun membungkusnya.



Langkah 4. Terbentuklah **misel**: minyak terkurung di tengah, kepala bermuatan negatif di luar. Misel saling tolak sehingga tetap tersebar sebagai koloid (emulsi), lalu terbawa air bilasan.



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).

Putar **asam palmitat**: di satu ujung ada gugus $-COOH$, di ujung lain rantai 15 atom karbon. Pada sabun, H dari $-COOH$ diganti Na^+ sehingga ujung itu menjadi kepala ionik $-COO^- Na^+$. Bandingkan dengan **asam oleat** yang rantainya "tertekuk" karena ikatan rangkap *cis*. Terakhir lihat **gliserol**, hasil samping pembuatan sabun yang sangat suka air karena punya tiga gugus $-OH$.

Sabun dibuat dengan **saponifikasi**: lemak atau minyak (trigliserida) dipanaskan dengan basa kuat. Misalnya tripalmitin dari minyak sawit:



KIMIA NUSANTARA · SANTAN, KALIO, DAN RENDANG

Santan adalah emulsi minyak kelapa dalam air yang dijaga oleh **protein kelapa** sebagai pengemulsi alami. Saat memasak rendang, santan direbus berjam-jam. Air menguap, protein rusak karena panas, dan "satpam" emulsi pun hilang: santan **pecah**, minyaknya keluar. Juru masak Minang menyebut tahap berkuah kental sebagai *kalio*; bila dimasak terus, bumbu dan daging akhirnya "digoreng" dalam minyak kelapanya sendiri sampai menjadi rendang yang kering dan tahan lama. Itulah sebabnya santan untuk opor atau gulai harus terus diaduk dan tidak dididihkan terlalu keras: pengadukan menjaga butir minyak tetap tersebar dan mencegah protein menggumpal.



AWAS JEBAKAN

Sabun tidak "melarutkan" minyak menjadi larutan sejati. Minyak hanya dipecah menjadi tetes-tetes kecil yang dibungkus misel, jadi hasilnya **emulsi** (koloid). Itu sebabnya air bekas cucian tampak keruh dan menunjukkan efek Tyndall.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

KONSENTRASI MISEL KRITIS

Pada konsentrasi rendah, molekul sabun atau deterjen berdiri sendiri-sendiri dan sebagian berjajar di permukaan air (karena itu tegangan permukaan turun). Di atas **konsentrasi misel kritis** (KMK, *critical micelle concentration*), molekul tambahan berkumpul menjadi misel berisi puluhan molekul. Untuk natrium dodesil sulfat (SDS, atau natrium lauril sulfat pada sampo) KMK-nya sekitar 8 mmol/L pada 25 °C. Di atas KMK, tegangan permukaan hampir tidak turun lagi, tetapi kemampuan "menyimpan" minyak di dalam misel meningkat tajam. Koloid yang terbentuk dari kumpulan molekul seperti ini disebut **koloid asosiasi**.

25.6

Membuat koloid: kondensasi dan dispersi

Ukuran koloid ada di tengah, jadi ada dua jalan untuk mencapainya. **Kondensasi** menggabungkan partikel yang lebih kecil (ion atau molekul dari larutan) menjadi berukuran koloid. **Dispersi** memecah partikel yang lebih besar (butir kasar suspensi) menjadi berukuran koloid.

Cara	Prinsip	Contoh
Kondensasi (kecil → koloid)		
Reaksi redoks	hasil reaksi berupa unsur yang tidak larut	sol belerang: $2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \longrightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$; sol emas: $2\text{AuCl}_3 + 3\text{HCHO} + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{Au} + 3\text{HCOOH} + 6\text{HCl}$
Hidrolisis	garam bereaksi dengan air panas	sol merah coklat: $\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$ (FeCl_3 diteteskan ke air mendidih)
Dekomposisi rangkap	dua larutan encer membentuk zat sukar larut	sol kuning: $\text{As}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{S} \longrightarrow \text{As}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$; sol AgCl dari AgNO_3 dan NaCl yang sangat encer
Penggantian pelarut	zat dituang ke pelarut yang tidak melarutkannya	larutan belerang dalam alkohol dituang ke air → sol belerang
Dispersi (besar → koloid)		

Mekanik	digiling halus (penggiling koloid) atau dikocok kuat dengan pengemulsi	cat, tinta, cokelat, mayones
Peptisasi	endapan dipecah oleh ion atau zat pemecah (peptisator)	endapan $\text{Al}(\text{OH})_3$ + sedikit AlCl_3 ; endapan $\text{NiS} + \text{H}_2\text{S}$; karet + bensin
Busur Bredig	loncatan listrik antara dua kawat logam di dalam air menguapkan logam; uapnya mengembun menjadi butir koloid	sol emas, sol perak, sol platina
Homogenisasi	cairan ditekan melewati celah sempit bertekanan tinggi	susu homogen: butir lemaknya diperkecil agar krim tidak naik

Perhatikan bahwa semua reaksi di atas **setara**. Setarakan sendiri dengan Penyetara Reaksi berikut. Bonusnya: reaksi saponifikasi pembuat sabun dari subbab 25.5.

PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi pembuatan sol (dan sabun)

Unsur	Kiri	Kanan	
Fe	1 ●	1 ●	✓
Cl	3 ●●●	1 ●	✗
H	2 ○○	4 ○○○○	✗

Unsur	Kiri	Kanan	
O	1 ●	3 ●●●	×

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



Persamaan 1 dari 7 null

Mulailah dari atom yang hanya muncul di satu zat pada setiap ruas. Untuk sol emas, setarakan Au dan Cl dulu, lalu C, kemudian O dan H. Reaksi kelima adalah hidrolisis ion Al^{3+} yang membuat flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ di PDAM; jangan lupa menyetarakan muatannya juga!



TRIK KAK TIRTA

"Kondensasi naik, dispersi turun." Bayangkan tangga ukuran: larutan di lantai bawah, koloid di lantai tengah, suspensi di lantai atas. Kondensasi *naik* dari larutan (biasanya lewat reaksi kimia), dispersi *turun* dari suspensi (biasanya lewat cara fisika: giling, kocok, setrum).

KERJAKAN BERSAMA

Sol merah dari air mendidih

Beberapa tetes larutan besi(III) klorida pekat ditetaskan ke dalam air mendidih. Air berubah menjadi merah coklat jernih dan menunjukkan efek Tyndall. (a) Tuliskan persamaan reaksinya. (b) Termasuk cara apa? (c) Mengapa partikelnya bermuatan positif?

1 (a) Ion Fe^{3+} terhidrolisis: $\text{FeCl}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{HCl}$. Cek: Fe 1 = 1; Cl 3 = 3; H 6 = 3 + 3; O 3 = 3 ✓

2 (b) Ion-ion kecil bergabung menjadi partikel $\text{Fe}(\text{OH})_3$ berukuran koloid, jadi termasuk **kondensasi** (cara hidrolisis). Air mendidih mempercepat hidrolisis dan menghasilkan banyak inti kecil sekaligus.

3 (c) Permukaan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ mengadsorpsi ion yang "sejenis" dan berlebih di sekitarnya, yaitu Fe^{3+} , sehingga bermuatan positif.

Sol $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bermuatan positif dibuat secara kondensasi (hidrolisis). Karena positif, sol ini paling mudah digumpalkan oleh anion bermuatan besar seperti PO_4^{3-} .



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1857 **Michael Faraday** mereduksi larutan garam emas dan mendapatkan cairan berwarna merah delima. Ia menduga warnanya berasal dari butir emas yang sangat halus, bukan emas terlarut, dan menguji dugaan itu dengan berkas cahaya. Sebagian contoh sol emas Faraday konon masih tersimpan di Royal Institution, London, dan tetap merah lebih dari 150 tahun kemudian! Pada 1898 **Georg Bredig** membuat sol logam dengan loncatan listrik, dan pada 1925 **Richard Zsigmondy** meraih Nobel Kimia berkat ultramikroskop yang membuat partikel koloid dapat diamati satu per satu.

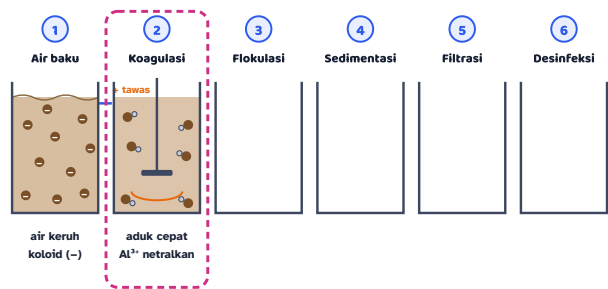
25.7

Koloid untuk kehidupan: dari PDAM sampai nano-perak

Air sungai yang menjadi bahan baku PDAM sering berwarna coklat karena **koloid lempung** bermuatan negatif. Butir-butir ini terlalu kecil untuk mengendap sendiri dan lolos dari saringan pasir biasa. Solusinya adalah semua yang sudah kamu pelajari di bab ini: muatan, koagulasi, adsorpsi, dan penyaringan.



Langkah 1. Air baku dari sungai keruh karena koloid lempung bermuatan negatif. Partikelnya saling tolak, jadi tidak mau mengendap sendiri walau dibiarkan sehari-hari.



Langkah 2. Koagulasi: tawas, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, dicampur dengan pengadukan cepat. Ion Al^{3+} menetralkan muatan negatif koloid (aturan Hardy-Schulze), dan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang terbentuk bertindak sebagai "lem" yang lengket.



Langkah 3. Flokulasi: pengadukan pelan mempertemukan partikel yang sudah netral sehingga bergabung menjadi **flok** yang makin besar, seperti bola salju yang menggelinding.



Langkah 4. Sedimentasi: flok yang besar dan berat mengendap di dasar bak sebagai lumpur. Air di bagian atas sudah jauh lebih jernih.

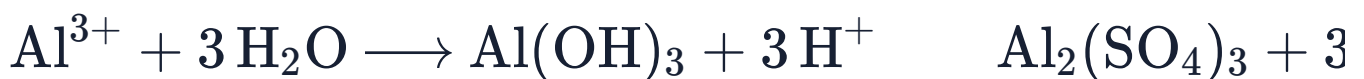


Langkah 5. Filtrasi: air dilewatkan lapisan pasir dan kerikil yang menahan sisa flok kecil. Beberapa instalasi menambah karbon aktif untuk mengadsorpsi bau dan warna.



Langkah 6. Desinfeksi: klorin atau kaporit membunuh kuman yang tersisa, lalu air dialirkan ke rumahmu. Ingat: tawas menjernihkan, klorin menyehatkan.

Ion aluminium tidak hanya menetralkan muatan. Di dalam air, ion itu terhidrolisis membentuk endapan seperti agar-agar yang menyapu partikel lain:



Ion H^+ yang terbentuk dinetralkan oleh alkalinitas alami air (ion hidrogen karbonat). Bila airnya terlalu asam, PDAM menambahkan kapur agar flok terbentuk baik, biasanya pada pH sekitar 6–7,5. Berapa banyak tawas yang dipakai? Dosisnya biasa dinyatakan dalam **ppm**: untuk air, 1 ppm = 1 mg zat per liter air.

$$m = \frac{D \times V}{1000}$$

Massa tawas (gram) sama dengan dosis (mg per liter, alias ppm) dikali volume air (liter), lalu dibagi 1000 untuk mengubah miligram menjadi gram.

D Dosis tawas ppm (mg/L)

V Volume air L

m Massa tawas g

MASSA TAWAS

30

g



seukuran tandon rumah

1.000 L air dengan dosis **30** ppm membutuhkan **30** g tawas, atau **0,03** kg. Kira-kira **2,5** sendok makan tawas bubuk (± 12 g per sendok).

Satuan Nusantara: $\approx 51\%$ dari 1 mol garam dapur (NaCl) $\cdot \approx 2 \times$ satu sendok makan air $\cdot \approx 6 \times$ satu sendok teh gula pasir ($\pm$)

Cek satuan: (mg/L) $\times$ L $\div 1000$ = g ✓

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

Pak RT ingin menjernihkan air sumur keruh dalam tandon 1.200 L. Uji jar menunjukkan dosis terbaik 25 ppm. Berapa gram tawas yang diperlukan, dan berapa sendok makan bila satu sendok makan tawas bubuk ± 12 g?

1 25 ppm berarti 25 mg tawas untuk setiap liter air.

2 $m = 25 \text{ mg/L} \times 1.200 \text{ L} = 30.000 \text{ mg} = 30 \text{ g}$.

3 Banyak sendok: $30/12 = 2,5$ sendok makan.

30 g tawas, sekitar 2,5 sendok makan. Larutkan dulu dalam seember air, tuang sambil diaduk cepat, aduk pelan beberapa menit, lalu diamkan beberapa jam sebelum air bagian atas dialirkan. Air ini tetap perlu dimasak sebelum diminum!



ADU CEPAT

Dosis tawas kilat

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-25

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$m \text{ (g)} = D \text{ (mg/L)} \times V \text{ (L)} \div 1000$. Contoh: $20 \text{ ppm} \times 500 \text{ L} = 10.000 \text{ mg} = 10 \text{ g}$.



AWAS JEBAKAN

Air yang jernih belum tentu aman diminum. Tawas hanya menggumpalkan koloid; kuman, ion logam berat, dan zat terlarut lain tidak hilang. Air sumur yang dijernihkan dengan tawas tetap harus **dimasak sampai mendidih**. Jangan pula menambah tawas berlebihan: air menjadi asam dan sisa aluminiumnya tidak baik bagi tubuh.



KIMIA NUSANTARA • KABUT ASAP: AEROSOL YANG MENYESAKKAN

Saat musim kemarau, kebakaran hutan dan lahan gambut di Riau, Jambi, Sumatra Selatan, dan Kalimantan dapat menyelimuti kota-kota dengan **kabut asap**, aerosol padat berisi partikel jelaga dan abu. Partikel berdiameter di bawah $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) sangat berbahaya karena dapat masuk jauh ke paru-paru. Matahari pun tampak jingga kemerahan karena cahaya birunya dihamburkan. Masker biasa kurang efektif; masker berfilter khusus partikel halus lebih melindungi, dan gerak Brown membuat partikel asap tetap melayang sehari-hari.

Kimia di sekitarmu



Cuci darah

Mesin hemodialisis membuang urea dan ion berlebih dari darah pasien gagal ginjal lewat membran semipermeabel, sementara sel darah dan protein tetap tinggal.



Cerobong bersih

Pabrik semen dan pembangkit listrik batu bara memasang pengendap elektrostatis (Cottrell) yang menangkap partikel debu bermuatan sebelum keluar ke udara.



Norit untuk diare

Karbon aktif yang sangat berpori mengadsorpsi racun dan bakteri di saluran cerna, lalu dibuang bersama kotoran.



Cat dan tinta

Pigmen padat digiling sampai berukuran koloid dan diberi zat penstabil agar tidak menggumpal atau mengendap di dalam kaleng.



Krim dan losion

Kosmetik adalah emulsi minyak dan air yang dijaga pengemulsi. Losion encer berupa minyak dalam air, krim malam yang berminyak sering berupa air dalam minyak.



Nano-perak

Partikel perak berukuran 1–100 nm pada pembalut luka dan kain antibakteri perlahan melepas ion perak yang membunuh bakteri. Luas permukaannya yang besar membuatnya sangat ampuh.

Cek Cepat

Berkas senter tampak jelas ketika menembus ...

air garam

air gula

kabut

air suling

Tawas menjernihkan air keruh terutama karena ...

membunuh kuman di dalam air

ion Al^{3+} menetralkan muatan koloid lempung sehingga menggumpal

membuat air menjadi basa

melarutkan lumpur menjadi larutan jernih

Mesin cuci darah memanfaatkan sifat koloid yang disebut ...

efek Tyndall

gerak Brown

elektroforesis

dialisis

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. B • 3. D



Tantangan Rumah: pedang cahaya di dapur dan tahu buatan sendiri

Bahan: senter HP, 5 gelas bening, air, gula, garam, susu cair, sabun cuci piring, 1 sendok teh tanah, 250 mL susu kedelai tawar, 2 sendok makan cuka dapur, panci kecil, saringan dan kain bersih.

1. Isi lima gelas dengan air, lalu tambahkan: gula (2 sdm), garam (1 sdt), susu (1 sdm), sabun cuci piring (beberapa tetes, aduk pelan), dan tanah (1 sdt).
2. Matikan lampu. Sorotkan senter HP mendatar ke sisi setiap gelas dan amati dari samping. Catat gelas mana yang memperlihatkan berkas.
3. Diamkan 15 menit, lalu sorot lagi. Apa yang berubah pada gelas berisi tanah?
4. Bersama orang dewasa, panaskan susu kedelai sampai hampir mendidih, matikan api, lalu tuangkan cuka sedikit demi sedikit sambil diaduk pelan. Amati gumpalan putih yang muncul, lalu saring dengan kain.

Keselamatan: pakai senter HP, **jangan pointer laser:** sinar laser dapat merusak retina walau hanya sekejap, dan jangan menyorot mata siapa pun. Kompor dan susu panas ditangani orang dewasa. Jangan mencicipi air sabun atau air tanah. Tahu buatanmu hanya untuk diamati bila alatnya juga dipakai untuk percobaan sabun. Cuci tangan setelah selesai.

Pertanyaan: Gelas mana yang berisi larutan, koloid, dan suspensi? Mengapa cuka membuat protein susu kedelai menggumpal? Hubungkan dengan muatan koloid dan koagulasi.



RINGKASAN KILAT

Bab 25 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **larutan**, **koloid**, dan **suspensi** dari ukuran partikel (1–1000 nm), efek Tyndall, pengendapan, dan penyaringan
- menggolongkan **jenis koloid** (sol, emulsi, buih, gel, aerosol, buih padat, sol padat) dari fase terdispersi dan medium pendispersinya
- menjelaskan **sifat koloid:** efek Tyndall, gerak Brown, adsorpsi, muatan, elektroforesis, koagulasi (aturan Hardy–Schulze), dan dialisis
- membedakan koloid **liofil** dan **liofob**, serta menjelaskan kerja **sabun dan pengemulsi** dengan model misel
- menjelaskan cara **membuat koloid** (kondensasi & dispersi) dan menghitung **dosis tawas** pada penjernihan air



Istilah kunci

koloid

Koloid

larutan

suspensi

Efek Tyndall

gerak Brown

Adsorpsi

elektroforesis

koagulasi

Koagulasi

koloid pelindung

dialisis

Koloid liofil

Koloid liofob

pengemulsi

Kondensasi



Rumus penting

$$A = \frac{6000}{\rho d}$$

Skala ukuran partikel. Luas permukaan setiap gram butiran bulat berbanding terbalik dengan diameternya: pecah butir menjadi sepuluh kali lebih kecil, permukaannya sepuluh kali lebih luas.

$$c_z \approx \frac{c_1}{z^6}$$

Daya penggumpal ion (Hardy-Schulze).

Konsentrasi ion yang cukup untuk menggumpalkan koloid turun drastis bila muatan ionnya naik: ion bermuatan 3 sekitar 729 kali lebih jago daripada ion bermuatan 1.

$$m = \frac{D \times V}{1000}$$

Dosis tawas untuk volume air. Massa tawas (gram) sama dengan dosis (mg per liter, alias ppm) dikali volume air (liter), lalu dibagi 1000 untuk mengubah miligram menjadi gram.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Koloid tidak selalu keruh, dan cairan berwarna tidak selalu koloid.
- Adsorpsi berbeda dengan absorpsi.
- Sabun tidak "melarutkan" minyak menjadi larutan sejati.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=25

Teka-teki untuk Bab 26

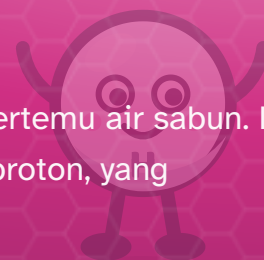
Kunyit berwarna kuning di dapur, tetapi berubah merah saat terkena air sabun. Apakah kunyit bisa "merasakan" sesuatu?

▼ Intip petunjuk

Air sabun bersifat **basa**. Zat warna kurkumin dalam kunyit berubah bentuk saat bertemu basa sehingga warnanya bergeser menjadi merah kecokelatan, lalu kembali kuning di lingkungan asam. Zat yang warnanya berubah menurut keasaman disebut **indikator**. Di Bab 26 kamu akan mengukur "rasa" asam dan basa itu dengan skala pH.

26 Asam & Basa: Ketika Kunyit Berubah Merah

Setetes air kunyit yang kuning bisa mendadak merah hanya karena bertemu air sabun. Di balik sulap dapur itu ada partikel paling mungil di dunia kimia, yaitu proton, yang berpindah dari satu molekul ke molekul lain.



Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan sifat **asam** dan **basa**, lalu mengujinya dengan **indikator** alami (kunyit, kubis ungu, bunga sepatu) dan sintesis;
- menjelaskan asam-basa menurut **Arrhenius**, **Brønsted-Lowry** (pasangan konjugat), dan **Lewis**;
- menghitung **pH**, **pOH**, $[H^+]$, dan $[OH^-]$ dengan tetapan air K_w ;
- membedakan asam/basa **kuat** dan **lemah**, lalu memakai K_a , K_b , dan derajat ionisasi untuk menghitung pH;
- menulis reaksi **netralisasi** yang setara dan memilih cara **membuat garam** di laboratorium.

SULAP KUNYIT LARAS

KOMIK • 4 PANEL

Sore hari, dapur rumah Laras di Yogyakarta

LARAS

Ini air kunyit, kuning cerah. Sekarang kutetaskan ke air sabun... perhatikan baik-baik!



sabun

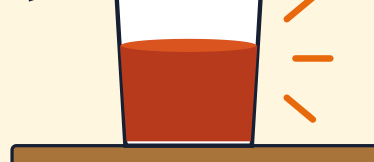
cuka

kapur

BIMA

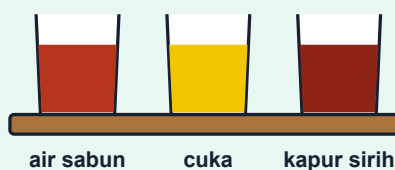
Hah?! Jadi MERAH! Kunyitnya kepanasan, ya?

WUSS!



KAK TIRTA

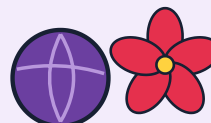
Bukan kepanasan, Bima. Air sabun dan air kapur sirih bersifat **basa**. Di dalam basa, kurkumin kunyit melepas H^+ sehingga warnanya berubah. Di cuka yang asam, ia tetap kuning.

**Kimo ikut meneliti...****KIMO**

Kunyit adalah indikator alami Nusantara! Kubis ungu dan bunga sepatu malah punya lebih banyak warna.

BIMA

Jadi dapur kita penuh alat laboratorium...

**Tebak Dulu!**

Mengapa air kunyit berubah merah kecokelatan saat ditetaskan ke air sabun?

Sabun menyimpan pewarna merah yang terlepas oleh kunyit.

Kunyit "terbakar" oleh panas yang dihasilkan sabun.

Di dalam basa, molekul kurkumin melepas ion H^+ sehingga bentuk dan warnanya berubah.

Kunyit membusuk dengan sangat cepat ketika terkena sabun.

Jawabannya: kurkumin melepas H^+ . Air sabun bersifat basa. Basa "menarik" ion hidrogen (proton) dari molekul kurkumin. Kurkumin yang kehilangan proton menyerap cahaya dengan panjang gelombang berbeda, sehingga mata kita melihat merah kecokelatan. Tidak ada yang terbakar atau membusuk: cukup teteskan cuka, dan warnanya kembali kuning!

26.1 Asam dan basa di dapurmu

Air jeruk nipis untuk sambal, cuka di acar timun, dan asam jawa di sayur asem punya satu kesamaan: rasanya masam. Kata *acid* berasal dari bahasa Latin *acidus*, artinya "masam". Zat-zat itu tergolong **asam**.

Lawan asam adalah **basa**. Air sabun, air kapur sirih, larutan soda kue, dan obat maag bersifat basa. Basa yang larut baik dalam air disebut juga **alkali**, dari bahasa Arab *al-qaly*, yaitu abu tumbuhan yang dulu dipakai untuk

membuat sabun.

Bahasa sederhana • Bayangkan asam dan basa sebagai dua tim yang saling berlawanan. Kalau keduanya dicampur dalam jumlah yang pas, mereka saling "menjinakkan" dan berubah menjadi air dan garam. Untuk tahu sebuah cairan masuk tim mana, kita tidak boleh mencicipinya. Kita memakai **indikator**, yaitu zat yang berganti warna seperti bunglon.

Sifat	Asam	Basa
Rasa (hanya untuk bahan pangan!)	masam	pahit, getir
Saat disentuh	yang pekat membakar kulit	licin seperti sabun; yang pekat merusak kulit
Kertas lakmus	biru → merah	merah → biru
Dengan logam aktif (Mg, Zn)	menghasilkan gas H ₂	umumnya tidak bereaksi
Dengan karbonat (soda kue, kapur)	berbuih gas CO ₂	tidak berbuih
pH pada 25 °C	kurang dari 7	lebih dari 7
Contoh di rumah	cuka, jeruk nipis, asam jawa, tomat, minuman bersoda	soda kue, sabun, kapur sirih, obat maag, pembersih kaca

Dua reaksi khas asam mudah diamati. Asam bereaksi dengan logam aktif seperti **Mg** menghasilkan gas hidrogen, dan dengan karbonat menghasilkan gas karbon dioksida yang berbuih:





KESELAMATAN

Di laboratorium, **jangan pernah mencicipi atau menyentuh** zat untuk menebak sifatnya. Asam dan basa pekat bersifat **korosif**: soda api (NaOH) dan asam klorida pekat dapat melukai kulit dan membutakan mata. Pakai kacamata pelindung. Di rumah, **jangan mencampur pembersih**: pemutih pakaian yang tercampur pembersih porselen yang asam melepaskan gas klorin yang beracun.



Korosif



Iritan

Indikator: bunglon kimia

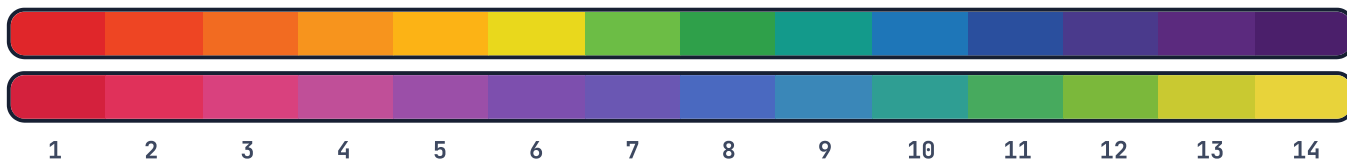


DEFINISI • INDIKATOR ASAM-BASA

Indikator adalah zat (biasanya pewarna organik yang bersifat asam lemah) yang warnanya berbeda dalam suasana asam dan basa. Perubahan warna terjadi pada rentang pH tertentu yang disebut **trayek pH** indikator itu.

Indikator	Trayek pH	Warna di sisi asam	Warna di sisi basa
Metil oranye	3,1–4,4	 merah	 kuning
Metil merah	4,4–6,2	 merah	 kuning
Bromtimol biru	6,0–7,6	 kuning	 biru
Lakmus	±4,5–8,3	 merah	 biru
Fenolftalein	8,2–10,0	 tak berwarna	 merah muda keunguan
Kunyit (kurkumin)	±7,4–8,6	 kuning	 merah kecokelatan
Kubis ungu, bunga sepatu (antosianin)	bertahap 1–14	 merah → ungu	 biru → hijau → kuning
Indikator universal (campuran)	1–14	 merah → jingga → kuning	 hijau → biru → ungu

Indikator universal dan ekstrak kubis ungu sama-sama memberi "pelangi" warna dari pH 1 sampai 14:



Atas: indikator universal. Bawah: ekstrak kubis ungu (warna nyata bisa sedikit berbeda, bergantung pada jenis kubis dan kepekatan ekstrak).



TRIK KAK TIRTA • LAKMUS

"aSaM → Merah": kata **asam** dan **merah** sama-sama punya huruf M, jadi lakmus biru memerah di dalam asam. "Basa → Biru": sama-sama berawal B, jadi lakmus merah membiru di dalam basa.

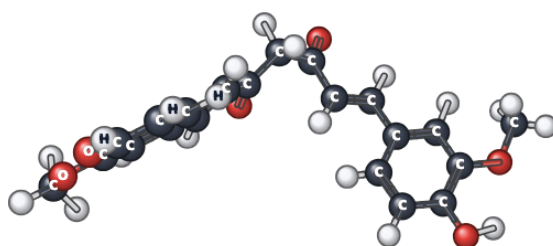


TAMU DARI MASA LALU

Pada 1664, **Robert Boyle** dari Inggris mencatat bahwa sirup bunga violet berubah merah oleh asam dan hijau oleh basa. Itu salah satu catatan tertua tentang indikator. Kertas lakmus yang kita pakai sekarang dibuat dari pewarna lumut kerak (*lichen*). Boyle memakai uji warna seperti ini untuk mengelompokkan zat menjadi asam, basa, atau netral, bukan sekadar berdasarkan rasa.

Mengapa kunyit bisa berganti warna? Jawabannya ada pada bentuk molekulnya. Putar molekul **kurkumin** di bawah ini. Bandingkan juga dengan asam-asam dapur: cari gugus —COOH pada setiap molekul. Atom H pada gugus itulah yang dilepas sebagai H^+ .

MOLEKUL 3D Kurkumin dan asam-asam dapur



Seret untuk memutar • ketuk atom untuk mengukur

Kurkumin $\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{O}_6$

Mr $\approx 368,39$

[PubChem](#) ➤

Pigmen kuning kunyit; berubah merah dalam basa, sehingga kunyit menjadi indikator asam-basa alami.

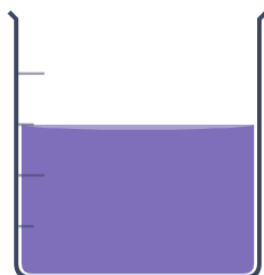
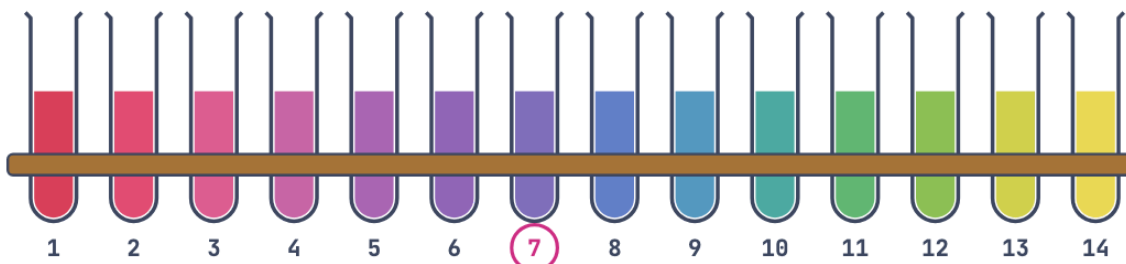
Kurkumin ($C_{21}H_{20}O_6$) punya dua gugus $-OH$ fenol dan sistem ikatan rangkap selang-seling yang panjang. Dalam basa, H^+ dari gugus $-OH$ lepas, elektron tersebar lebih luas, dan warna yang diserap bergeser: kuning menjadi merah kecokelatan. Hitung gugus $-COOH$ pada asam sitrat (jeruk nipis): ada berapa?

LAB MINI Kubis Ungu Virtual: pelangi pH 1–14

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26

Ekstrak kubis ungu pada pH 7

Ketuk tabung mana saja, atau geser penggeser pH.



Larutan + ekstrak kubis

Warna: ungu kebiruan

Bentuk antosianin dominan:

basa kuinoidal (netral → anion)

Molekul kehilangan H^+ ; serapan cahaya bergeser sehingga tampak ungu sampai biru.



pH
7

warna
ungu kebiruan

sifat
netral

tebakan benar
0 dari 0

Mode **Jelajah**: geser pH atau ketuk tabung untuk melihat warna antosianin dan bentuk molekulnya. Mode **Tebak**: pilih sampel rumah tangga, lalu ketuk tabung pembanding yang warnanya paling mirip. Bisakah kamu menebak pH air sabun hanya dari warnanya?



KIMIA NUSANTARA • LABORATORIUM DI DAPUR

Indonesia kaya indikator alami. **Kunyit** (kurkumin) kuning di suasana asam dan netral, lalu merah kecokelatan di atas pH ± 8 . **Kubis ungu**, **bunga sepatu**, dan **kulit manggis** mengandung antosianin yang berganti warna merah → ungu → hijau → kuning. Minuman **bunga telang** yang biru berubah ungu kemerahan begitu diberi perasan jeruk nipis. Bahkan jamu *kunyit asam* tetap kuning-jingga karena asam jawa membuatnya bersuasana asam.

26.2 Tiga teori: Arrhenius, Brønsted–Lowry, dan Lewis

Mengapa semua asam berperilaku mirip? Jawabannya sebuah partikel super mungil: **ion hidrogen**, H^+ . Atom **H** hanya punya satu proton dan satu elektron. Jika elektronnya lepas, yang tersisa hanyalah **sebuah proton telanjang**. Karena itu kimiawan sering menyebut H^+ sebagai "proton".



TEORI ARRHENIUS (1887)

Asam adalah zat yang dalam air menghasilkan ion H^+ . **Basa** adalah zat yang dalam air menghasilkan ion OH^- .



H^+ TIDAK PERNAH SENDIRIAN

Proton telanjang terlalu kecil dan terlalu "lapar" elektron untuk berkeliaran sendiri. Di dalam air, ia langsung menempel pada pasangan elektron bebas atom O molekul air dan membentuk **ion hidronium**, H_3O^+ : $\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_3\text{O}^+$. Jadi $\text{H}^+(\text{aq})$ dan $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ hanyalah dua cara menulis hal yang sama.

Teori Arrhenius punya kelemahan. Amonia, NH_3 , jelas bersifat basa (membirukan lakmus), padahal tidak punya gugus OH. Selain itu, gas HCl dan gas NH_3 bereaksi membentuk asap putih NH_4Cl **tanpa air sama sekali**. Kita butuh definisi yang lebih luas.



DEFINISI • TEORI BRØNSTED-LOWRY (1923)

Asam adalah **donor proton** (pemberi H^+). **Basa** adalah **akseptor proton** (penerima H^+). Setelah asam memberikan H^+ , sisanya menjadi **basa konjugat**. Setelah basa menerima H^+ , ia menjadi **asam konjugat**. Dua spesi yang hanya berbeda satu H^+ disebut **pasangan asam-basa konjugat**.

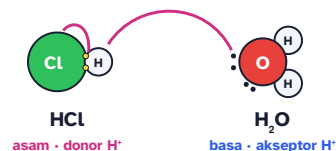
Ikuti perjalanan satu proton dalam animasi ini. Perhatikan panah lengkung: panah selalu berangkat dari **pasangan elektron** menuju tempat ikatan baru terbentuk.

Reaksi 1: gas HCl larut dalam air



Langkah 1. Molekul HCl mendekati molekul air. Atom O pada air punya dua pasangan elektron bebas (titik hitam). Titik kuning adalah pasangan elektron ikatan H-Cl.

Reaksi 1: gas HCl larut dalam air



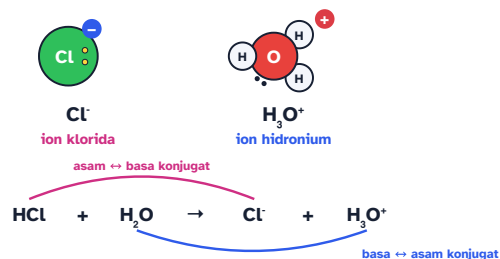
Langkah 2. Pasangan elektron bebas O "menjangkau" atom H (panah lengkung atas), sementara elektron ikatan H-Cl ditarik ke Cl (panah bawah). HCl berperan sebagai **asam** (donor H^+), air sebagai **basa** (akseptor H^+).

Reaksi 1: gas HCl larut dalam air



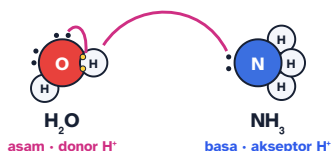
Langkah 3. Proton pindah! Yang berpindah hanya intinya, H^+ . Kedua elektron ikatan tertinggal pada Cl, sehingga terbentuk ion klorida Cl^- dan ion hidronium H_3O^+ .

Reaksi 1: gas HCl larut dalam air



Langkah 4. Pasangan konjugat: HCl/Cl^- dan $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$. Setiap pasangan hanya berbeda **satu** H^+ .

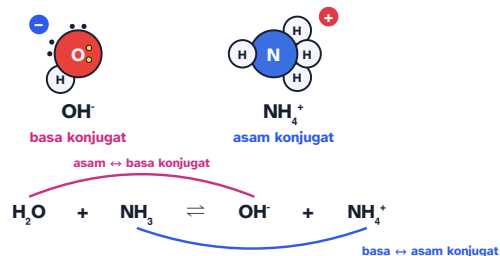
Reaksi 2: amonia larut dalam air



Langkah 5. Sekarang air bertemu amonia. Pasangan elektron bebas N menarik satu H dari air. Kali ini air menjadi **asam**, amonia menjadi **basa**.

Reaksi 2: amonia larut dalam air

Air menjadi basa di reaksi 1 dan asam di reaksi 2: amfiprotik!



Langkah 6. Hasilnya OH^- dan NH_4^+ . Reaksinya setimbang () karena amonia basa lemah. Air bisa memberi atau menerima proton: air bersifat **amfiprotik**.



AWAS JEBAKAN

Pasangan konjugat **bukan** asam dan basa yang saling bereaksi. Pada $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}^- + \text{H}_3\text{O}^+$, pasangan $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$ **bukan** pasangan konjugat. Pasangan yang benar adalah HCl/Cl^- dan $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$: rumusnya hampir sama, hanya berbeda satu H^+ .

Selain air, spesi seperti HCO_3^- (ion hidrogen karbonat dalam darah dan soda kue) dan H_2PO_4^- juga **amfiprotik**. Ion HCO_3^- dapat memberi H^+ (menjadi CO_3^{2-}) atau menerima H^+ (menjadi H_2CO_3). Sifat inilah yang nanti membuatnya menjadi "penjaga pH" darah.

CONTOH Menemukan pasangan konjugat

Tentukan asam, basa, dan kedua pasangan konjugat pada reaksi $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- \longrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$.

- 1 Lacak proton: HCO_3^- kehilangan satu H menjadi CO_3^{2-} . Jadi HCO_3^- adalah **asam** (donor H^+).
- 2 OH^- menerima H menjadi H_2O . Jadi OH^- adalah **basa** (akseptor H^+).
- 3 Pasangan konjugat: $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ dan $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$.

Asam: HCO_3^- ; **basa:** OH^- . **Pasangan konjugat:** $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ dan $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$. **Perhatikan:** muatan juga ikut berubah satu satuan setiap kali satu H^+ berpindah.

Pada tahun yang sama (1923), **Gilbert N. Lewis** memandang reaksi asam-basa dari sudut **elektron**, bukan proton. Ingat: basa Brønsted menerima H^+ dengan memakai pasangan elektron bebasnya. Lewis bertanya, "Bagaimana kalau yang menerima pasangan elektron itu bukan H^+ ?"

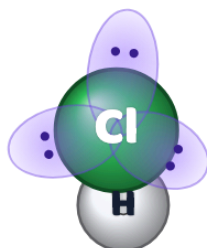


DEFINISI · TEORI LEWIS

Asam Lewis adalah **akseptor pasangan elektron**; **basa Lewis** adalah **donor pasangan elektron**. Keduanya membentuk ikatan kovalen koordinasi. Contoh: $\text{BF}_3 + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{F}_3\text{B}-\text{NH}_3$. Atom B pada BF_3 hanya dikelilingi 6 elektron, sehingga "haus" pasangan elektron dari N.

Teori	Asam	Basa	Contoh khas	Cakupan
Arrhenius	menghasilkan H^+ dalam air	menghasilkan OH^- dalam air	HCl , NaOH	hanya larutan dalam air
Brønsted-Lowry	donor H^+	akseptor H^+	$\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{HCl} + \text{NH}_3$ (gas)	semua reaksi pindah proton
Lewis	akseptor pasangan elektron	donor pasangan elektron	$\text{BF}_3 + \text{NH}_3$, $\text{Cu}^{2+} + 4 \text{NH}_3$	paling luas, termasuk ion logam

MOLEKUL 3D Para pemain teori asam-basa



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Hidrogen klorida ClH

Mr $\approx$ 36,46

[PubChem](#)

Larutannya adalah asam klorida; asam lambung kita mengandung HCl.

Nyalakan pasangan elektron bebas. Bandingkan NH_3 (satu pasangan bebas, sudut $\pm 107^\circ$) dengan NH_4^+ (tanpa pasangan bebas, $109,5^\circ$): ke mana perginya pasangan bebas itu? Lalu lihat BF_3 yang datar. Di mana tempat kosong yang menunggu pasangan elektron?



TAMU DARI MASA LALU

Svante Arrhenius dari Swedia mengajukan gagasan bahwa zat elektrolit pecah menjadi ion di dalam air dalam disertasinya (1884). Para pengujinya meragukannya dan memberinya nilai pas-pasan, tetapi gagasan itu kemudian mengantarnya meraih Nobel Kimia 1903. Pada 1923, **Johannes Brønsted** (Denmark) dan **Thomas Lowry** (Inggris) secara terpisah merumuskan teori donor-akseptor proton, dan pada tahun yang sama **G. N. Lewis** (Amerika Serikat) memperluasnya menjadi teori pasangan elektron.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

ION LOGAM YANG BERSIFAT ASAM

Mengapa larutan tawas atau besi(III) klorida terasa asam, padahal tidak mengandung atom H yang "asam"? Ion logam bermuatan tinggi adalah asam Lewis: ia diselimuti molekul air melalui ikatan koordinasi. Muatan +3 yang kecil dan padat menarik elektron ikatan O-H, sehingga salah satu H^+ mudah lepas:



Untuk $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, $pK_a \approx 2,2$: seasam asam fosfat! Itu sebabnya pengolahan air yang memakai tawas (Bab 25) dapat menurunkan pH, sehingga instalasi air sering menambahkan kapur untuk mengembalikannya.

26.3 pH, pOH, dan tetapan air

Air murni ternyata tidak "diam". Setiap saat, segelintir molekul air saling melempar proton: satu molekul berperan sebagai asam, yang lain sebagai basa. Peristiwa ini disebut **swaionisasi air** (autoionisasi):



ATURAN • TETAPAN KESETIMBANGAN AIR, K_w

Pada 25 °C, hasil kali konsentrasi ion hidronium dan ion hidroksida dalam larutan berair **selalu tetap**:

$$K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 1,0 \times 10^{-14}$$

Dalam air murni, $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 1,0 \times 10^{-7}$ M. Larutan **asam** bila $[\text{H}_3\text{O}^+] > [\text{OH}^-]$, **basa** bila $[\text{H}_3\text{O}^+] < [\text{OH}^-]$, dan **netral** bila keduanya sama.



FAKTA UNIK DARI KIMO

Satu liter air berisi $\pm 55,5$ mol molekul air, tetapi hanya $1,0 \times 10^{-7}$ mol yang terionisasi. Artinya kira-kira **2 dari setiap 1 miliar** molekul air sedang menjadi ion. Sedikit sekali, tetapi cukup untuk membuat air murni sedikit menghantarkan listrik.

Konsentrasi H^+ dalam larutan sehari-hari berkisar dari sekitar 1 M sampai 10^{-14} M. Menulis angka sekecil itu merepotkan, jadi kimiawan memakai logaritma:



DEFINISI • PH DAN POH

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad \text{pOH} = -\log[\text{OH}^-] \quad \text{pH} + \text{pOH} = \text{p}K_w = 14,00 \text{ (25 °C)}$$

Jadi $[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$. Makin kecil pH, makin asam larutannya. Larutan netral pada 25 °C mempunyai pH 7.



Tebak Dulu!

Air jeruk nipis ber-pH 2, sedangkan air gambut ber-pH 4. Berapa kali lebih besar $[H^+]$ dalam air jeruk nipis?

2 kali, karena 4 dibagi 2 sama dengan 2.

Air gambut yang lebih asam, karena angka pH-nya lebih besar.

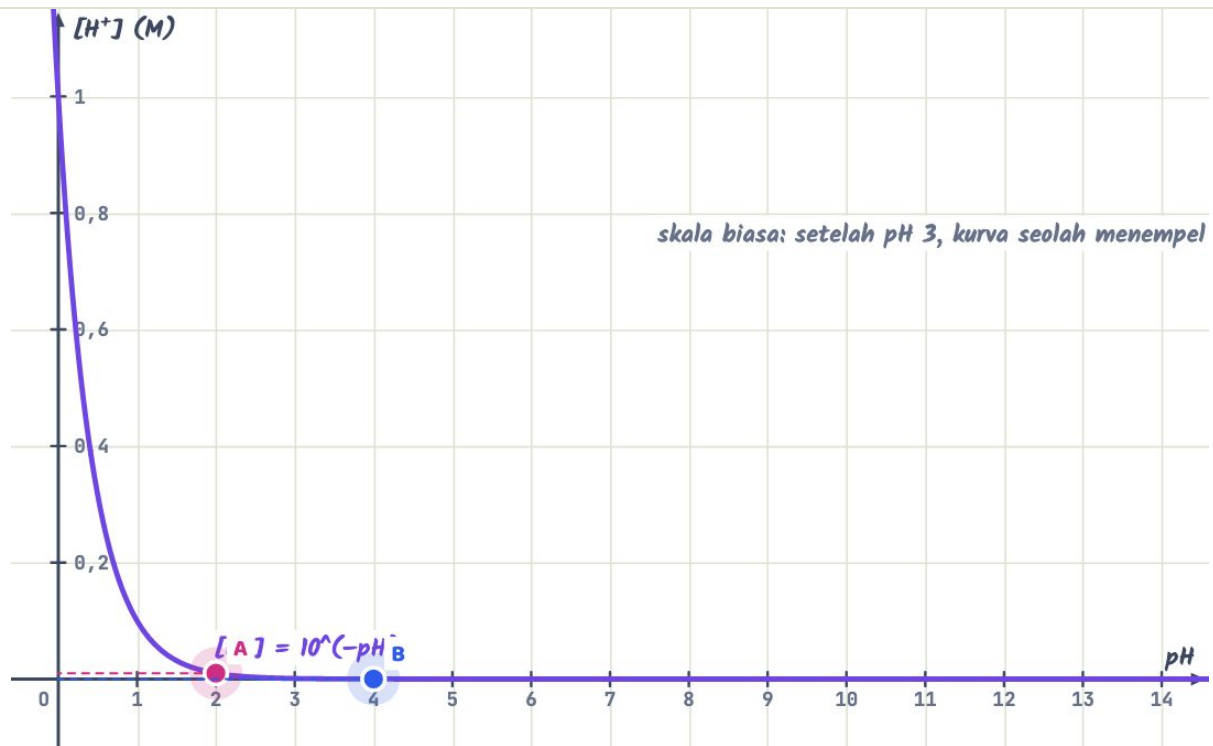
100 kali.

20 kali.

Jawabannya: 100 kali. pH adalah skala logaritma: setiap turun 1 angka pH, $[H^+]$ naik 10 kali. Dari pH 4 ke pH 2 ada dua langkah, jadi $10 \times 10 = 100$ kali. Secara langsung: $10^{-2} \div 10^{-4} = 10^2$.

$$[H^+] = 10^{-pH}$$

$$pH_A = 2 : [H^+]_A = 0,01 \text{ M} \quad pH_B = 4 : [H^+]_B = 1 \times 10^{-4} \text{ M}$$



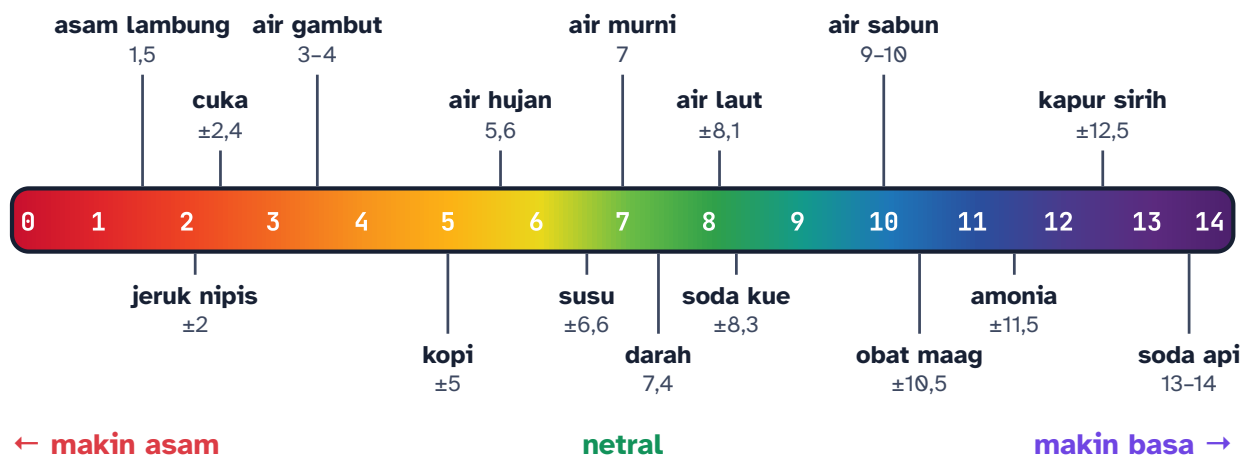
selisih 2 pH = 100 kali lipat

$[H^+]$ di A
0,01 M

$[H^+]$ di B
 $1 \times 10^{-4} \text{ M}$

$[H^+] \text{ A} \div [H^+] \text{ B}$
100 kali

Seret titik A dan B. Pada skala biasa, perhatikan bahwa larutan ber-pH 4 dan ber-pH 12 sama-sama tampak "nol". Ganti ke skala logaritma (geser penggeser ke 1): sekarang setiap langkah 1 pH berjarak sama, padahal artinya 10 kali lipat. Itulah alasan Sørensen menciptakan pH.



Pelangi pH di sekitar kita (nilai kira-kira pada 25 °C). Darah dijaga ketat di pH 7,35–7,45; air hujan normal sedikit asam karena melarutkan CO₂ dari udara.

RUMUS HIDUP **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.

[OH⁻] Konsentrasi ion hidroksida mol/L

pH pH larutan

PH LARUTAN

11

basa: OH⁻ lebih banyak daripada H⁺

pOH = 3, pH = 11, dan [H⁺] = Kw ÷ [OH⁻] = 1 × 10⁻¹¹ M.

Cek satuan: pH + pOH = pKw = 14,00 (25 °C)

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



AWAS JEBAKAN

pH 7 berarti netral **hanya pada 25 °C**. Netral artinya [H⁺] = [OH⁻]. Swaionisasi air bersifat endoterm, jadi *K_w* membesar bila suhu naik. Pada suhu tubuh (37 °C), air murni ber-pH 6,8, dan pada 100 °C ber-pH 6,1, tetapi tetap **netral**.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

K_w BERGANTUNG PADA SUHU

Suhu	K_w	pK_w	pH air murni (netral)
0 °C	$1,1 \times 10^{-15}$	14,94	7,47
25 °C	$1,0 \times 10^{-14}$	14,00	7,00
37 °C	$2,4 \times 10^{-14}$	13,62	6,81
50 °C	$5,5 \times 10^{-14}$	13,26	6,63
100 °C	$5,1 \times 10^{-13}$	12,29	6,15

Karena K_w naik ketika dipanaskan, kesetimbangan $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ bergeser ke kanan pada suhu tinggi. Menurut asas Le Chatelier (Bab 22), reaksi ke kanan itu **endoterm** ($\Delta H \approx +56$ kJ/mol, kebalikan dari kalor netralisasi).



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1909, **Søren Sørensen**, kepala bagian kimia Laboratorium Carlsberg di Kopenhagen, sedang meneliti enzim dan protein yang sangat peka terhadap keasaman. Ia lelah menulis angka seperti 0,0000001, lalu mengusulkan "eksponen ion hidrogen" yang ditulis p_H . Arti huruf "p" masih diperdebatkan; banyak buku menyebutnya "potensi" atau "pangkat" hidrogen.



TRIK KAK TIRTA • pH TANPA KALKULATOR

Tulis $[\text{H}^+]$ dalam bentuk $k \times 10^{-n}$. Maka $\text{pH} = n - \log k$. Hafalkan tiga angka sakti: $\log 2 \approx 0,30$, $\log 3 \approx 0,48$, $\log 5 \approx 0,70$. Contoh: $[\text{H}^+] = 2 \times 10^{-3} \rightarrow \text{pH} = 3 - 0,30 = 2,70$. Cek kewajaran: 2×10^{-3} sedikit lebih besar daripada 10^{-3} , jadi pH-nya sedikit di bawah 3. ✓



Tebak Dulu!

Cuka dapur 5% (asam asetat $\pm 0,83$ M, asam lemah) dibandingkan dengan asam klorida 0,001 M (asam kuat). Mana yang pH-nya lebih rendah?

Asam klorida, karena asam kuat selalu lebih asam daripada asam lemah.

Cuka dapur, karena jauh lebih pekat.

Sama saja, karena keduanya asam.

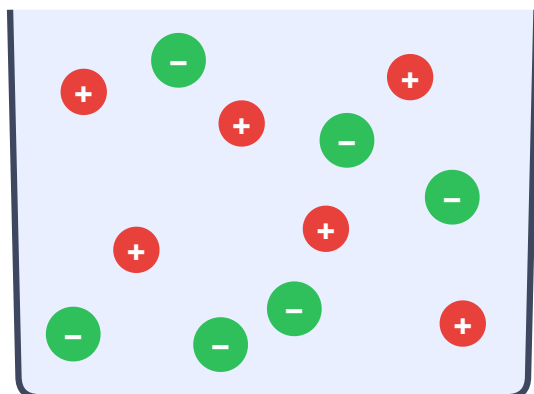
Cuka dapur pH-nya 7, karena cuka aman dimakan.

Jawabannya: cuka dapur. Asam klorida 0,001 M terionisasi sempurna, tetapi $[H^+]$ -nya hanya 0,001 M (pH 3). Cuka hanya melepas $\pm 0,5\%$ molekulnya, tetapi molekulnya 830 kali lebih banyak, sehingga $[H^+] \approx 0,0039$ M (pH $\pm 2,4$). "Kuat" dan "pekat" adalah dua hal yang berbeda!

Asam disebut **asam kuat** bila **terionisasi sempurna** di dalam air: hampir tidak ada molekul utuh yang tersisa. Asam disebut **asam lemah** bila hanya **sebagian kecil** molekulnya terionisasi, sehingga terjadi kesetimbangan (perhatikan panah dua arah):

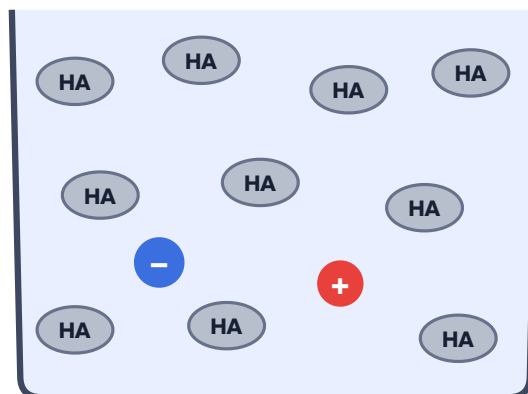


Asam kuat: HCl(aq) 0,1 M



terionisasi $\pm 100\%$: lampu uji terang

Asam lemah: CH₃COOH(aq) 0,1 M



terionisasi $\pm 1,3\%$: lampu uji redup

Merah $\oplus$ = H₃O⁺, hijau $\ominus$ = Cl⁻, biru $\ominus$ = CH₃COO⁻, abu-abu "HA" = molekul CH₃COOH yang utuh.
Gambar tidak berskala: sebenarnya hanya ± 1 dari 75 molekul asam asetat yang terionisasi.

Asam kuat yang perlu kamu kenal: HCl, HBr, HI, HNO₃, H₂SO₄ (untuk H⁺ pertama), dan HClO₄. Hampir semua asam lain, terutama asam organik bergugus -COOH, H₂CO₃, HF, dan HCN, adalah **asam lemah**. **Basa kuat**: hidroksida golongan 1 (LiOH, NaOH, KOH) serta Ca(OH)₂, Sr(OH)₂, dan Ba(OH)₂ (bagian yang larut terionisasi sempurna). **Basa lemah**: amonia dan amina.



ATURAN • TETAPAN IONISASI DAN DERAJAT IONISASI

Untuk asam lemah $HA \rightleftharpoons H^+ + A^-$ dan basa lemah $B + H_2O \rightleftharpoons BH^+ + OH^-$:

$$K_a = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]} \quad K_b = \frac{[BH^+][OH^-]}{[B]} \quad \alpha = \frac{\text{mol zat yang terionisasi}}{\text{mol zat mula-mula}} \approx \sqrt{\frac{K_a}{C_a}}$$

Makin besar K_a (makin kecil $pK_a = -\log K_a$), makin kuat asamnya. Derajat ionisasi α asam kuat = 1 (100%); asam lemah $0 < \alpha < 1$.

Zat	Rumus	K_a atau K_b (25 °C)	pK	Ada di
Asam klorida	HCl	sangat besar (kuat)	≈ -6	cairan lambung
Asam fosfat (H ⁺ pertama)	H ₃ PO ₄	$7,1 \times 10^{-3}$	2,15	minuman bersoda, pupuk
Asam sitrat (H ⁺ pertama)	C ₆ H ₈ O ₇	$7,4 \times 10^{-4}$	3,13	jeruk nipis, belimbing wuluh
Asam format	HCOOH	$1,8 \times 10^{-4}$	3,75	sengatan semut rangrang

Asam laktat	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$	$1,4 \times 10^{-4}$	3,86	yoghurt, acar, otot yang lelah
Asam asetat	CH_3COOH	$1,8 \times 10^{-5}$	4,74	cuka dapur, cuka aren
Asam karbonat (H^+ pertama)	H_2CO_3	$4,3 \times 10^{-7}$	6,37	air hujan, minuman bersoda
Asam sianida	HCN	$4,9 \times 10^{-10}$	9,31	terlepas dari singkong pahit mentah
Amonia (basa)	NH_3	$K_b = 1,8 \times 10^{-5}$	$\text{p}K_b$ 4,74	pembersih kaca, pupuk
Metilamina (basa)	CH_3NH_2	$K_b = 4,4 \times 10^{-4}$	$\text{p}K_b$ 3,36	bau amis ikan (golongan amina)



AWAS JEBAKAN

Asam kuat **tidak sama** dengan asam pekat. **Kuat/lemah** menyatakan berapa bagian molekul yang terionisasi; **pekat/encer** menyatakan berapa banyak zat per liter larutan. Keempat kombinasinya ada:

	Pekat	Encer
Kuat	HCl 37% di botol laboratorium (sangat berbahaya)	HCl 0,001 M (pH 3)
Lemah	cuka biang 25% (tetap korosif bagi kulit dan mata!)	cuka 0,01 M (pH $\pm 3,4$)

MITOS

"Asam kuat pasti lebih berbahaya daripada asam lemah."

MITOS

"Basa itu aman karena bukan asam."

FAKTA

Bahaya juga bergantung pada konsentrasi. Cuka biang 25% (asam lemah) dapat melukai kulit dan mata, sedangkan HCl 0,0001 M (asam kuat) hampir tak berbeda dari air hujan asam (pH 4).

FAKTA

Basa kuat seperti soda api justru sangat berbahaya bagi mata: ia memecah lemak dan protein jaringan. Tumpahan basa di mata harus dibilas air mengalir selama 15 menit dan segera dibawa ke dokter.

MITOS

"Semua garam bersifat netral."

FAKTA

Larutan soda kue (NaHCO_3) sedikit basa ($\text{pH} \pm 8,3$), sedangkan larutan amonium klorida sedikit asam. Rahasiannya adalah hidrolisis garam, yang akan kamu pelajari di Bab 27.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

HUBUNGAN K_A , K_B , DAN HUKUM PENGECERAN OSTWALD

Untuk satu pasangan konjugat, misalnya $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$, hasil kali tetapannya sama dengan K_w :

$$K_a \times K_b = K_w \quad \Longleftrightarrow \quad \text{p}K_a + \text{p}K_b = 14,00 \quad (25^\circ\text{C})$$

Jadi makin kuat suatu asam, makin lemah basa konjugatnya. Cl^- dari asam kuat HCl praktis tidak punya sifat basa, sedangkan CH_3COO^- adalah basa lemah dengan $K_b = 10^{-14}/1,8 \times 10^{-5} = 5,6 \times 10^{-10}$.

Dari $K_a = \frac{C\alpha^2}{1-\alpha}$, Wilhelm Ostwald menyimpulkan bahwa α **membesar** bila larutan diencerkan.

Asam asetat 0,1 M terionisasi 1,3%, tetapi pada 0,001 M menjadi $\pm 12,5\%$. Encerkan terus, dan asam lemah pun hampir terionisasi sempurna!

26.5 Menghitung pH asam dan basa

Kini kita gabungkan semuanya. Kunci pertama: tentukan dulu jenis zatnya. Asam/basa kuat dihitung langsung dari konsentrasinya; asam/basa lemah membutuhkan K_a atau K_b .

Jenis larutan	Rumus konsentrasi ion	Lalu
Asam kuat, valensi a	$[\text{H}^+] = a \cdot C_a$	$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$
Basa kuat, valensi b	$[\text{OH}^-] = b \cdot C_b$	$\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-]$, $\text{pH} = 14 - \text{pOH}$
Asam lemah	$[\text{H}^+] \approx \sqrt{K_a \cdot C_a}$	$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$
Basa lemah	$[\text{OH}^-] \approx \sqrt{K_b \cdot C_b}$	$\text{pH} = 14 - \text{pOH}$

$$\text{pH} = -\log(a \times C_a)$$

Asam kuat melepas semua H^+ -nya. Kalikan konsentrasi asam dengan jumlah H^+ per molekul, lalu ambil minus logaritmanya.

 C_a

Konsentrasi asam mol/L

 a Valensi asam (H^+ per molekul)

pH

pH

PH

2

🕒 kira-kira seasam air jeruk nipis

pH tepat 2

$[\text{H}^+] = 0,01 \text{ M}$, jadi $\text{pH} = 2$. Larutan ini **100.000** kali lebih asam daripada air murni.

Cek satuan: pH tak bersatuan; yang di-log adalah angka $[\text{H}^+]$ dalam mol/L

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PH-ASAM-KUAT](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-ph-asam-kuat)

CONTOH

pH cairan lambung

Cairan lambung mengandung HCl kira-kira **0,03 M**. Berapa pH-nya?

1 HCl asam kuat bervalensi 1, jadi $[\text{H}^+] = 1 \times 0,03 = 3 \times 10^{-2} \text{ M}$.

2 $\text{pH} = -\log(3 \times 10^{-2}) = 2 - \log 3 = 2 - 0,48 = 1,52$.

pH $\approx 1,5$. Sangat asam, cukup untuk membunuh sebagian besar kuman dalam makanan. Dinding lambung melindungi dirinya dengan lapisan lendir.

RUMUS HIDUP 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.

K_a Tetapan ionisasi asam

C_a Konsentrasi asam mol/L

pH pH (rumus akar)

PH (RUMUS AKAR)

2,87

 Ka asam asetat (cuka)

$[\text{H}^+] \approx 0,001 \text{ M}$, $\text{pH} \approx 2,87$. Hitungan persis (rumus kuadrat): $\text{pH} = 2,875$, dengan derajat ionisasi $\alpha = 1,333\%$.

Cek satuan: $\sqrt{(\text{Ka} \times \text{mol/L})} \rightarrow [\text{H}^+]$ dalam mol/L (Ka dipakai tanpa satuan)

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

KERJAKAN BERSAMA pH cuka encer

Hitung pH dan derajat ionisasi larutan asam asetat **0,10 M** ($K_a = 1,8 \times 10^{-5}$). Bandingkan dengan HCl **0,10 M**.

- 1 Asam lemah: $[\text{H}^+] \approx \sqrt{K_a C} = \sqrt{1,8 \times 10^{-5} \times 0,10} = \sqrt{1,8 \times 10^{-6}} = 1,34 \times 10^{-3} \text{ M}$.
- 2 $\text{pH} = -\log(1,34 \times 10^{-3}) = 3 - \log 1,34 = 3 - 0,13 = 2,87$.
- 3 $\alpha = \frac{1,34 \times 10^{-3}}{0,10} = 0,0134 = 1,34\%$. Karena $\alpha < 5\%$, pendekatan akar dapat dipercaya.
- 4 HCl 0,10 M: $[\text{H}^+] = 0,10 \text{ M}$, $\text{pH} = 1,00$.

Asam asetat 0,10 M: pH 2,87, $\alpha = 1,34\%$. Pada konsentrasi sama, HCl ber-pH 1,00: $[\text{H}^+]$ -nya ± 75 kali lebih besar.

RUMUS HIDUP 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.

K_b Tetapan ionisasi basa

C_b Konsentrasi basa mol/L

pH pH

PH
11,13

 Kb amonia

basa cukup kuat: jauhkan dari mata

$[\text{OH}^-] \approx 0,001 \text{ M}$, $\text{pOH} \approx 2,872$, jadi $\text{pH} \approx 11,13$. Hanya 1,342% molekul basa yang menarik H^+ .

Cek satuan: $\text{pH} = 14 - \text{pOH}$ (25 °C)

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-PH-BASA-LEMAH](https://aurumgen.my.id/chemipedia#rm-ph-basa-lemah)

KERJAKAN BERSAMA Air kapur sirih

Air kapur sirih jenuh kira-kira mengandung 0,020 M $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang larut. Hitung pH-nya pada 25 °C.

1 $\text{Ca}(\text{OH})_2 \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^-$: basa kuat bervalensi 2, jadi $[\text{OH}^-] = 2 \times 0,020 = 0,040 \text{ M}$.

2 $\text{pOH} = -\log 0,040 = 2 - \log 4 = 2 - 0,60 = 1,40$.

3 $\text{pH} = 14 - 1,40 = 12,60$.

$\text{pH} \approx 12,6$. Itulah sebabnya kunyit langsung merah di air kapur sirih, dan mengapa kapur sirih tidak boleh terkena mata.

**ADU CEPAT****Adu Cepat: pH asam kuat**ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26**Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.**

Bila $[H^+] = k \times 10^{-n}$, maka $pH = n - \log k$. Ingat $\log 2 \approx 0,30$; $\log 4 \approx 0,60$; $\log 5 \approx 0,70$.

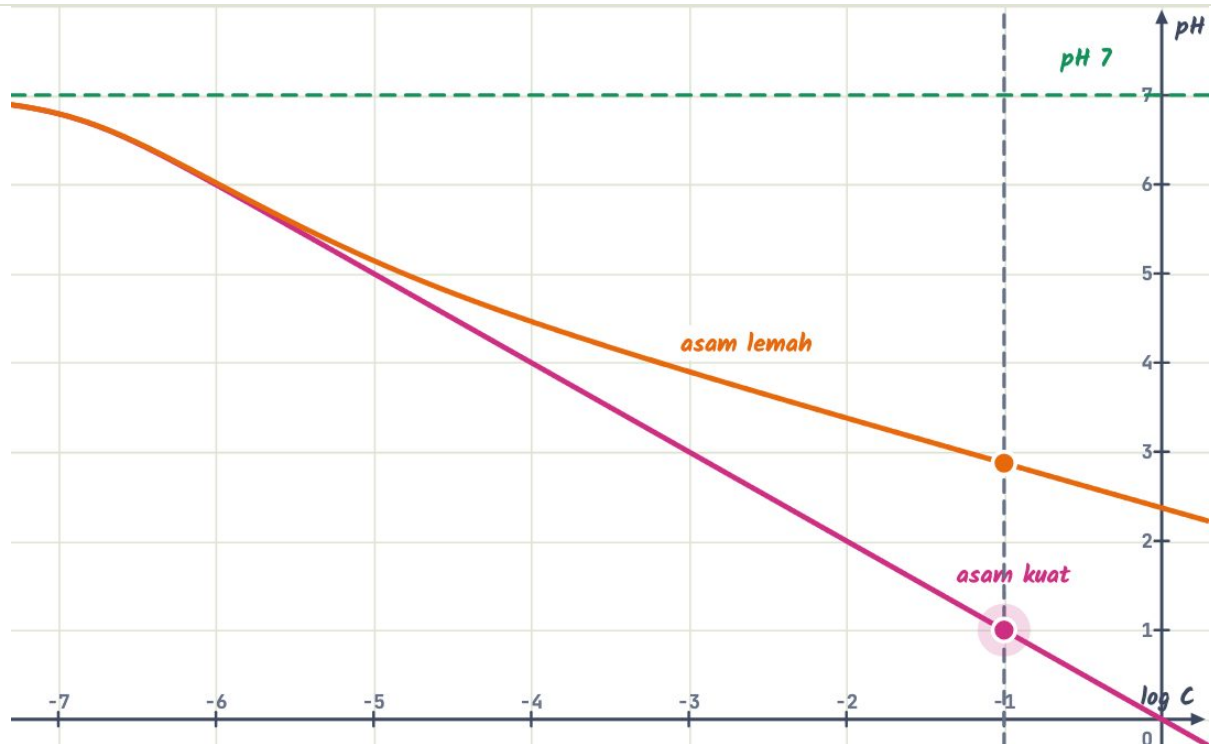
**ADU CEPAT****Adu Cepat: pH basa kuat**ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-26**Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.**

Hitung pOH dulu: $pOH = n - \log k$. Lalu $pH = 14 - pOH$.

Apa yang terjadi bila asam terus diencerkan? Grafik berikut membandingkan asam kuat dan asam lemah dari 1 M sampai 10^{-7} M.

$$\text{pH} = f(\log C)$$

$$C = 0,1 \text{ M} : \quad \text{pH}_{\text{kuat}} = 1, \quad \text{pH}_{\text{lemah}} = 2,87$$



encerkan 10x → pH asam kuat naik 1, asam lemah hanya ±0,5

pKa asam asetat

C

0,1 M

pH asam kuat

1

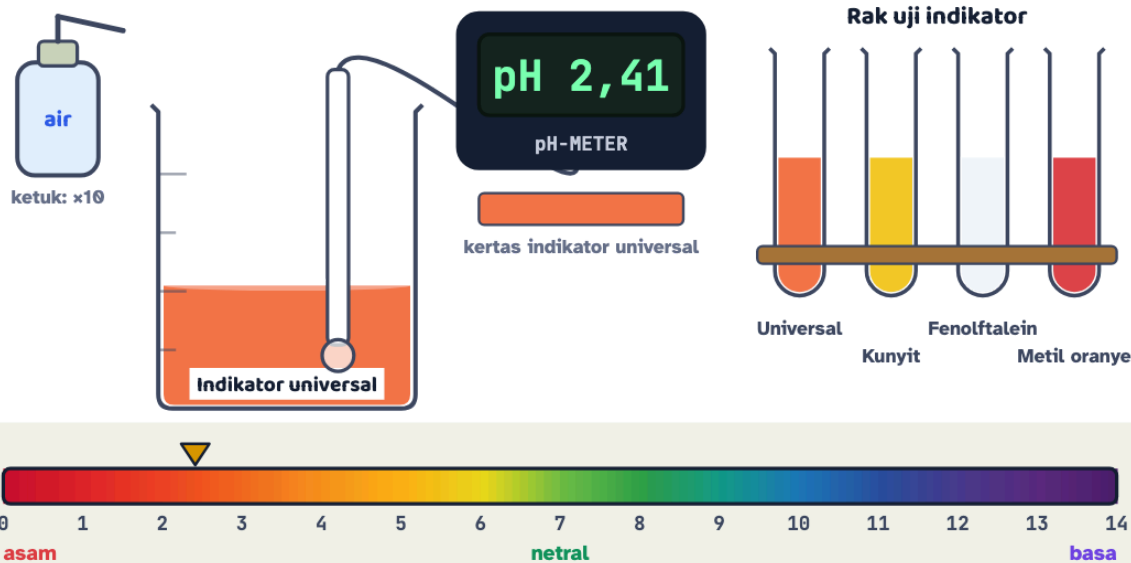
pH asam lemah

2,87

α asam lemah

1,3 %

Seret titik merah muda ke kiri (makin encer). Kemiringan garis asam kuat -1 , sedangkan asam lemah hanya $-\frac{1}{2}$ (selama α kecil). Lalu ubah pKa: asam dengan pKa 2 nyaris sekuat HCl saat encer, sedangkan asam dengan pKa 9 hampir tidak mengubah pH air.

Cuka dapur ($\pm 5\%$)asam asetat • asam lemah • $K = 1,8 \times 10^{-5}$ • $C = 0,83 \text{ M}$ 

konsentrasi

0,83 M $[\text{H}^+]$ (M) **$3,86 \times 10^{-3}$**

pH

2,41

pOH

11,59

terionisasi

0,46%

sifat

asam (asam lemah)

Pilih larutan rumah tangga, lalu ketuk botol semprot (atau tombol ) untuk mengencerkannya 10 kali.

Perhatikan angka pH-meter, warna kertas indikator universal, dan rak tabung indikator. Coba: mengapa cuka yang diencerkan sejuta kali tetap tidak menjadi basa? Kapan kunyit mulai memerah?

**AWAS JEBAKAN**

Mengencerkan asam **tidak pernah** membuat pH-nya melewati 7. $\text{HCl } 10^{-8} \text{ M}$ tidak ber-pH 8! Pada larutan sangat encer, ion H^+ dari air sendiri (10^{-7} M) tidak boleh diabaikan, sehingga pH-nya $\pm 6,98$: tetap sedikit asam.



KAPAN RUMUS AKAR BOLEH DIPAKAI?

Rumus $[\text{H}^+] = \sqrt{K_a C}$ berasal dari $K_a = \frac{x^2}{C-x}$ dengan anggapan $C-x \approx C$. Anggapan ini aman bila $\alpha < 5\%$, kira-kira saat $C/K_a > 400$. Bila tidak, selesaikan persamaan kuadratnya:

$$x^2 + K_a x - K_a C = 0 \Rightarrow x = [\text{H}^+] = \frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4K_a C}}{2}$$

Untuk asam kuat yang **sangat encer** ($C \lesssim 10^{-6}$ M), gunakan neraca muatan $[\text{H}^+] = C + [\text{OH}^-] = C + K_w/[\text{H}^+]$, sehingga

$$[\text{H}^+] = \frac{C + \sqrt{C^2 + 4K_w}}{2}$$

Contoh: HCl $1,0 \times 10^{-7}$ M memberi $[\text{H}^+] = 1,62 \times 10^{-7}$ M, pH 6,79, bukan 7,00.

26.6 Netralisasi dan pembuatan garam

Ketika asam bertemu basa, H^+ dan OH^- bergabung membentuk air. Reaksi ini disebut **netralisasi**. Ion-ion lain (misalnya Na^+ dan Cl^-) hanya "menonton" sebagai **ion penonton**, lalu menjadi **garam** bila airnya diuapkan.

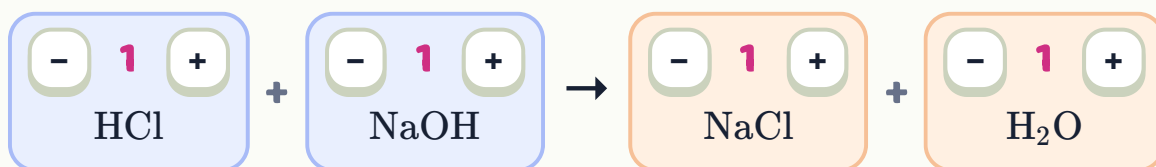


Netralisasi asam kuat oleh basa kuat selalu melepas kalor sekitar **57 kJ per mol air** yang terbentuk, apa pun asam dan basanya, karena reaksi intinya sama: $\text{H}^+ + \text{OH}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$. Coba setarakan beberapa reaksi netralisasi di bawah ini, termasuk reaksi obat maag dan pengapuran.

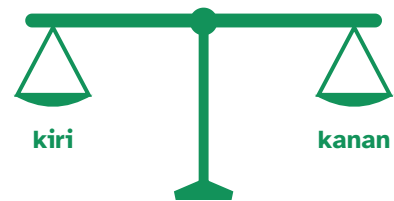


PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi netralisasi



Unsur	Kiri	Kanan	
H	2 ○ ○	2 ○ ○	✓
Cl	1 ●	1 ●	✓
Na	1 ●	1 ●	✓
O	1 ●	1 ●	✓



✓ **Setara!** $\text{HCl} + \text{NaOH} \longrightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$

Petunjuk

Ulang

Persamaan berikutnya ▶

Persamaan 1 dari 8

✓ **pernah kamu setarakan**

Petunjuk: hitung dulu jumlah H^+ dari asam dan OH^- dari basa. Jumlah keduanya harus sama, dan jumlah H_2O yang terbentuk sama dengan jumlah H^+ yang dinetralkan. Reaksi ke-4 adalah obat maag menetralkan asam lambung; reaksi ke-7 adalah kapur menetralkan tanah masam.

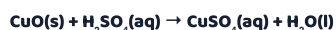
Asam bereaksi dengan...	Hasil	Contoh setara
basa (hidroksida)	garam + air	$\text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NaOH} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
oksida logam (oksida basa)	garam + air	$\text{CuO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$
karbonat atau hidrogen karbonat	garam + air + CO_2	$\text{CaCO}_3 + 2 \text{HCl} \longrightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
logam aktif	garam + H_2	$\text{Zn} + 2 \text{HCl} \longrightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$
amonia	garam amonium	$\text{NH}_3 + \text{HNO}_3 \longrightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$ (pupuk)

Nama garam diambil dari logam (atau amonium) dan sisa asamnya: asam klorida → **klorida**, asam sulfat → **sulfat**, asam nitrat → **nitrat**, asam asetat → **asetat** (etanoat), asam fosfat → **fosfat**.

Membuat garam di laboratorium (gaya IGCSE)

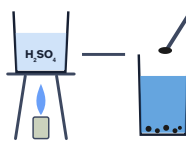
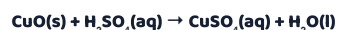
Cara membuat garam bergantung pada dua pertanyaan: apakah garamnya **larut** dalam air, dan apakah bahan basanya **larut**? Ingat aturan kelarutan: semua garam natrium, kalium, amonium, dan nitrat larut; klorida larut kecuali AgCl dan PbCl_2 ; sulfat larut kecuali BaSO_4 , PbSO_4 (dan CaSO_4 yang sedikit larut); karbonat tidak larut kecuali milik natrium, kalium, dan amonium.

Garam yang dibuat	Metode	Contoh
Larut, dari basa/karbonat/logam yang tidak larut	Tambahkan padatan berlebih ke asam → saring sisa padatan → kristalkan filtrat	$\text{CuO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$
Larut, dari alkali (garam Na, K, amonium)	Titrasi dengan indikator → ulangi tanpa indikator memakai volume yang sama → kristalkan	$\text{NaOH} + \text{HCl} \longrightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$
Tidak larut	Pengendapan: campur dua larutan → saring endapan → cuci dengan air suling → keringkan	$\text{BaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{BaSO}_4 \downarrow + 2 \text{NaCl}$



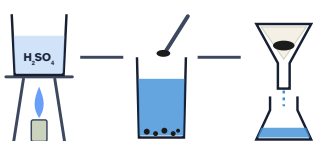
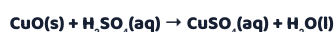
1 • Hangatkan asam
jangan sampai mendidih

Langkah 1. Tuang ±25 mL asam sulfat encer ke gelas kimia, lalu hangatkan perlahan agar reaksi berikutnya lebih cepat. Pakai kacamata pelindung.



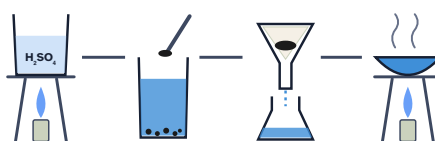
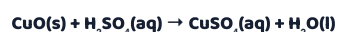
1 • Hangatkan asam
jangan sampai mendidih
Tambah CuO berlebih

Langkah 2. Tambahkan serbuk tembaga(II) oksida yang hitam sedikit demi sedikit sambil diaduk. Larutan menjadi biru. Terus tambahkan sampai ada serbuk hitam yang **tidak mau larut lagi**: tandanya semua asam sudah habis bereaksi.



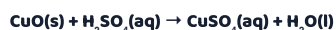
1 • Hangatkan asam
jangan sampai mendidih
Tambah CuO berlebih
3 • Saring
CuO tertahan di kertas

Langkah 3. Saring campuran. Kelebihan CuO tertahan di kertas saring, sedangkan larutan biru CuSO_4 (filtrat) yang murni tertampung di bawah. Memakai CuO berlebih memastikan tidak ada asam yang tersisa.



1 • Hangatkan asam
jangan sampai mendidih
Tambah CuO berlebih
3 • Saring
4 • Uapkan sebagian
CuO tertahan di kertas
sampai titik kristalisasi

Langkah 4. Panaskan filtrat di cawan penguap sampai sebagian air menguap. Uji dengan meneteskan larutan ke batang pengaduk yang dingin: bila langsung muncul kristal, hentikan pemanasan. **Jangan diuapkan sampai kering.**



1 • Hangatkan asam
jangan sampai mendidih
Tambah CuO berlebih
3 • Saring
4 • Uapkan sebagian
5 • Dinginkan
CuO tertahan di kertas
sampai titik kristalisasi
kristal biru terbentuk

Langkah 5. Biarkan dingin perlahan. Kristal biru tembaga(II) sulfat pentahidrat, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, tumbuh. Saring, bilas dengan sedikit air dingin, lalu keringkan di antara kertas saring.



KESELAMATAN

Saat mengencerkan asam pekat, **selalu tuang asam ke dalam air** sedikit demi sedikit sambil diaduk, jangan sebaliknya. Pelarutannya sangat eksoterm: air yang dituang ke asam pekat bisa mendidih seketika dan memercikkan asam. Pemanasan cawan penguap dilakukan dengan kacamata pelindung, dan serbuk CuO jangan dihirup.



KIMIA NUSANTARA • TANAH MASAM DAN AIR GAMBUT

Sebagian besar lahan di Kalimantan, Sumatra, dan Papua bertanah masam, terutama lahan gambut yang airnya berwarna seperti teh dengan pH 3–4 akibat asam humat dan asam fulvat dari sisa tumbuhan. Petani menaburkan **kapur pertanian** (kalsit, CaCO_3) atau **dolomit** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) untuk menaikkan pH tanah, sebuah reaksi netralisasi raksasa di sawah:

$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Di dalam tubuh, obat maag bekerja dengan cara yang sama: $\text{Mg}(\text{OH})_2$ atau $\text{Al}(\text{OH})_3$ menetralkan kelebihan asam lambung.

COBA SENDIRI

Menetralkan air gambut

Air sebuah kanal gambut di Kalimantan Tengah ber-pH 3,6. (a) Berapa $[\text{H}^+]$ -nya? (b) Berapa gram kapur, CaCO_3 ($M_r = 100$), yang secara teori cukup untuk menetralkan semua H^+ bebas dalam 1 m^3 air itu? (c) Di lapangan ternyata dibutuhkan kapur jauh lebih banyak. Jelaskan mengapa.

- 1 (a) $[\text{H}^+] = 10^{-3,6} = 2,5 \times 10^{-4}\text{ M}$.
- 2 (b) $1\text{ m}^3 = 1.000\text{ L}$, jadi $\text{mol H}^+ = 2,5 \times 10^{-4} \times 1.000 = 0,25\text{ mol}$.
- 3 Dari $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$: $\text{mol CaCO}_3 = \frac{1}{2} \times 0,25 = 0,126\text{ mol}$, massanya $0,126 \times 100 = 12,6\text{ g}$.
- 4 (c) Asam humat adalah asam **lemah**. Sebagian besar H^+ -nya masih "tersimpan" dalam molekul yang belum terionisasi. Begitu H^+ bebas dinetralkan, kesetimbangan $\text{HA} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{A}^-$ bergeser ke kanan dan molekul asam melepas H^+ baru. Keasaman tersembunyi ini disebut **keasaman cadangan**.

(a) $2,5 \times 10^{-4}\text{ M}$; (b) $\pm 12,6\text{ g}$ kapur, hanya sesendok makan! (c) Karena asam lemah terus melepas H^+ cadangannya, kebutuhan kapur nyata bisa ratusan kali lebih besar. pH saja tidak menggambarkan "jumlah total asam".

**ASAM POLIPROTIK, PKA, DAN KEKUATAN ASAM MENURUT STRUKTUR**

Asam poliprotik melepas H^+ bertahap, dan setiap tahap selalu lebih sulit daripada tahap sebelumnya karena H^+ harus lepas dari ion yang makin negatif. Untuk asam fosfat:



Asam sulfat kuat untuk H^+ pertama, tetapi HSO_4^- hanya asam sedang ($K_{a2} = 1,2 \times 10^{-2}$). Asam karbonat: $pK_{a1} = 6,35$, $pK_{a2} = 10,33$.

Kekuatan asam dan struktur. (1) Asam halida: HF (pK_a 3,2) jauh lebih lemah daripada HCl, HBr, dan HI, karena ikatan H-F sangat kuat; ke bawah golongan, ikatan H-X makin panjang dan lemah sehingga asam makin kuat. (2) Asam okso klorin: $HClO$ (7,5) < $HClO_2$ (2,0) < $HClO_3$ (≈ -1) < $HClO_4$ (≈ -10). Setiap atom O tambahan menarik elektron dan menyebarkan muatan negatif anion, sehingga anion lebih stabil. (3) Efek induksi: CH_3COOH (4,76) < $ClCH_2COOH$ (2,86) < $Cl_2CHCOOH$ (1,29) < Cl_3CCOOH (0,65) dalam hal kekuatan asam: atom Cl yang elektronegatif menstabilkan ion karboksilat.

Kimia di sekitarmu**Obat maag**

Antasida berisi $Mg(OH)_2$ atau $Al(OH)_3$, basa yang tidak larut sehingga lembut bagi mulut, tetapi menetralkan kelebihan HCl di lambung.

**Pengapuran sawah**

Tanah masam membuat unsur hara sulit diserap. Kapur pertanian dan dolomit menaikkan pH tanah sehingga padi dan jagung tumbuh lebih baik.

**Gigi berlubang**

Bakteri plak mengubah gula menjadi asam. Di bawah pH $\pm 5,5$, email gigi mulai larut. Pasta gigi yang sedikit basa dan berfluorida membantu melindunginya.

**Acar dan asinan**

Cuka menurunkan pH acar hingga di bawah 4,6, sehingga banyak bakteri pembusuk dan penghasil racun tidak dapat tumbuh. Itulah pengawet alami.

**Gigitan semut rangrang**

Semut rangrang menyemprotkan asam format ke luka gigitannya. Rasa perihnya berasal dari H^+ yang merangsang ujung saraf.

**Kolam renang**

Petugas menjaga pH air kolam di 7,2–7,8. Terlalu asam membuat mata perih dan logam berkarat; terlalu basa membuat kaporit kurang ampuh.

**Cek Cepat**

Larutan HCl ber-pH 3 diencerkan dengan air sampai volumenya 10 kali semula. Berapa pH-nya sekarang?

2

3

4

7

Manakah pasangan asam-basa konjugat yang benar?

NH_4^+ dan NH_3

H_3O^+ dan OH^-

HCl dan NaOH

H_2SO_4 dan SO_4^{2-}

Indikator manakah yang tidak berwarna di dalam asam dan menjadi merah muda keunguan di dalam basa?

Metil oranye

Kunyit

Lakmus merah

Fenolftalein

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D



Tantangan Rumah: pelangi pH dari dapur dan kamar mandi

Bahan: ¼ buah kubis ungu, 1 ruas kunyit, air panas dari termos, saringan, 8 gelas bening kecil, sendok, label, dan 8 bahan uji: air jeruk nipis, cuka dapur, minuman bersoda, air, larutan gula, larutan soda kue, air sabun mandi, air kapur sirih (½ sendok teh kapur sirih dalam segelas air, ambil bagian jernihnya).

1. Bersama orang dewasa, iris kubis ungu, siram dengan air panas, tunggu 10 menit, lalu saring. Itulah larutan indikatormu (ungu).
2. Parut kunyit, peras dengan sedikit air, dan saring untuk mendapat air kunyit.
3. Isi 8 gelas dengan masing-masing bahan uji (± 2 sendok makan), beri label.
4. Teteskan 1 sendok teh ekstrak kubis ungu ke setiap gelas. Catat warnanya, lalu urutkan gelas dari merah ke kuning.
5. Ulangi dengan air kunyit di gelas-gelas baru. Bahan mana saja yang membuat kunyit memerah?

Keselamatan: jangan mencicipi apa pun selama percobaan. Kapur sirih dan air sabun jangan sampai terkena mata (bila terkena, bilas dengan air mengalir). **Jangan memakai pemutih pakaian, pembersih kloset, atau pembersih saluran**, dan jangan pernah mencampur pembersih satu sama lain karena dapat melepaskan gas beracun. Air panas dituang oleh orang dewasa. Buang sisa larutan ke saluran dengan banyak air, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Indikator mana yang lebih "teliti", kubis ungu atau kunyit? Mengapa larutan gula tidak mengubah warna kubis ungu? Apa yang terjadi bila gelas berisi soda kue dan gelas berisi cuka (keduanya sudah diberi kubis ungu) dicampur?



RINGKASAN KILAT

Bab 26 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membedakan sifat **asam** dan **basa**, lalu mengujinya dengan **indikator** alami (kunyit, kubis ungu, bunga sepatu) dan sintesis
- menjelaskan asam-basa menurut **Arrhenius**, **Brønsted-Lowry** (pasangan konjugat), dan **Lewis**
- menghitung **pH**, **pOH**, $[H^+]$, dan $[OH^-]$ dengan tetapan air K_w
- membedakan asam/basa **kuat** dan **lemah**, lalu memakai K_a , K_b , dan derajat ionisasi untuk menghitung pH
- menulis reaksi **netralisasi** yang setara dan memilih cara **membuat garam** di laboratorium



Istilah kunci

asam

basa

alkali

Indikator

trayek pH

ion hidrogen

ion hidronium

donor proton

akseptor proton

basa konjugat

asam konjugat

pasangan asam-basa konjugat

amfiprotik

akseptor pasangan elektron

donor pasangan elektron

swaionisasi air



Rumus penting

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 + \log [\text{OH}^-]$$

pH + pOH = 14. H^+ dan OH^- seperti dua ujung jungkat-jungkit: hasil kali keduanya selalu 10^{-14} pada 25 °C. Kalau OH^- naik, H^+ turun, dan pH naik.

$$\text{pH} = -\log (a \times C_a)$$

pH asam kuat. Asam kuat melepas semua H^+ -nya. Kalikan konsentrasi asam dengan jumlah H^+ per molekul, lalu ambil minus logaritmanya.

$$[\text{H}^+] \approx \sqrt{K_a \cdot C_a}$$

pH asam lemah. Asam lemah hanya melepas sebagian kecil H^+ . Konsentrasi H^+ kira-kira akar dari K_a dikali konsentrasi asam.

$$[\text{OH}^-] \approx \sqrt{K_b \cdot C_b}, \quad \text{pH} = 14 + \log [\text{OH}^-]$$

pH basa lemah. Basa lemah hanya menarik sedikit H^+ dari air. Hitung dulu OH^- dengan akar K_b kali konsentrasi, lalu ubah ke pH lewat pOH.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Di laboratorium, jangan pernah mencicipi atau menyentuh zat untuk menebak sifatnya.
- Pasangan konjugat bukan asam dan basa yang saling bereaksi.
- pH 7 berarti netral hanya pada 25 °C.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=26

🧩 Teka-teki untuk Bab 27

Setiap hari darah kita memasukkan asam dari makanan dan dari otot yang bekerja keras: asam laktat, asam karbonat dari CO_2 , dan banyak lagi. Anehnya, pH darah tetap bertahan di sekitar 7,4. Turun ke 7,0 saja sudah berbahaya. Siapa penjaga pH yang begitu setia di dalam tubuh kita?

▼ Intip petunjuk

Ingat ion HCO_3^- yang amfiprotik di subbab 26.2. Campuran asam lemah H_2CO_3 dan basa konjugatnya HCO_3^- dapat "menangkap" H^+ maupun OH^- yang datang. Campuran ajaib ini disebut **larutan penyangga** (buffer), bintang utama Bab 27 bersama titrasi dan hidrolisis garam.

27 Tetes demi Tetes: Titrasi, Penyangga & Hidrolisis

Satu tetes NaOH bisa mengubah larutan bening menjadi merah muda, dan satu tetes itu pula yang membedakan analis teliti dari yang ceroboh. Di bab ini kamu juga akan bertemu "satpam" tak terlihat yang menjaga pH darahmu tetap 7,4 walaupun kamu baru menghabiskan sepiring rujak.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan prinsip **titrasi asam-basa**, alat-alatnya, dan beda **titik ekuivalen** dengan **titik akhir**;
- menghitung konsentrasi dan kadar zat (cuka, asam sitrat jeruk nipis) dari data titrasi dengan $M_a V_a a = M_b V_b b$;
- membaca **kurva titrasi** kuat-kuat, lemah-kuat, dan kuat-lemah, lalu memilih **indikator** yang tepat;
- meramalkan sifat dan menghitung pH larutan **garam yang terhidrolisis**;
- menjelaskan cara kerja **larutan penyangga**, menghitung pH-nya dengan persamaan Henderson-Hasselbalch, dan mengaitkannya dengan darah, sel, kolam ikan, dan tanah.

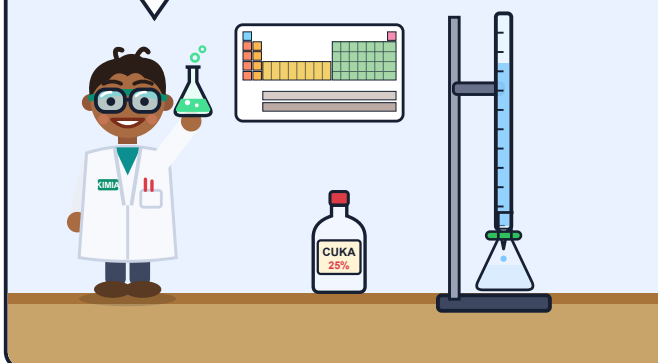
SATU TETES YANG MENENTUKAN

KOMIK · 4 PANEL

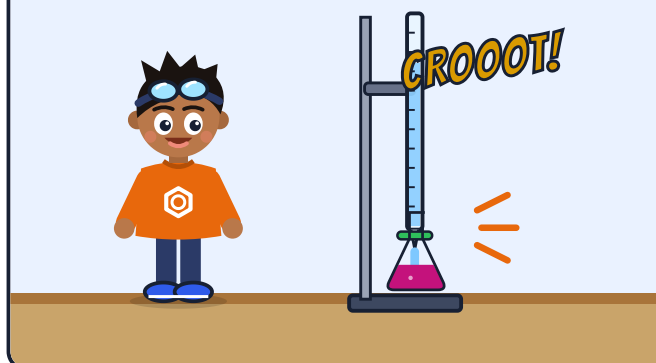
Laboratorium sekolah, Sabtu pagi

KAK TIRTA

Hari ini kita jadi analis pangan, seperti di laboratorium BPOM. Label cuka ini menulis 25%. Benarkah? Kita buktikan dengan **titrasi**!

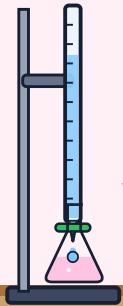
**BIMA**

Kelamaan kalau setetes-setetes. Kubuka lebar saja kerannya... beres!



LARAS

Bim, merah pekat begitu artinya kebablasan! Kita tidak tahu di tetes ke berapa asamnya tepat habis. Ulang, ya: setetes demi setetes sambil digoyang.



tes... tes...

**Kimo punya catatan...****KIMO**

Merah muda pucat yang bertahan 30 detik itulah titik akhir. Satu tetes cuma 0,05 mL, tapi bisa menggeser hasilmu!

BIMA

Jadi titrasi itu latihan sabar...



30 detik ✓

**Tebak Dulu!**

Kamu meneteskan NaOH ke cuka tepat sampai semua asam asetatnya habis bereaksi (titik ekuivalen). Berapa kira-kira pH larutan saat itu?

Tepat 7, karena asam dan basa sudah saling menetralkan.

Sedikit di bawah 7, karena cuka bersifat asam.

Di atas 7 (sekitar 8,7), karena garam natrium asetat yang terbentuk bersifat basa.

Tidak bisa ditentukan tanpa indikator.

Jawabannya: sekitar 8,7. "Tepat menetralkan" artinya mol H^+ dan mol OH^- setara, bukan pH-nya 7. Hasil reaksinya, ion asetat CH_3COO^- , adalah basa lemah yang merebut H^+ dari air dan meninggalkan OH^- . Peristiwa ini disebut **hidrolisis** (subbab 27.4), dan inilah alasan analis memakai fenoltalein (berubah warna pada pH 8,2–10,0) untuk menitrasi cuka.

27.1 Titrasi: menghitung dengan tetesan

Bagaimana analis pangan tahu bahwa sebotol cuka benar berkadar 25%, atau sebotol sirup jeruk benar berisi asam sitrat sesuai label? Mereka tidak menebak dari rasa. Mereka mereaksikan sampel dengan larutan yang konsentrasinya sudah diketahui, tetes demi tetes, sampai reaksinya tepat tuntas. Dari volume yang terpakai, konsentrasi sampel bisa dihitung. Cara ini disebut **titrasi**.

Bahasa sederhana • Bayangkan kamu menuang sirup ke segelas air sambil terus mencicipi, lalu berhenti tepat saat rasanya pas. Titrasi mirip begitu, tetapi tanpa dicicipi! Yang menjadi "lidah" adalah **indikator**, zat warna yang berubah warna begitu asam di dalam gelas habis. Lalu kita baca: berapa mililiter basa yang sudah dituang?

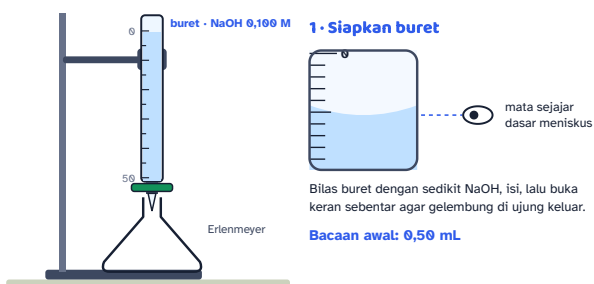


DEFINISI • BAHASA TITRASI

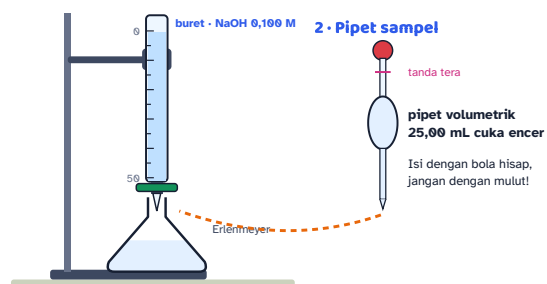
- **Titration asam-basa**: cara menentukan konsentrasi asam (atau basa) dengan mereaksikannya dengan basa (atau asam) yang konsentrasinya diketahui.
- **Titran**: larutan di dalam buret yang diteteskan, misalnya NaOH 0,100 M. Titran adalah **larutan baku** (konsentrasinya diketahui teliti).
- **Titrat** (analit): larutan di Erlenmeyer yang ingin diketahui konsentrasinya, misalnya cuka.
- **Titik ekuivalen**: saat jumlah mol H^+ dari asam tepat sama dengan jumlah mol OH^- dari basa. Ini titik *teoretis*; tidak terlihat oleh mata.
- **Titik akhir titrasi**: saat indikator berubah warna dan titrasi dihentikan. Ini yang kita *amati*. Indikator yang baik membuat titik akhir hampir berimpit dengan titik ekuivalen.

Alat	Fungsinya	Catatan penting
Buret 50 mL	meneteskan titran dan mengukur volumenya	skala 0,1 mL, dibaca sampai 0,05 mL (dua desimal); angka 0 ada di atas
Pipet volumetrik 25,00 mL	memindahkan sampel dengan sangat teliti	diisi dengan bola hisap (<i>pipette filler</i>), tidak dengan mulut
Labu Erlenmeyer	wadah titrat	lehernya sempit, jadi mudah digoyang tanpa tumpah
Labu ukur 100/250 mL	membuat larutan baku dan mengencerkan sampel	isi tepat sampai garis tanda
Statif & klem, corong kecil, botol semprot	penopang buret, alat mengisi buret, membilas dinding Erlenmeyer	angkat corong dari buret sebelum mulai menitrasi

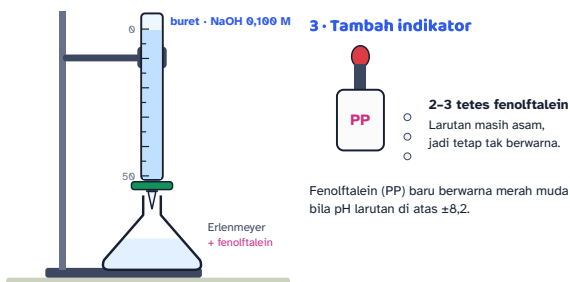
Ikuti prosedur titrasi cuka di bawah ini langkah demi langkah. Perhatikan betapa banyak kebiasaan kecil yang menentukan ketelitian.



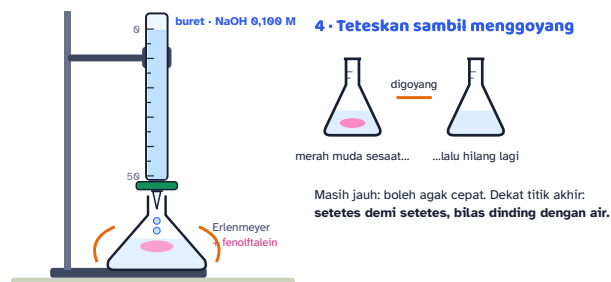
Langkah 1. Bilas buret dengan sedikit larutan NaOH (bukan air!), isi, lalu keluarkan gelembung udara di ujungnya. Baca skala awal dengan mata sejajar dasar meniskus: **0,50 mL**.



Langkah 2. Pindahkan tepat 25,00 mL cuka yang sudah diencerkan ke Erlenmeyer memakai pipet volumetrik dan bola hisap.



Langkah 3. Teteskan 2-3 tetes indikator fenolftalein. Larutan masih asam, jadi tetap tak berwarna.



Langkah 4. Buka keran dan goyang Erlenmeyer terus-menerus. Warna merah muda muncul sesaat di tempat tetesan jatuh, lalu hilang. Makin dekat titik akhir, makin lambat warnanya hilang: saatnya setetes demi setetes.



Langkah 5. Berhenti ketika warna merah muda pucat pertama bertahan sekitar 30 detik. Itulah **titik akhir**. Merah keunguan pekat berarti kebablasan.



Langkah 6. Ulangi sampai dua atau tiga titre berselisih $\leq 0,10$ mL (*konkordan*). Titrasi pertama biasanya hanya "kasar" untuk mencari kisaran. Rata-ratakan titre konkordan, lalu hitung konsentrasinya.



KESELAMATAN

Larutan NaOH, bahkan yang encer, dapat merusak mata dan mengiritasi kulit. Selalu pakai kacamata pelindung dan jas lab. Isi buret dengan corong pada posisi di bawah tinggi mata (turunkan buret atau naik ke bangku yang kokoh), lalu angkat corongnya. Jangan memipet dengan mulut. Tumpahan dibilas dengan banyak air.



Korosif (NaOH pekat)

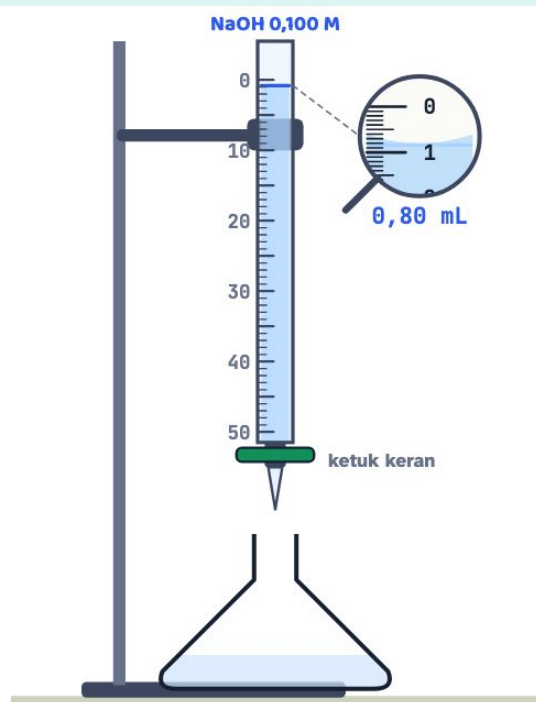


Iritan (asam asetat pekat)

LAB MINI

Titrasi Virtual: berapa kadar asam di cuka ini?

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-27



Cuka makan

25,00 mL cuka yang diencerkan 10×
+ 3 tetes fenolftalein • titran NaOH 0,100 M

Nyalakan pH-meter untuk melihat kurva titrasimu.

Analisis sungguhan cukup mengandalkan warna indikator!



Catatan (mL) awal akhir terpakai hasil

Belum ada catatan. Teteskan sampai warna berubah, lalu tekan "Catat titik akhir".

Bacaan buret

0,80 mL

NaOH terpakai

0,00 mL

pH

pH-meter mati

Warna larutan

tak berwarna

Hasil catatan terakhir

belum dicatat

Ketuk keran buret (atau pilih bukaan keran) dan perhatikan warna di Erlenmeyer. Dekat titik akhir, pakai tombol **1 tetes**. Saat merah muda pucat bertahan, tekan **Catat titik akhir**, lalu **Percobaan baru** sampai kamu punya dua titre konkordan. Tantangan: titrasi cuka memakai **metil jingga**. Mengapa hasilnya jauh meleset? Nyalakan pH-meter untuk melihat jawabannya.



TAMU DARI MASA LALU

Pada awal abad ke-19, kimiawan Prancis **Joseph Louis Gay-Lussac** memperbaiki bentuk buret dan memopulerkan kata "buret" dan "pipet". Pada 1855, apoteker Jerman **Karl Friedrich Mohr** menulis buku teks titrasi yang sangat berpengaruh dan memasang klem penjepit pada selang di ujung buret, sehingga titran bisa diteteskan setetes demi setetes. Buret berkeran yang kamu pakai sekarang adalah "cucu" rancangan-rancangan itu.

27.2 Perhitungan titrasi: kadar cuka dan asam sitrat

Kunci semua perhitungan titrasi asam-basa adalah satu kalimat: **di titik ekuivalen, mol H^+ yang dilepas asam sama dengan mol OH^- yang dilepas basa**. Untuk HCl dan NaOH perbandingannya 1 : 1, tetapi asam sulfat melepas 2 H^+ dan asam sitrat dari jeruk nipis melepas 3 H^+ setiap molekul.



ATURAN • RUMUS TITRASI

Di titik ekuivalen:

$$\underbrace{M_a \times V_a \times a}_{\text{mol } H^+} = \underbrace{M_b \times V_b \times b}_{\text{mol } OH^-}$$

M = molaritas, V = volume (mL atau L, asal sama di kedua sisi), a = jumlah H^+ yang dilepas per molekul asam (valensi asam), b = jumlah OH^- per satuan rumus basa (valensi basa). Bila memakai mL, hasil kalinya dalam milimol (mmol).

$$M_a = \frac{M_b V_b b}{V_a a}$$

Di titik ekuivalen, jumlah H^+ dari asam tepat sama dengan jumlah OH^- dari basa. Volume basa yang terbaca di buret membuka rahasia konsentrasi asam.

M_b Molaritas basa (titran) M

V_b Volume basa terpakai mL

b Valensi basa

V_a Volume asam (dipipet) mL

a Valensi asam

M_a Molaritas asam M

MOLARITAS ASAM

0,0834

M

$\text{Mol OH}^- = 0,1 \times 20,85 \times 1 = 2,085$ mmol, sama dengan mol H^+ . Jadi molaritas asam = **0,0834 M**.

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-TITRASI-MAVAB



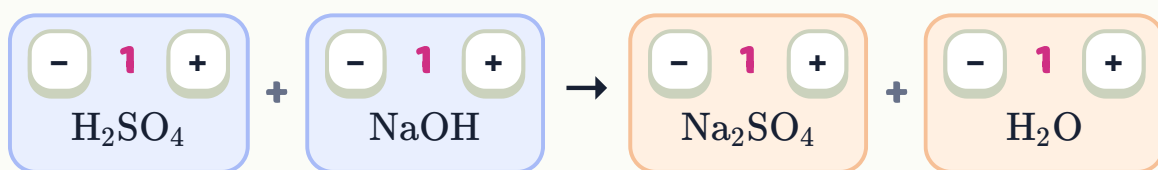
TRIK KAK TIRTA

"Hitung H^+ dan OH^- , bukan molekul." Sebelum memakai rumus, tanyakan dua hal: *satu molekul asam ini melepas berapa H^+ ?* dan *satu satuan basa ini melepas berapa OH^- ?* Kalau ragu, setarakan dulu persamaan reaksinya: koefisiennya langsung memberi perbandingan mol.

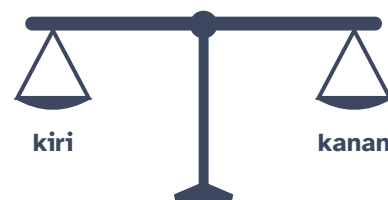


PENYETARA REAKSI

Setarakan reaksi penetralan di laboratorium analisis



Unsur	Kiri	Kanan	
H	3 ○○○	2 ○○	✗
S	1 ●	1 ●	✓
O	5 ●●●●●	5 ●●●●●	✓
Na	1 ●	2 ●●	✗



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



Petunjuk



Ulang

Persamaan berikutnya ▶

Persamaan 1 dari 6 null

Asam sitrat ditulis $C_6H_8O_7$. Setelah setara, bandingkan koefisien asam dan basanya: itulah a dan b pada rumus titrasi. Reaksi ketiga adalah titrasi cuka dengan soda kue yang bisa kamu coba di rumah.

CONTOH

Konsentrasi HCl

Sebanyak 20,0 mL larutan HCl dititrasi dengan NaOH 0,150 M. Titik akhir tercapai setelah 16,0 mL NaOH. Berapa molaritas HCl?

1 HCl melepas 1 H^+ ($a = 1$), NaOH melepas 1 OH^- ($b = 1$).

2 $M_a \times 20,0 \times 1 = 0,150 \times 16,0 \times 1 = 2,40$ mmol.

3 $M_a = 2,40/20,0 = 0,120$ M.

Molaritas HCl = 0,120 M. Cek kewajaran: volume NaOH lebih kecil daripada volume asam, padahal valensinya sama, jadi NaOH-nya pasti lebih pekat. ✓

Cuka dapur terlalu pekat untuk langsung dititrasi: buretnya bisa habis sebelum titik akhir. Karena itu sampel diencerkan dulu dengan labu ukur. Jangan lupa mengalikan hasilnya dengan **faktor pengenceran**. Kadar cuka biasanya dinyatakan dalam persen massa per volume (% b/v), yaitu gram asam asetat dalam 100 mL cuka.

$$\text{kadar} = \frac{M_b V_b}{V_a} \times f_p \times \frac{60}{10} \%$$

Molaritas cuka encer dikali faktor pengenceran memberi molaritas cuka asli. Dikali massa molar asam asetat (60 g/mol) lalu dibagi 10, kita dapat gram asam asetat per 100 mL.

 M_b

Molaritas NaOH M

 V_b

Volume NaOH terpakai mL

 V_a

Volume cuka encer dipipet mL

 f_p

Faktor pengenceran ×

kadar

Kadar asam asetat % (b/v)

KADAR ASAM ASETAT

4,99

% (b/v)



kadar khas cuka makan siap pakai

Cuka asli = **0,832 M**, berisi **4,99 g** asam asetat per 100 mL atau **49,92 g** per liter.

Cek satuan: $M \times 60 \text{ g/mol} = \text{g/L}; \div 10 = \text{g per 100 mL} \checkmark$

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

Laras memeras jeruk nipis dan menyaring airnya. Sebanyak 10,0 mL air jeruk diencerkan menjadi 100,0 mL. Lalu 25,00 mL larutan encer itu dititrasi dengan NaOH 0,100 M dan indikator fenolftalein; titik akhir pada 21,90 mL. Anggap semua asamnya asam sitrat ($\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$, triprotik, $M_r = 192$). Hitung kadar asam sitrat dalam g per 100 mL air jeruk.

- 1 mol NaOH = $0,100 \times 21,90 = 2,19$ mmol.
- 2 Asam sitrat melepas 3 H^+ , jadi mol asam sitrat = $2,19/3 = 0,730$ mmol dalam 25,00 mL larutan encer.
- 3 Dalam 100,0 mL larutan encer (berasal dari 10,0 mL air jeruk): $0,730 \times 4 = 2,92$ mmol.
- 4 Konsentrasi di air jeruk asli = $2,92/10,0 = 0,292$ M, yaitu $0,292 \times 192 = 56,1$ g/L.

Kadar asam sitrat $\approx 5,6$ g per 100 mL. Itulah sebabnya air jeruk nipis jauh lebih masam daripada jeruk manis. Jika lupa membagi 3, hasilmu tiga kali terlalu besar!



AWAS JEBAKAN

Jangan lupa valensi dan faktor pengenceran. Dua kesalahan paling sering dalam soal titrasi adalah (1) memakai $a = 1$ untuk asam sulfat atau asam sitrat, dan (2) lupa bahwa yang dititrasi hanyalah sebagian kecil sampel yang sudah diencerkan. Tulis satuan di setiap baris: mmol, mL, M, g/L.



KIMIA NUSANTARA • CUKA DI DAPUR KITA

Di pasar Indonesia mudah dijumpai cuka dapur pekat berlabel 25% yang harus diencerkan sebelum dipakai untuk acar atau pempek, di samping cuka makan siap pakai yang kadarnya sekitar 4–5%. Di beberapa daerah, cuka juga dibuat dengan memfermentasi air kelapa atau nira aren dan nipah, sehingga kadarnya bervariasi. Asam sitrat juga dipakai sebagai pengasam pada sirup dan minuman serbuk. Untuk memastikan isi sesuai label, analisis pangan memakai titrasi, persis seperti Lab Mini di subbab 27.1.



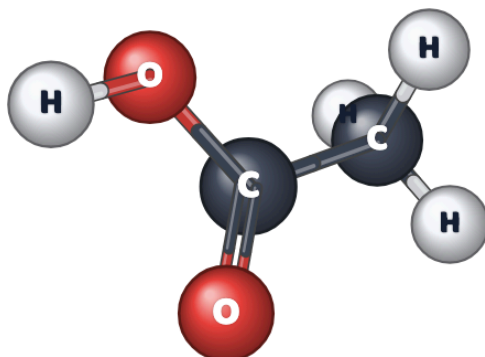
ADU CEPAT

Titrasi kilat: berapa molaritas asamnya?

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-27

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$M_a = M_b \times V_b \div (V_a \times a)$. Contoh: 25 mL H_2SO_4 ($a = 2$) dinetralkan 20 mL NaOH 0,1 M $\rightarrow$ 0,04 M.



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%).

Cari atom H yang terikat pada O dalam gugus $-\text{COOH}$: hanya H itulah yang dilepas saat titrasi. Asam asetat punya 4 atom H tetapi hanya 1 yang asam ($\alpha = 1$). Asam sitrat punya tiga gugus $-\text{COOH}$ ($\alpha = 3$); H pada gugus $-\text{OH}$ alkoholnya tidak ikut dititrasi. Asam oksalat dihidrat dipakai sebagai **baku primer** untuk menetapkan konsentrasi NaOH karena padatnya murni dan stabil.

27.3 Kurva titrasi dan pemilihan indikator

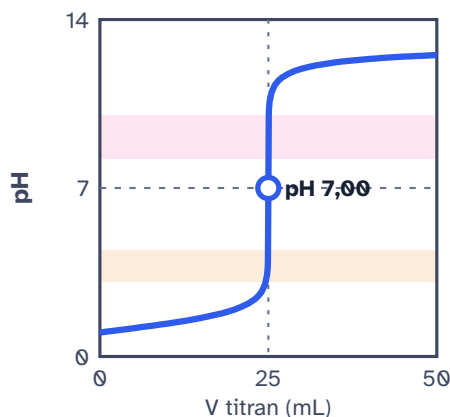
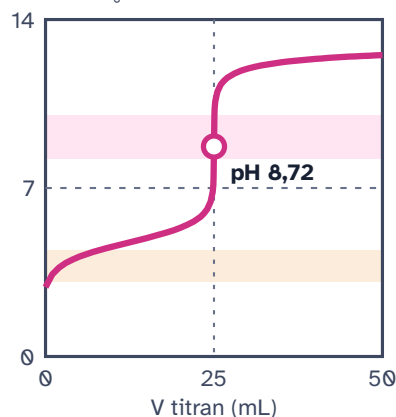
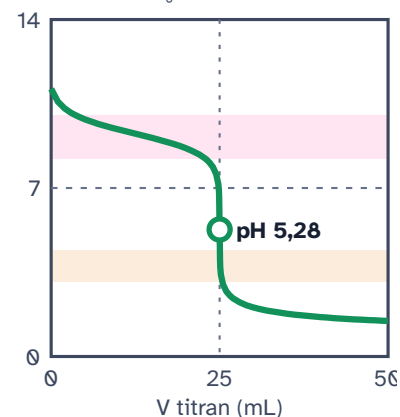
Jika pH larutan di Erlenmeyer diukur setiap kali NaOH ditambahkan, lalu digambar terhadap volume NaOH, kita mendapat **kurva titrasi**. Bentuknya seperti huruf S yang miring: mula-mula pH naik perlahan, lalu di sekitar titik ekuivalen **melonjak tajam** beberapa satuan hanya karena satu-dua tetes, kemudian landai lagi. Lonjakan inilah yang membuat titrasi sangat teliti.

Kurva untuk asam lemah seperti asam asetat punya empat daerah yang bisa dibaca seperti peta:

1. **Titik awal**: hanya ada asam lemah, pH sekitar 2,9 (bukan 1 seperti HCl dengan konsentrasi sama).
2. **Daerah penyangga**: sebagian HA sudah menjadi A^- . Campuran HA dan A^- melawan perubahan pH, sehingga kurvanya landai. Tepat di **titik setengah ekuivalen**, $[\text{HA}] = [\text{A}^-]$ dan $\text{pH} = \text{p}K_a$.
3. **Titik ekuivalen**: semua HA sudah menjadi A^- . Ion A^- terhidrolisis, jadi pH-nya di atas 7 ($\pm 8,7$).
4. **Setelah ekuivalen**: NaOH berlebih menentukan pH; kurvanya menyatu dengan kurva HCl.

Asam kuat + basa kuat

HCl dititrasi NaOH

**Asam lemah + basa kuat**CH₃COOH dititrasi NaOH**Basa lemah + asam kuat**NH₃ dititrasi HCl

Tiga kurva titrasi (25 mL larutan 0,1 M dengan titran 0,1 M). Lingkaran = titik ekuivalen. Pita merah muda = trayek fenolftalein (8,2–10,0), pita jingga = trayek metil jingga (3,1–4,4). Indikator cocok bila pitanya dipotong bagian kurva yang tegak.

**AWAS JEBAKAN**

Titik ekuivalen tidak selalu pH 7. Hanya titrasi asam kuat dengan basa kuat yang berakhir di pH 7. Asam lemah dengan basa kuat berakhir di atas 7 karena anionnya basa; basa lemah dengan asam kuat berakhir di bawah 7 karena kationnya (misalnya NH₄⁺) asam. "Netral" dalam titrasi berarti *mol setara*, bukan *pH 7*.

**ATURAN • MEMILIH INDIKATOR**

Indikator cocok bila **trayek perubahan warnanya terletak di bagian kurva yang tegak**. Di bagian itu, satu tetes titran sudah cukup untuk melewati seluruh trayek, sehingga titik akhir hampir berimpit dengan titik ekuivalen.

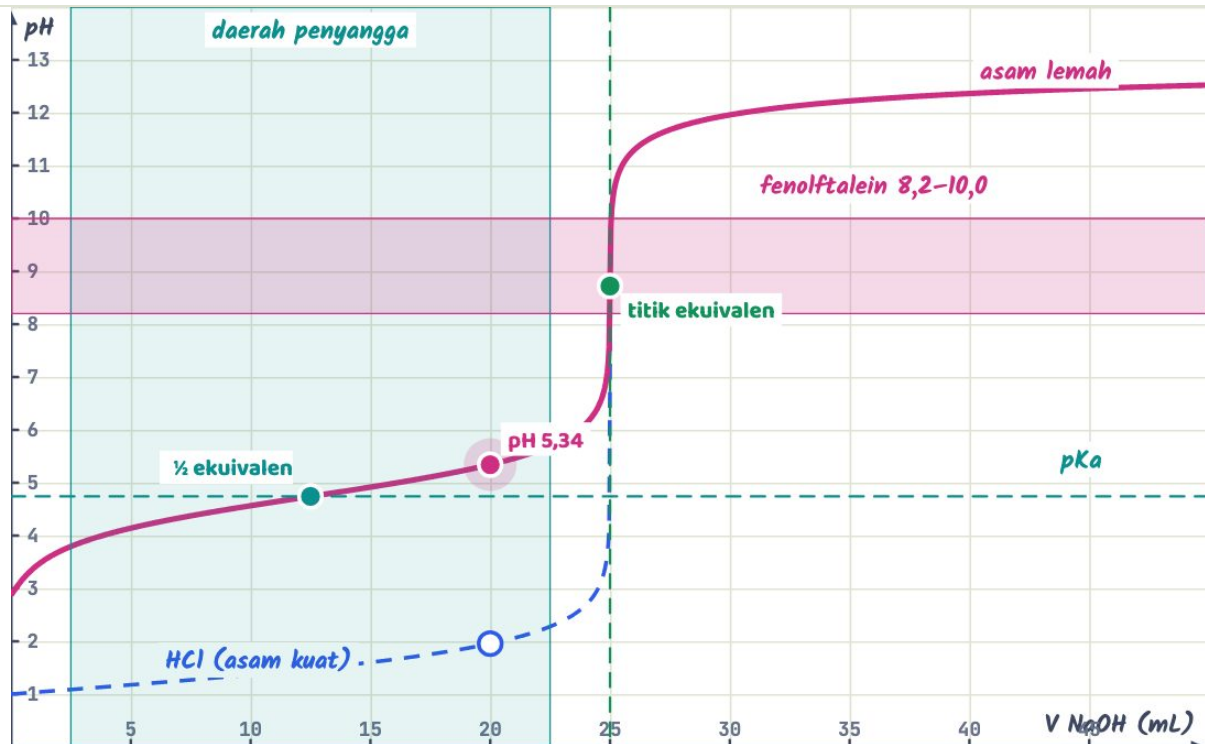
- Asam kuat + basa kuat (lonjakan ±pH 4–10): metil merah, bromtimol biru, atau fenolftalein.
- Asam lemah + basa kuat (lonjakan ±pH 7–11): **fenolftalein**.
- Basa lemah + asam kuat (lonjakan ±pH 3–7): **metil jingga** atau metil merah.
- Asam lemah + basa lemah: tidak ada lonjakan tajam, sehingga tidak dititrasi dengan indikator biasa.

Indikator	Trayek pH	Warna (asam → basa)	Cocok untuk titrasi
Metil jingga	3,1–4,4	merah → kuning	asam kuat + basa lemah (juga kuat–kuat)
Metil merah	4,4–6,2	merah → kuning	asam kuat + basa lemah, kuat–kuat
Bromtimol biru	6,0–7,6	kuning → biru	asam kuat + basa kuat

Fenolftalein (PP)	8,2-10,0	tak berwarna → merah muda	asam lemah + basa kuat, kuat-kuat
Ekstrak kubis ungu (antosianin)	bertahap, pH 2-13	merah → ungu → biru → hijau → kuning	uji kasar dan titrasi sederhana di rumah



$$\text{pH}_{\text{lemah}} = 5,34, \quad \text{pH}_{\text{HCl}} = 1,95$$



✓ fenolftalein cocok untuk asam lemah: titik akhir meleset kurang dari 2 tetes

✓ fenolftalein cocok untuk HCl

pH asam lemah

5,34

pH HCl

1,95

pH titik ekuivalen (asam lemah)

8,72

pH di ½ ekuivalen

4,74

titik akhir – titik ekuivalen (asam lemah)

0,01 mL

titik akhir – titik ekuivalen (HCl)

0,01 mL

Seret titik magenta di sepanjang kurva asam lemah; titik biru berongga mengikuti kurva HCl. Geser pKa: makin besar pKa (asam makin lemah), makin tinggi pH titik ekuivalen dan makin pendek lonjakannya. Ganti indikator (0 tanpa, 1 metil jingga, 2 metil merah, 3 bromtimol biru, 4 fenolftalein) lalu baca tanda ✓/✗. Coba juga konsentrasi 0,001 M: indikator mana yang masih cocok?

MITOS

"Titik ekuivalen selalu pH 7."

MITOS

"Titik akhir sama dengan titik ekuivalen."

FAKTA

Hanya untuk asam kuat + basa kuat. Cuka + NaOH berakhir di pH $\pm 8,7$, amonia + HCl di pH $\pm 5,3$, karena garam yang terbentuk terhidrolisis.

FAKTA

Titik ekuivalen adalah saat mol asam dan basa setara (teoretis). Titik akhir adalah saat indikator berubah warna (pengamatan). Indikator yang tepat membuat selisihnya kurang dari satu tetes.

MITOS

"Makin banyak indikator, makin jelas hasilnya."

FAKTA

Indikator sendiri adalah asam lemah yang ikut bereaksi dengan titran. Cukup 2–3 tetes; terlalu banyak justru menggeser titik akhir.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

TITRASI TANPA INDIKATOR: PH-METER DAN TURUNAN PERTAMA

Sampel berwarna gelap, misalnya cuka aren coklat atau sari buah, membuat perubahan warna indikator sulit dilihat. Analis lalu memakai **titrasi potensiometri**: pH diukur dengan elektrode setelah setiap penambahan titran. Titik ekuivalen adalah titik tempat kurva paling curam, yaitu puncak grafik $\Delta \text{pH} / \Delta V$ (turunan pertama).

Bonusnya, satu kurva asam lemah memberi dua informasi sekaligus: **konsentrasi** (dari volume ekuivalen) dan K_a (dari pH di setengah volume ekuivalen). Pendekatan $\text{pH} = \text{p}K_a$ di titik setengah ekuivalen memerlukan $[\text{H}^+]$ yang jauh lebih kecil daripada $[\text{HA}]$ dan $[\text{A}^-]$. Untuk asam yang agak kuat ($\text{p}K_a \lesssim 3$) atau sangat encer, pendekatan ini meleset; geser $\text{p}K_a$ ke 2 di Grafik Hidup dan bandingkan pH di $\frac{1}{2}$ ekuivalen dengan $\text{p}K_a$.

27.4

Hidrolisis garam: garam pun bisa asam atau basa

Garam dapur yang dilarutkan dalam air memberi larutan netral. Tetapi coba teteskan kubis ungu ke larutan soda kue: warnanya biru kehijauan, tanda basa. Larutan pupuk ZA justru sedikit asam. Mengapa garam yang lahir dari reaksi "penetralan" bisa asam atau basa?

Bahasa sederhana • Ingat bahwa garam tersusun atas ion positif dan ion negatif. Sebagian ion itu "suka bermain" dengan air: ada yang mengambil H^+ dari air (sehingga tersisa OH^- dan larutan menjadi basa), ada yang memberikan H^+ ke air (sehingga larutan menjadi asam). Ion yang berasal dari asam kuat atau basa kuat bersikap cuek dan tidak bereaksi dengan air.



DEFINISI · HIDROLISIS GARAM

Hidrolisis garam adalah reaksi ion-ion garam dengan air yang menghasilkan ion OH^- atau H_3O^+ , sehingga larutan garam bersifat basa atau asam. Yang terhidrolisis hanya ion yang berasal dari **asam lemah** (anion, misalnya CH_3COO^- , CO_3^{2-} , F^-) atau **basa lemah** (kation, misalnya NH_4^+).

Natrium asetat → larutan basa



Amonium klorida → larutan asam



Natrium klorida → larutan netral



Tingkat partikel hidrolisis. Ion asetat mengambil H^+ dari molekul air dan meninggalkan OH^- ; ion amonium memberikan H^+ kepada air sehingga terbentuk H_3O^+ ; ion Na^+ dan Cl^- hanya terhidrasi tanpa mengubah pH.



Garam dari	Contoh	Ion yang terhidrolisis	Sifat larutan (25 °C)	Rumus pendekatan
asam kuat + basa kuat	NaCl , KNO_3 , Na_2SO_4	tidak ada	netral, $\text{pH} = 7$	—
asam lemah + basa kuat	CH_3COONa , NaF , Na_2CO_3 (soda abu), K_2CO_3 (air abu)	anion	basa, $\text{pH} > 7$	$[\text{OH}^-] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a} [\text{anion}]}$
asam kuat + basa lemah	NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (pupuk ZA), tawas*	kation	asam, $\text{pH} < 7$	$[\text{H}^+] = \sqrt{\frac{K_w}{K_b} [\text{kation}]}$
asam lemah + basa lemah	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$, NH_4CN	kation dan anion	bergantung pada K_a dan K_b	$[\text{H}^+] = \sqrt{\frac{K_w K_a}{K_b}}$

* Tawas mengandung ion Al^{3+} yang terhidrasi. Muatannya besar sehingga molekul air di sekitarnya mudah melepas H^+ : $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons [\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+} + \text{H}_3\text{O}^+$. Itulah sebabnya larutan tawas bersifat asam.



ATURAN • TETAPAN HIDROLISIS

Untuk anion dari asam lemah HA, tetapan kesetimbangan hidrolisisnya adalah

$$K_h = K_b(\text{A}^-) = \frac{K_w}{K_a} \quad \Rightarrow \quad [\text{OH}^-] = \sqrt{K_h [\text{A}^-]} = \sqrt{\frac{K_w}{K_a} [\text{A}^-]}$$

Untuk kation dari basa lemah B: $K_h = K_a(\text{BH}^+) = K_w/K_b$ dan $[\text{H}^+] = \sqrt{\frac{K_w}{K_b} [\text{BH}^+]}$. Makin lemah asam (atau basa) induknya, makin besar K_h , makin kuat hidrolisisnya.

▼ Mengapa begitu? Menurunkan rumus pH garam basa

Reaksi hidrolisis $\text{A}^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HA} + \text{OH}^-$ memiliki $K_h = \frac{[\text{HA}][\text{OH}^-]}{[\text{A}^-]}$. Kalikan pembilang dan penyebut dengan $[\text{H}^+]$:

$$K_h = \frac{[\text{HA}]}{[\text{H}^+][\text{A}^-]} \times [\text{H}^+][\text{OH}^-] = \frac{1}{K_a} \times K_w$$

Karena setiap A^- yang terhidrolisis menghasilkan satu HA dan satu OH^- , $[\text{HA}] = [\text{OH}^-] = x$. Bila hidrolisisnya sedikit ($x \ll [\text{A}^-]$), $K_h \approx x^2/[\text{A}^-]$, sehingga $x = \sqrt{K_h [\text{A}^-]}$.

$$[\text{OH}^-] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a} C_g} \quad \text{pH} = 14 + \log[\text{OH}^-]$$

Anion dari asam lemah merebut H^+ dari air dan meninggalkan OH^- . Makin lemah asam induknya (pK_a besar), makin basa garamnya.

pK_a pK_a asam induk

C_g Konsentrasi anion M

pH pH larutan garam

PH LARUTAN GARAM

8,87

natrium asetat (larutan di titik ekuivalen titrasi cuka)

$K_h = K_w/K_a = 5,495 \times 10^{-10}$, $[\text{OH}^-] = 7,413 \times 10^{-6} \text{ M}$, jadi pH = **8,87**.

Cek satuan: $\sqrt{((\text{tanpa satuan}) \times \text{M})} = \text{M}$; pH tanpa satuan ✓

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

Hitung pH larutan amonium sulfat, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, **0,050 M**. ($K_b \text{NH}_3 = 1,8 \times 10^{-5}$, $K_w = 10^{-14}$)

- 1 Satu satuan $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ melepas **dua** ion NH_4^+ : $[\text{NH}_4^+] = 2 \times 0,050 = 0,10 \text{ M}$. Ion SO_4^{2-} praktis tidak terhidrolisis.
- 2 $K_h = K_w/K_b = 10^{-14}/1,8 \times 10^{-5} = 5,6 \times 10^{-10}$.
- 3 $[\text{H}^+] = \sqrt{5,6 \times 10^{-10} \times 0,10} = 7,5 \times 10^{-6} \text{ M}$.
- 4 $\text{pH} = -\log(7,5 \times 10^{-6}) = 5,13$.

pH $\approx 5,1$: sedikit asam. Pemakaian pupuk ZA terus-menerus ikut mengasamkan tanah sawah (terutama lewat perubahan amonium menjadi nitrat oleh bakteri tanah), sehingga petani kadang perlu menebar kapur.



AWAS JEBAKAN

Pakai konsentrasi ion yang terhidrolisis, bukan konsentrasi garamnya. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0,05 M berisi 0,10 M NH_4^+ ; $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca}$ 0,1 M berisi 0,2 M CH_3COO^- . Ingat juga: rumus akar kuadrat hanya berlaku bila hidrolisisnya kecil (kurang dari $\pm 5\%$).



TRIK KAK TIRTA

"Yang kuat menentukan rasa." Lihat asal-usul garamnya: kalau induk basanya lebih kuat (NaOH + asam lemah), garamnya basa. Kalau induk asamnya lebih kuat (HCl + basa lemah), garamnya asam. Kalau dua-duanya kuat, netral. Kalau dua-duanya lemah, bandingkan K_a dan K_b .



KIMIA NUSANTARA • AIR ABU, TAWAS, DAN PUPUK ZA

Pembuat mi kuning dan beberapa kue tradisional memakai **air abu** (air ki), larutan kalium karbonat yang dahulu dibuat dari abu tumbuhan. Ion CO_3^{2-} terhidrolisis sehingga larutannya basa; suasana basa ini membuat mi lebih kenyal dan kekuningan. Sebaliknya, **tawas** yang dipakai PDAM untuk menjernihkan air dan **pupuk ZA** di sawah memberi larutan asam karena kationnya terhidrolisis.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

GARAM AMFIPROTİK DAN GARAM DARI DUA INDUK LEMAH

Ion HCO_3^- dalam soda kue bisa melepas H^+ ($K_{a2} = 4,7 \times 10^{-11}$) atau menerima H^+ ($K_b = K_w/K_{a1} = 2,2 \times 10^{-8}$). Karena $K_b > K_{a2}$, larutannya sedikit basa. Analisis lengkap memberi

$$\text{pH} \approx \frac{1}{2} (\text{p}K_{a1} + \text{p}K_{a2}) = \frac{1}{2} (6,35 + 10,33) = 8,34$$

yang hampir tidak bergantung pada konsentrasi. Dengan cara yang sama, larutan NaH_2PO_4 ber-pH $\approx \frac{1}{2}(2,15 + 7,20) \approx 4,7$. Untuk garam dari asam lemah dan basa lemah seperti $\text{CH}_3\text{COONH}_4$: $\text{pH} = 7 + \frac{1}{2}(\text{p}K_a - \text{p}K_b) = 7 + \frac{1}{2}(4,74 - 4,74) = 7,0$, meskipun kedua ionnya sama-sama terhidrolisis.



Tebak Dulu!

Larutan penyangga asetat (CH_3COOH 0,1 M + CH_3COONa 0,1 M) ber-pH 4,74. Kamu mengencerkannya 10 kali dengan air. pH-nya menjadi...

5,74, karena makin encer berarti makin kurang asam.

3,74, karena ion-ionnya makin jarang.

tetap sekitar 4,74.

7, karena air menetralkan asamnya.

Jawabannya: tetap sekitar 4,74. pH penyangga bergantung pada *perbandingan* $[\text{A}^-]/[\text{HA}]$. Pengenceran memperkecil keduanya dengan faktor yang sama, jadi rasionya tidak berubah. Yang berkurang adalah **kapasitasnya**: penyangga encer lebih cepat kewalahan. (Kalau diencerkan ekstrem, sampai sekitar 10^{-4} M, pH-nya mulai bergeser.)

Coba teteskan 1 mL HCl 1 M ke 100 mL air murni: pH anjlok dari 7 ke 2, artinya keasamannya naik 100.000 kali! Teteskan jumlah HCl yang sama ke 100 mL campuran asam asetat dan natrium asetat (masing-masing 0,1 M): pH hanya bergeser dari 4,74 ke 4,66. Campuran kedua itu adalah **larutan penyangga** (bufer).

Bahasa sederhana • Bayangkan penyangga sebagai satpam yang membawa dua alat: "penangkap asam" dan "penangkap basa". Setiap kali ada asam masuk, penangkap asam bekerja; setiap kali ada basa masuk, penangkap basa bekerja. Selama kedua alatnya masih ada, keadaan di dalam tetap tenang. Tetapi satpam pun bisa kewalahan kalau tamunya datang terlalu banyak.

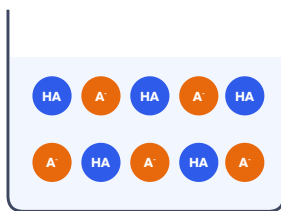


DEFINISI • LARUTAN PENYANGGA

Larutan penyangga adalah larutan yang pH-nya hampir tidak berubah bila ditambah sedikit asam, sedikit basa, atau diencerkan. Isinya pasangan asam-basa konjugat dalam jumlah yang sebanding:

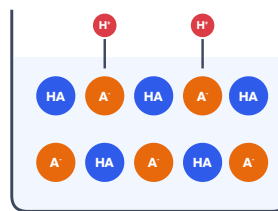
- **Penyangga asam** ($\text{pH} < 7$): asam lemah + basa konjugatnya, misalnya $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CH}_3\text{COONa}$, atau $\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-}$.
- **Penyangga basa** ($\text{pH} > 7$): basa lemah + asam konjugatnya, misalnya $\text{NH}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$.

Penyangga dapat dibuat **langsung** (mencampur asam lemah dengan garamnya) atau **tidak langsung** (asam lemah berlebih dinetralkan sebagian oleh basa kuat; misalnya 2 mol $\text{CH}_3\text{COOH} + 1$ mol NaOH menghasilkan 1 mol $\text{CH}_3\text{COOH} + 1$ mol CH_3COO^-).



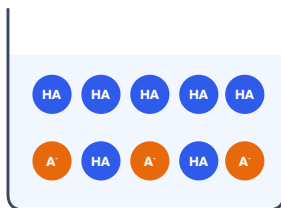
Penyangga asetat
 $\text{HA} = \text{CH}_3\text{COOH}$ (penangkap basa)
 $\text{A}^- = \text{CH}_3\text{COO}^-$ (penangkap asam)
 $\text{pH} = 4,74$
 $\text{HA} : \text{A}^- = 1 : 1 \rightarrow \text{pH} = \text{pK}_a$

Langkah 1. Penyangga asetat berisi asam lemah HA (CH_3COOH) dan basa konjugatnya A^- (CH_3COO^-) dalam jumlah sebanding. Setiap bola mewakili triliunan partikel.



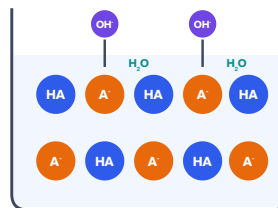
Datang H^+ dari HCl
 Siapa yang menangkapnya?
 $\text{pH} = 4,74$
 Tanpa penangkap, setiap H^+ langsung menurunkan pH.

Langkah 2. Asam kuat (HCl) menambahkan ion H^+ . Di air murni, H^+ ini langsung menaikkan keasaman.



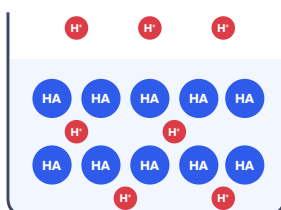
A^- menangkap H^+
 $\text{A}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{HA}$
 $\text{pH} = 4,66$
 pH hanya turun sedikit.
 air murni: $\text{pH } 7 \rightarrow 2$

Langkah 3. Di penyangga, ion A^- menangkap H^+ menjadi HA: $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$. Contoh nyata: 100 mL penyangga 0,1 M + 1 mmol HCl hanya turun dari 4,74 ke 4,66, sedangkan 100 mL air murni anjlok dari 7 ke 2.



Datang OH^- dari NaOH
 $\text{HA} + \text{OH}^- \rightarrow \text{A}^- + \text{H}_2\text{O}$
 $\text{pH} = 4,74$
 HA menyerahkan H^+ -nya; pH hanya naik sedikit.

Langkah 4. Basa kuat (NaOH) menambahkan OH^- . Kali ini HA yang bekerja: $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O}$. pH hanya naik sedikit.



Kapasitas terlampaui!
 Semua A^- sudah menjadi HA.
 $\text{pH} \approx 2$
 H^+ berikutnya bebas berkeliraran: pH anjlok.

Langkah 5. Bila asam yang masuk melebihi jumlah A^- , tidak ada lagi penangkap. H^+ sisanya bebas dan pH anjlok: **kapasitas penyangga** terlampaui.



HUKUM • PERSAMAAN HENDERSON-HASSELBALCH

Untuk penyangga asam lemah HA dan basa konjugatnya A^- :

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]} = \text{pK}_a + \log \frac{n_{\text{A}^-}}{n_{\text{HA}}}$$

Karena volumenya sama, perbandingan konsentrasi boleh diganti perbandingan mol. Untuk

penyangga basa (B dan BH^+): $\text{pOH} = \text{pK}_b + \log \frac{[\text{BH}^+]}{[\text{B}]}$, atau langsung pakai $\text{pK}_a(\text{BH}^+) = 14 - \text{pK}_b$.

▼ Mengapa begitu? Dari K_a ke Henderson-Hasselbalch

Mulai dari $K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$, lalu susun ulang: $[\text{H}^+] = K_a \frac{[\text{HA}]}{[\text{A}^-]}$. Ambil $-\log$ kedua ruas:

$$-\log[\text{H}^+] = -\log K_a - \log \frac{[\text{HA}]}{[\text{A}^-]} \Rightarrow \text{pH} = \text{p}K_a + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

Dalam penyangga, HA hampir tidak terionisasi (ion A^- yang banyak menekan ionisasinya) dan A^- hampir tidak terhidrolisis. Jadi $[\text{HA}]$ dan $[\text{A}^-]$ cukup diambil dari jumlah yang dicampurkan.

RUMUS HIDUP

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.

$\text{p}K_a$ pKa asam lemah

$[\text{A}^-]$ Basa konjugat M

$[\text{HA}]$ Asam lemah M

pH pH penyangga

PH PENYANGGA

4,74

✓ rasio 0,1–10: penyangga bekerja baik ($\text{pH} = \text{p}K_a \pm 1$)

rasio 1 : 1 $\rightarrow$ $\text{pH} = \text{p}K_a$, kapasitas terbesar

Rasio $[\text{A}^-]/[\text{HA}] = 1$. Setiap kali rasio dikali 10, pH naik tepat 1 satuan.

Cek satuan: $\text{M} \div \text{M} \rightarrow$ tanpa satuan; log dan pH tanpa satuan ✓

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



TRIK KAK TIRTA

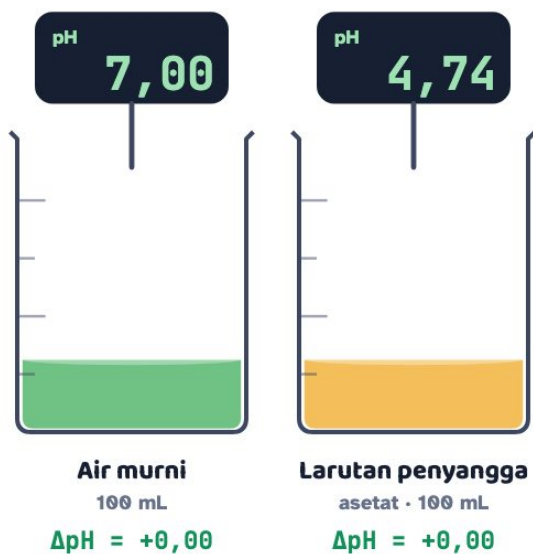
"Satu banding satu, pH sama dengan pKa; tiap $\times 10$, naik satu." Rasio 10 : 1 memberi $\text{p}K_a + 1$, rasio 1 : 10 memberi $\text{p}K_a - 1$. Karena itu, untuk membuat penyangga pH 5, pilih asam yang pKa-nya dekat 5 (asam asetat, 4,74). Untuk pH 7 pilih fosfat (7,21), untuk pH 9 pilih amonia (9,25).

Kak Tirta mencampur 100 mL CH_3COOH 0,20 M dengan 50 mL NaOH 0,20 M. (a) Hitung pH campuran. (b) Ke dalamnya ditambahkan 1,0 mL HCl 1,0 M. Hitung pH baru dan bandingkan dengan air murni 151 mL yang diberi HCl sebanyak itu. ($K_a = 1,8 \times 10^{-5}$)

- 1 Mol awal: $\text{CH}_3\text{COOH} = 20 \text{ mmol}$, $\text{NaOH} = 10 \text{ mmol}$. Reaksi $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{OH}^- \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O}$ menyisakan 10 mmol CH_3COOH dan menghasilkan 10 mmol CH_3COO^- : penyangga cara tidak langsung.
- 2 (a) $\text{pH} = 4,74 + \log(10/10) = 4,74$.
- 3 (b) HCl 1,0 mmol bereaksi dengan A^- : CH_3COO^- menjadi 9,0 mmol, CH_3COOH menjadi 11,0 mmol.
- 4 $\text{pH} = 4,74 + \log(9,0/11,0) = 4,74 - 0,09 = 4,66$.
- 5 Air murni: $[\text{H}^+] = 1,0/152 = 6,6 \times 10^{-3} \text{ M}$, $\text{pH} = 2,18$ (turun 4,8 satuan!).

pH penyangga hanya turun 0,09, dari 4,74 menjadi 4,66; air murni turun hampir 5 satuan. Penyangga bekerja karena ion asetat "menelan" H^+ yang datang.

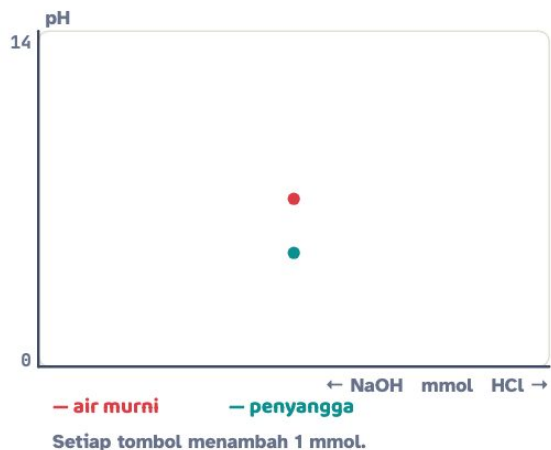
Warna = indikator universal



Isi penyangga (mmol)

 CH_3COOH 10 CH_3COO^- 10

rasio basa : asam = 1

pH air murni
7pH penyangga
4,74 ΔpH air
0 ΔpH penyangga
0HCl – NaOH masuk
0 mmol

Tekan tombol HCl berkali-kali dan bandingkan ΔpH kedua gelas. Perhatikan batang biru dan jingga: setiap H^+ yang masuk mengubah A^- menjadi HA . Teruskan sampai muncul peringatan kapasitas. Lalu turunkan konsentrasi penyangga ke 0,01 M: berapa tetes HCl yang kini cukup untuk membuatnya kewalahan? Coba juga tombol pengenceran: pH air murni dan penyangga hampir tidak berubah, tetapi kapasitasnya?

Kapasitas penyangga adalah banyaknya asam atau basa kuat yang dapat ditampung penyangga sebelum pH-nya berubah drastis (biasanya dianggap 1 satuan). Kapasitas makin besar bila konsentrasi kedua komponen makin besar, dan paling besar bila perbandingannya 1 : 1, yaitu saat $\text{pH} = \text{p}K_a$. Secara praktis, penyangga efektif pada rentang $\text{pH} = \text{p}K_a \pm 1$.

**AWAS JEBAKAN**

Penyangga bukan pelindung tak terbatas: pH-nya tetap berubah, hanya sedikit, dan bila asam atau basa yang masuk melebihi kapasitasnya, pH berubah drastis. Ingat juga bahwa campuran asam kuat dengan garamnya (misalnya $\text{HCl} + \text{NaCl}$) **bukan** penyangga, karena Cl^- tidak mampu menangkap H^+ .

**TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1908, ahli biokimia Amerika **Lawrence J. Henderson** meneliti bagaimana darah bisa mempertahankan keasamannya walau tubuh terus menghasilkan asam. Ia menuliskan hubungan $[\text{H}^+] = K_a[\text{HA}]/[\text{A}^-]$ untuk asam karbonat dan bikarbonat. Pada 1916, dokter Denmark **Karl Albert Hasselbalch** menulis ulang persamaan itu dalam bentuk logaritma, memakai skala pH yang diperkenalkan S.P.L. Sørensen pada 1909, dan memakainya untuk menghitung pH darah dari kadar CO_2 . Lahirlah persamaan yang kini dihafal semua mahasiswa kedokteran.

**KAPASITAS PENYANGGA DAN BATAS HENDERSON–HASSELBALCH**

Kapasitas penyangga dapat dinyatakan sebagai $\beta = \frac{dC_{\text{basa}}}{d\text{pH}}$, yaitu mol basa kuat per liter yang diperlukan untuk menaikkan pH satu satuan. Untuk penyangga HA/A^- dengan konsentrasi total C :

$$\beta = 2,303 \left([\text{H}^+] + [\text{OH}^-] + \frac{C K_a [\text{H}^+]}{(K_a + [\text{H}^+])^2} \right)$$

Suku terakhir maksimum saat $[\text{H}^+] = K_a$ ($\text{pH} = \text{pK}_a$) dan bernilai $2,303 C/4 \approx 0,58 C$. Persamaan Henderson–Hasselbalch sendiri gagal bila penyangga sangat encer atau K_a besar, karena ionisasi HA tidak lagi bisa diabaikan. Contoh: CH_3COOH dan CH_3COONa masing-masing $1,0 \times 10^{-4}$ M. Keseimbangan muatan $[\text{H}^+] + [\text{Na}^+] = [\text{CH}_3\text{COO}^-] + [\text{OH}^-]$ yang diselesaikan secara numerik memberi pH 4,86, bukan 4,74.

27.6 Penyangga di tubuh, alam, dan industri

Enzim, protein yang menjalankan hampir semua reaksi di tubuh, hanya bekerja baik pada pH tertentu. Karena itu tubuhmu dipenuhi penyangga. Penyangga utama di **darah** adalah pasangan asam karbonat–bikarbonat, yang terhubung dengan CO_2 dari napas:



Bahasa sederhana • Darah yang sehat ber-pH sekitar 7,4, sedikit basa. Bila pH darah turun di bawah 7,35 (asidosis) atau naik di atas 7,45 (alkalosis), tubuh menjadi lemas, pusing, bahkan bisa pingsan. Paru-paru dan ginjal bekerja sama menjaganya: paru-paru mengatur banyaknya CO_2 yang dibuang lewat napas, ginjal mengatur banyaknya ion bikarbonat.

Di dalam darah (37 °C), pK_a efektif pasangan ini sekitar 6,1. Supaya pH 7,4, perbandingan $[\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3]$ harus sekitar 20 : 1. Sekilas aneh: penyangga ini jauh dari rasio ideal 1 : 1. Rahasiannya, sistem ini **terbuka**. Asam yang masuk mengubah HCO_3^- menjadi H_2CO_3 , lalu menjadi CO_2 yang segera dihembuskan paru-paru, sehingga H_2CO_3 tidak menumpuk. Di dalam sel, penyangga **fosfat** ($\text{H}_2\text{PO}_4^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HPO}_4^{2-}$, $\text{pK}_a \approx 7,2$; di lingkungan sel sekitar 6,8) dan protein seperti hemoglobin ikut menjaga pH.

pKa efektif H_2CO_3 di darah = 6,1. (a) Berapa perbandingan $[\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3]$ pada pH 7,40? (b) Seorang pendaki di ketinggian bernapas cepat sehingga $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ turun dari 1,2 mM menjadi 0,90 mM, sementara $[\text{HCO}_3^-]$ tetap 24 mM. Berapa pH darahnya, dan apa namanya?

- 1 (a) $7,40 = 6,1 + \log r \rightarrow \log r = 1,30 \rightarrow r = 10^{1,30} \approx 20$.
- 2 (b) $\text{pH} = 6,1 + \log(24/0,90) = 6,1 + 1,43 = 7,53$.
- 3 pH di atas 7,45: **alkalosis respiratorik**, karena terlalu banyak CO_2 terbuang lewat napas.

Rasio normal $\approx 20 : 1$; pH pendaki $\approx 7,53$. Dalam beberapa hari, ginjal membuang lebih banyak HCO_3^- sehingga rasionya kembali mendekati $20 : 1$. Itulah bagian dari aklimatisasi.



KIMIA NUSANTARA • DARI RINJANI SAMPAI PUNCAK JAYA

Pendaki Rinjani (3.726 m), Semeru (3.676 m), dan Puncak Jaya (4.884 m) menghirup udara yang tekanan oksigennya jauh lebih rendah. Tubuh menanggapi dengan bernapas lebih cepat dan dalam, sehingga CO_2 ikut terbuang dan pH darah naik. Karena itu pendaki dianjurkan naik bertahap dan beristirahat di ketinggian menengah: memberi waktu bagi ginjal untuk menyetel ulang penyangga bikarbonat. Di dataran rendah, kolam lele dan tanah gambut punya cerita penyangganya sendiri (lihat kartu di bawah).



LANJUT • IB & OLIMPIADE

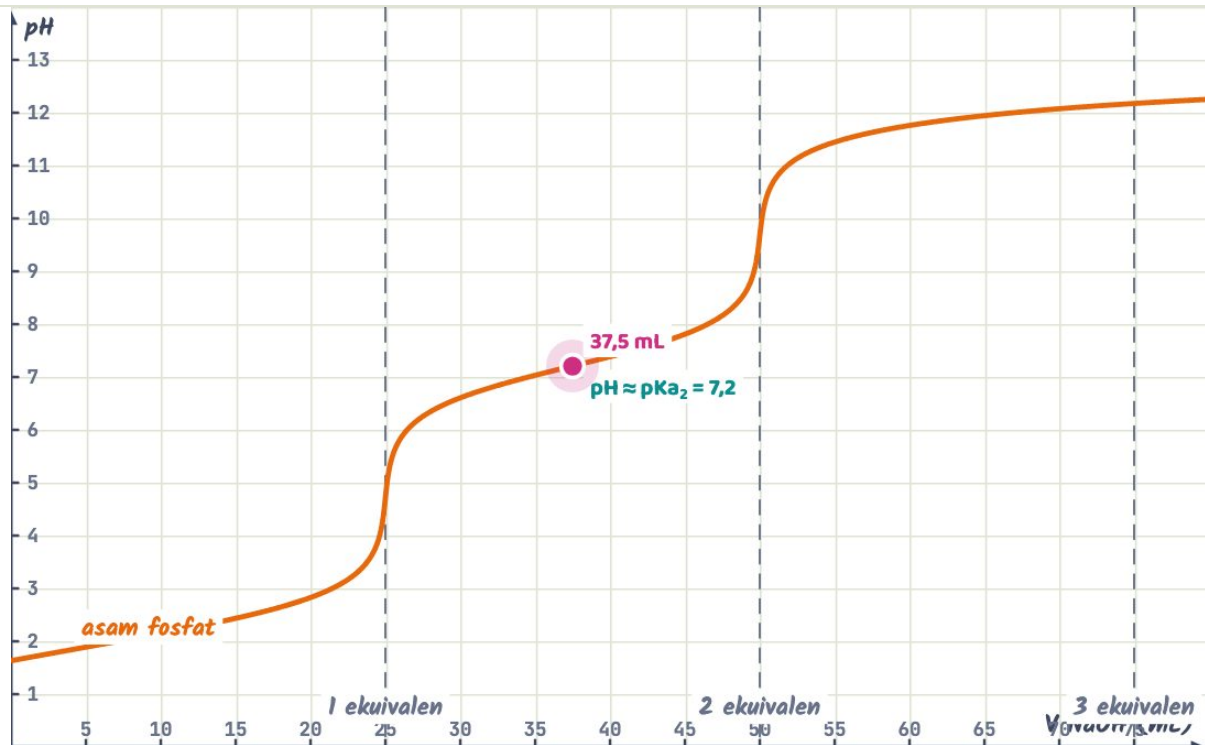
TITRASI ASAM POLIPROTIK

Asam fosfat melepas tiga H^+ secara bertahap (pK_a 2,15; 7,20; 12,35). Setiap tahap punya titik ekuivalen dan daerah penyangganya sendiri. Lonjakan pH yang jelas hanya muncul bila dua pK_a berurutan berselisih kira-kira 4 satuan atau lebih. Pada titik ekuivalen pertama larutan berisi H_2PO_4^- yang amfiprotik, dengan $\text{pH} \approx \frac{1}{2}(\text{pK}_{a1} + \text{pK}_{a2}) \approx 4,7$ (cocok dengan metil jingga atau metil merah); di titik ekuivalen kedua $\text{pH} \approx \frac{1}{2}(\text{pK}_{a2} + \text{pK}_{a3}) \approx 9,8$ (fenolftalein). Di 1,5 ekuivalen, $[\text{H}_2\text{PO}_4^-] = [\text{HPO}_4^{2-}]$ sehingga $\text{pH} = \text{pK}_{a2}$: titik setengah ekuivalen versi kedua.

Bandingkan dengan asam sitrat: ketiga pK_a -nya berdekatan, sehingga ketiga H^+ dititrasi hampir bersamaan dan hanya satu lonjakan yang tampak di 3 ekuivalen. Itulah alasan kadar asam sitrat jeruk nipis cukup dihitung dengan $\alpha = 3$ dan fenolftalein.



$$V = 37,5 \text{ mL} : n_{\text{NaOH}} : n_{\text{asam}} = 1,5 : 1$$



H_3PO_4 : pK_a 2,15 • 7,20 • 12,35 berjauhan → dua lonjakan jelas (25 dan 50 mL); lonjakan ketiga hilang karena pK_a terlalu dekat dengan pH larutan NaOH

pH

7,21

mol NaOH ÷ mol asam

1,5

Geser pilihan asam (0, 1, 2) dan hitung berapa lonjakan yang terlihat. Seret titik magenta ke 37,5 mL pada asam fosfat: pH-nya sama dengan pK_{a2} . Mengapa lonjakan di 75 mL hilang untuk asam fosfat, tetapi justru satu-satunya lonjakan untuk asam sitrat?

Kimia di sekitarmu



Laboratorium uji pangan

Analisis memeriksa kadar asam asetat pada cuka dan asam sitrat pada sirup atau minuman serbuk dengan titrasi, lalu membandingkannya dengan label kemasan.



Darah para pendaki

Napas cepat di ketinggian membuang CO_2 sehingga pH darah naik. Ginjal perlahan membuang ion bikarbonat untuk memulihkannya: itulah aklimatisasi.



Kolam lele

Lele tumbuh baik pada pH air sekitar 6,5–8,5. Kapur pertanian menambah bikarbonat yang menyangga pH ketika fotosintesis siang dan respirasi malam menggoyang kadar CO_2 air.



Tanah gambut

Gambut di Sumatra, Kalimantan, dan Papua ber-pH 3–4. Asam-asam humusnya membentuk penyangga yang kuat, sehingga dibutuhkan banyak kapur dolomit untuk menaikkan pH-nya.



Obat tetes mata

Obat tetes mata dan banyak obat suntik diberi penyangga, misalnya fosfat atau sitrat, agar pH-nya stabil dan cocok dengan tubuh sehingga tidak perih.



Air abu untuk mi kuning

Air abu berisi kalium karbonat. Ion karbonatnya terhidrolisis sehingga larutannya basa, membuat adonan mi lebih kenyal dan kekuningan.

Cek Cepat

Indikator yang paling cocok untuk menitrasi larutan amonia dengan HCl adalah ...

fenolftalein (8,2–10,0)

metil merah (4,4–6,2)

tidak perlu indikator

kubis ungu yang belum disaring

Campuran manakah yang membentuk larutan penyangga?

HCl + NaCl

NaOH + NaCl

NH₃ + NH₄Cl

HNO₃ + KNO₃

Larutan soda abu, Na₂CO₃, dalam air bersifat ...

basa, karena ion CO₃²⁻ terhidrolisis menghasilkan OH⁻

asam, karena mengandung CO₂

netral, karena merupakan garam

asam, karena ion Na⁺ terhidrolisis

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. C • 3. A



Tantangan Rumah: titrasi cuka dengan soda kue dan kubis ungu

Bahan: cuka makan siap pakai ($\pm 5\%$), 1 sendok teh soda kue, air minum, ekstrak kubis ungu (irisian kubis direndam air panas 10 menit lalu disaring), 2 gelas bening, sedotan atau pipet tetes, sendok makan, kertas putih sebagai alas.

1. Larutkan 1 sendok teh rata soda kue dalam satu gelas (± 200 mL) air. Inilah "titran"-mu.
2. Di gelas kedua, campur 1 sendok makan cuka, 3 sendok makan air, dan 1 sendok makan ekstrak kubis ungu. Warnanya merah muda.
3. Ambil larutan soda kue dengan sedotan (tutup ujung atasnya dengan jari, lepaskan untuk meneteskan) atau pipet tetes. Teteskan ke gelas cuka sambil menghitung tetesnya dan mengaduk.
4. Perhatikan buih gas CO_2 dan perubahan warna merah muda $\rightarrow$ ungu $\rightarrow$ biru. Berhenti saat warna biru bertahan setelah diaduk dan buihnya hilang. Catat jumlah tetes.
5. Ulangi dua kali, lalu ganti sampel dengan air jeruk nipis yang diencerkan. Bandingkan jumlah tetesnya.

Keselamatan: lakukan bersama orang dewasa. Jika di rumah hanya ada cuka pekat 25%, minta orang dewasa mengencerkannya dulu (1 bagian cuka + 4 bagian air) dan pakai kacamata, karena cuka pekat perih di mata dan kulit. Jangan mencicipi campuran, jangan menghirup uap cuka dari dekat, dan pakai gelas yang cukup besar karena buihnya bisa meluap. Buang sisa campuran ke wastafel sambil dialiri air, lalu cuci tangan.

Pertanyaan: Sampel mana yang membutuhkan tetes soda kue paling banyak, dan apa artinya bagi kadar asamnya? Mengapa campuran harus diaduk sampai buihnya hilang sebelum kamu menilai warnanya? Tuliskan persamaan reaksi cuka dengan soda kue.



RINGKASAN KILAT

Bab 27 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan prinsip **titrasi asam-basa**, alat-alatnya, dan beda **titik ekuivalen** dengan **titik akhir**
- menghitung konsentrasi dan kadar zat (cuka, asam sitrat jeruk nipis) dari data titrasi dengan $M_a V_a a = M_b V_b b$
- membaca **kurva titrasi** kuat-kuat, lemah-kuat, dan kuat-lemah, lalu memilih **indikator** yang tepat
- meramalkan sifat dan menghitung pH larutan **garam yang terhidrolisis**
- menjelaskan cara kerja **larutan penyangga**, menghitung pH-nya dengan persamaan Henderson-Hasselbalch, dan mengaitkannya dengan darah, sel, kolam ikan, dan tanah



Istilah kunci

titrasi

Titrasi asam-basa

Titran

larutan baku

Titrat

Titik ekuivalen

Titik akhir titrasi

faktor pengenceran

kurva titrasi

Hidrolisis garam

larutan penyangga

Larutan penyangga

Kapasitas penyangga



Rumus penting

$$M_a = \frac{M_b V_b b}{V_a a}$$

Titrasi: mol H^+ = mol OH^- . Di titik ekuivalen, jumlah H^+ dari asam tepat sama dengan jumlah OH^- dari basa. Volume basa yang terbaca di buret membuka rahasia konsentrasi asam.

$$\text{kadar} = \frac{M_b V_b}{V_a} \times f_p \times \frac{60}{10} \%$$

Kadar asam asetat dalam cuka. Molaritas cuka encer dikali faktor pengenceran memberi molaritas cuka asli. Dikali massa molar asam asetat (60 g/mol) lalu dibagi 10, kita dapat gram asam asetat per 100 mL.

$$[OH^-] = \sqrt{\frac{K_w}{K_a} C_g} \quad pH = 14 + \log[OH^-]$$

pH garam dari asam lemah + basa kuat. Anion dari asam lemah merebut H^+ dari air dan meninggalkan OH^- . Makin lemah asam induknya (pK_a besar), makin basa garamnya.

$$pH = pK_a + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$$

Henderson-Hasselbalch: pH larutan penyangga. pH penyangga ditentukan oleh pK_a asamnya dan perbandingan basa konjugat terhadap asam, bukan oleh banyaknya air.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Larutan NaOH, bahkan yang encer, dapat merusak mata dan mengiritasi kulit.
- Jangan lupa valensi dan faktor pengenceran.
- Titik ekuivalen tidak selalu pH 7.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=27

🧩 Teka-teki untuk Bab 28

Stalaktit di Gua Gong, Pacitan, tumbuh sangat lambat, sering kurang dari satu sentimeter per abad. Air yang menetes dari langit-langit gua tampak bening, tetapi meninggalkan "batu" setetes demi setetes. Zat apa yang keluar dari air di sana, dan apa hubungannya dengan CO_2 , pasangan penyangga darah kita?

▼ Intip petunjuk

Air hujan yang mengandung CO_2 (asam karbonat) melarutkan batu kapur menjadi $Ca(HCO_3)_2$. Saat tetesan air tiba di udara gua, sebagian CO_2 lepas, kesetimbangan bergeser, dan $CaCO_3$ yang sukar larut mengendap. Seberapa "sukar larut"? Di Bab 28 kamu akan mengukurnya dengan **hasil kali kelarutan**, K_{sp} .

28 Kelarutan & Ksp: Saat Air Angkat Tangan

Air sanggup melarutkan banyak zat, tetapi kesabarannya ada batasnya. Lewat sedikit saja dari batas itu, zat terlarut "keluar" lagi sebagai padatan: kerak di teko nenek, batu ginjal, sampai stalaktit raksasa di Gua Gong.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **kelarutan** serta larutan tak jenuh, jenuh, dan lewat jenuh pada tingkat partikel;
- menulis ungkapan **hasil kali kelarutan** (K_{sp}) dan menghitung kelarutan s dari K_{sp} untuk garam AB, AB_2 , A_2B , AB_3 , dan A_2B_3 ;
- memprediksi **terbentuknya endapan** dengan membandingkan Q_{sp} dan K_{sp} , lalu menulis persamaan ion bersihnya;
- menjelaskan pengaruh **ion senama** dan **pH** terhadap kelarutan, dari gigi berlubang sampai stalaktit;
- merancang **pengendapan selektif** dan menjelaskan larutnya endapan karena pembentukan **ion kompleks**.

BATU DI DALAM TEKOK NENEK

KOMIK • 4 PANEL

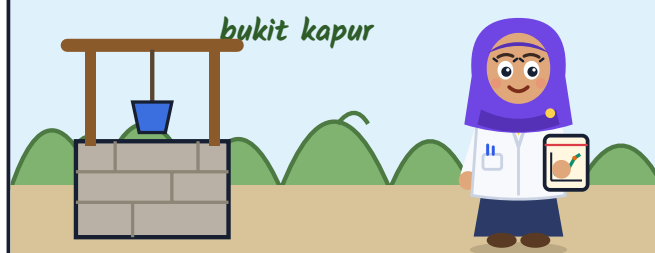
Liburan di rumah Nenek, Gunungkidul

BIMA

Lho, dasar teko Nenek penuh batu putih! Siapa yang iseng menaruh kapur di sini?

**LARAS**

Tidak ada yang iseng, Bim. Batu itu keluar sendiri dari air sumur. Air di sini merembes lewat bukit-bukit kapur.



KAK TIRTA

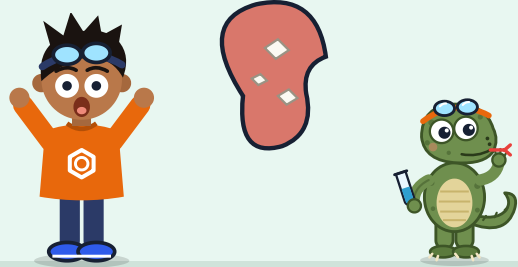
Proses yang sama, tetapi jauh lebih sabar, membangun stalaktit di Gua Gong, Pacitan. Setetes demi setetes, selama ribuan tahun!

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

Batu ginjal juga lahir begitu: garam yang "menyerah" lalu keluar dari larutan!

BIMA

Kapan sih air "menyerah" melarutkan garam?

**Tebak Dulu!**

Sesendok serbuk kapur (CaCO_3) diaduk dalam segelas air. Hampir semua serbuk tetap mengendap di dasar. Apa yang sebenarnya terjadi di tingkat partikel?

Tidak ada satu ion pun yang larut. Kapur benar-benar tidak larut dalam air.

Sedikit sekali yang larut (beberapa miligram per liter), lalu larutan menjadi jenuh: ion terus lepas dari kristal dan menempel kembali dengan laju yang sama.

Semua kapur sebenarnya larut, hanya saja larutannya tampak seperti endapan.

Kapur bereaksi dengan air dan berubah menjadi gas, sisanya kotoran.

Jawabannya: sedikit sekali yang larut. Tidak ada garam yang "sama sekali tidak larut". Satu liter air hanya sanggup menampung beberapa miligram CaCO_3 , lalu larutan menjadi *jenuh*. Di dalamnya terjadi tarik-ulur tanpa henti: ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} lepas dari kristal, sementara ion lain menempel kembali. Bab ini mengajarkan cara menghitung "beberapa miligram" itu dengan tepat.

28.1 Kelarutan dan larutan jenuh

Masukkan garam dapur sesendok demi sesendok ke dalam segelas air (250 mL) sambil diaduk. Sampai sekitar 90 gram, semuanya lenyap. Setelah itu, butiran garam mulai bertahan di dasar gelas: air sudah "angkat tangan". Gula pasir jauh lebih rakus larut (lebih dari 500 gram per gelas!), sedangkan kapur hanya beberapa miligram.

Bahasa sederhana • Bayangkan air sebagai angkot yang kursinya terbatas. Penumpang (partikel garam) boleh naik sampai kursi penuh. Kalau sudah penuh, penumpang baru hanya bisa naik jika ada yang turun. Angkot yang penuh itu kita sebut **larutan jenuh**. Garam yang "sukar larut" seperti kapur ibarat angkot yang kursinya hanya satu atau dua.

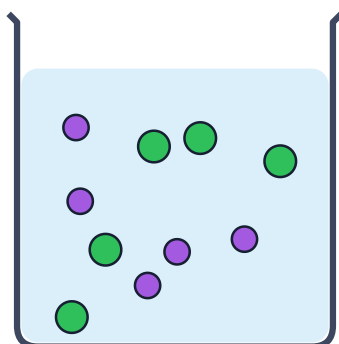


DEFINISI • KELARUTAN

Kelarutan (*s*, dari *solubility*) adalah jumlah **maksimum** zat yang dapat larut dalam sejumlah pelarut pada suhu tertentu. Satuannya bisa g per 100 g air, g/L, atau mol/L (**kelarutan molar**).

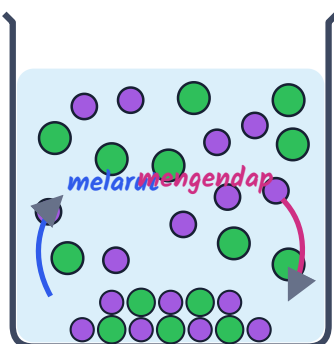
- **Larutan tak jenuh**: zat terlarut masih di bawah batas, masih bisa melarutkan lagi.
- **Larutan jenuh**: tepat di batas; padatan yang ditambahkan tidak larut lagi.
- **Larutan lewat jenuh**: zat terlarut melebihi batas (biasanya dibuat dengan mendinginkan larutan panas perlahan); tidak stabil dan mudah mengkristal.

Tak jenuh



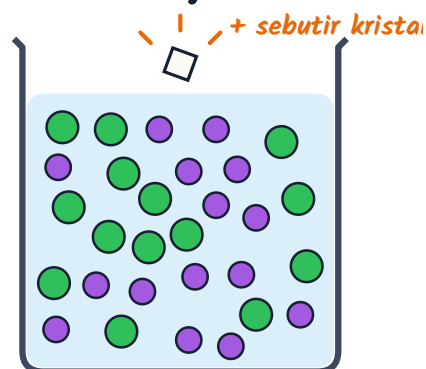
masih bisa melarutkan
 $Q < K$: tambah garam, larut

Jenuh



melarut = mengendap
 $Q = K$: setimbang dinamis

Lewat jenuh



terlalu banyak terlarut
 $Q > K$: tidak stabil

● kation (mis. Ag^+) ● anion (mis. Cl^-)

Larutan jenuh adalah **kesetimbangan dinamis**: setiap detik ion lepas dari kristal (melarut) dan ion lain menempel kembali (mengendap) dengan laju sama. Larutan lewat jenuh langsung mengkristal begitu diberi "biji" kristal, seperti pada pembuatan permen gula batu.

Untuk garam ionik yang sukar larut, kesetimbangan itu ditulis antara padatan dan ion-ionnya dalam larutan. Contohnya perak klorida:



Apakah suatu garam mudah atau sukar larut? Kimiawan sudah merangkumnya menjadi **aturan kelarutan**. Hafalkan pola besarnya, bukan setiap baris.

Ion dalam garam

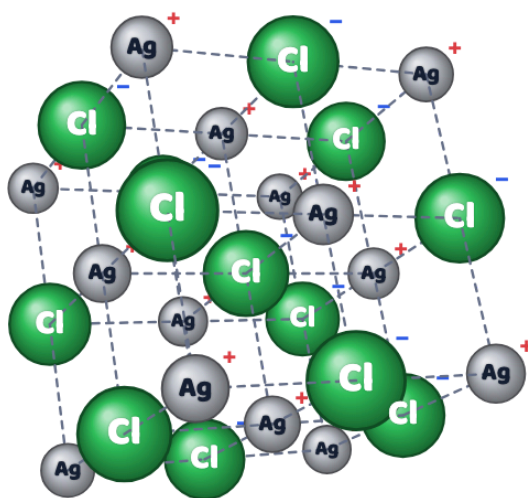
Umumnya

Pengecualian penting

Na^+ , K^+ , NH_4^+ (golongan 1 dan amonium)	larut	hampir tidak ada
nitrat NO_3^- , asetat CH_3COO^-	larut	hampir tidak ada
klorida Cl^- , bromida Br^- , iodida I^-	larut	sukar larut dengan Ag^+ , Pb^{2+} , Hg_2^{2+}
sulfat SO_4^{2-}	larut	BaSO_4 , PbSO_4 , SrSO_4 sukar larut; CaSO_4 sedikit larut
karbonat CO_3^{2-} , fosfat PO_4^{3-}	sukar larut	larut bila kationnya golongan 1 atau NH_4^+
hidroksida OH^-	sukar larut	golongan 1 dan $\text{Ba}(\text{OH})_2$ larut; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sedikit larut

MOLEKUL 3D

Kisi yang harus dibongkar air



Seret untuk memutar · ketuk atom untuk mengukur

Kisi perak klorida (AgCl) AgCl

AgCl berkisi persis seperti garam dapur: setiap Ag^+ dikelilingi 6 Cl^- . Namun NaCl larut ± 360 g per liter, sedangkan AgCl hanya ± 2 mg per liter! Ag^+ menarik awan elektron Cl^- sehingga ikatannya agak kovalen dan kisinya sulit dibongkar air.

Bandingkan kisi AgCl dan NaCl : bentuknya kembar, tetapi NaCl larut ± 360 g per liter sedangkan AgCl hanya ± 2 mg per liter! Lalu pilih CaF_2 : hitung berapa ion F^- di sekitar satu ion Ca^{2+} (ketuk ion untuk mengukur jarak). Mengapa rumusnya CaF_2 , bukan CaF ?

Mengapa garam yang kisi-kisinya kembar bisa berbeda kelarutan begitu jauh? Melarut adalah adu kuat antara dua tarikan: **energi kisi** (ion saling menahan dalam kristal) melawan **energi hidrasi** (molekul air merangkul ion). Ion Ag^+ menarik awan elektron Cl^- sehingga ikatannya agak kovalen dan kisi-kisinya "lengket"; air kalah tarik. Pada Na^+ , air yang menang.



Suhu Mengubah Kelarutan

Kebanyakan garam lebih mudah larut dalam air panas (gula batu dan kristal garam dibuat dengan cara ini). Namun ada pengecualian yang penting di bab ini: CaCO_3 dan Ca(OH)_2 justru **lebih sukar larut saat air panas**. Itu salah satu sebab kerak lebih cepat menumpuk di teko dan ketel daripada di gelas air dingin.

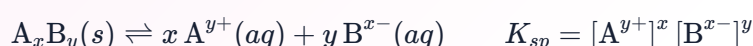
28.2 Hasil kali kelarutan (K_{sp}) dan hubungannya dengan s

Di Bab 22 kamu bertemu tetapan kesetimbangan K_c . Larutan jenuh adalah sebuah kesetimbangan, jadi ia juga punya tetapan. Karena padatan murni tidak dimasukkan ke dalam ungkapan K (konsentrasinya tetap), yang tersisa hanyalah **hasil kali konsentrasi ion-ionnya**.



DEFINISI • HASIL KALI KELARUTAN

Untuk garam sukar larut A_xB_y yang jenuh dalam air:



K_{sp} (solubility product) adalah **hasil kali kelarutan**: hasil kali konsentrasi ion dalam larutan **jenuh**, masing-masing dipangkatkan koefisiennya. Nilainya hanya bergantung pada **suhu** (data buku biasanya pada 25 °C).

Contoh ungkapan K_{sp} :

- $\text{AgCl}(s) \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow K_{sp} = [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-]$
- $\text{CaF}_2(s) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2 \text{F}^- \rightarrow K_{sp} = [\text{Ca}^{2+}][\text{F}^-]^2$
- $\text{Ag}_2\text{CrO}_4(s) \rightleftharpoons 2 \text{Ag}^+ + \text{CrO}_4^{2-} \rightarrow K_{sp} = [\text{Ag}^+]^2[\text{CrO}_4^{2-}]$
- $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2(s) \rightleftharpoons 3 \text{Ca}^{2+} + 2 \text{PO}_4^{3-} \rightarrow K_{sp} = [\text{Ca}^{2+}]^3[\text{PO}_4^{3-}]^2$

Sekarang hubungkan dengan kelarutan molar s . Jika s mol CaF_2 larut per liter, terbentuk s mol/L Ca^{2+} dan $2s$ mol/L F^- . Maka

$$K_{sp} = (s)(2s)^2 = 4s^3$$

▼ Mengapa begitu? Penurunan umum untuk A_xB_y

Setiap satuan rumus A_xB_y yang larut melepas x kation dan y anion. Bila kelarutannya s mol/L, maka $[\text{A}^{y+}] = xs$ dan $[\text{B}^{x-}] = ys$. Substitusikan:

$$K_{sp} = (xs)^x (ys)^y = x^x y^y s^{x+y} \implies s = \sqrt[x+y]{\frac{K_{sp}}{x^x y^y}}$$

Untuk $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: $x = 3$, $y = 2$, jadi $K_{sp} = 3^3 \cdot 2^2 \cdot s^5 = 108 s^5$. Perhatikan bahwa tipe A_2B_3 juga menghasilkan $2^2 \cdot 3^3 = 108$. Rumus ini hanya berlaku bila ion-ion itu berasal dari garamnya saja (air murni) dan tidak bereaksi lebih lanjut dengan air.



Tipe garam	Contoh	Ion yang dilepas	K_{sp} dalam s	s dari K_{sp}
AB	AgCl, BaSO ₄ , CaCO ₃	s, s	s^2	$\sqrt{K_{sp}}$
AB ₂ / A ₂ B	CaF ₂ , Mg(OH) ₂ , PbI ₂ , Ag ₂ CrO ₄	$s, 2s$	$4s^3$	$\sqrt[3]{K_{sp}/4}$
AB ₃ / A ₃ B	Fe(OH) ₃ , Al(OH) ₃ , Ag ₃ PO ₄	$s, 3s$	$27s^4$	$\sqrt[4]{K_{sp}/27}$
A ₂ B ₃ / A ₃ B ₂	Bi ₂ S ₃ , Ca ₃ (PO ₄) ₂	$2s, 3s$	$108s^5$	$\sqrt[5]{K_{sp}/108}$

$$K_{sp} = x^x y^y s^{x+y}$$

Setiap mol garam yang larut melepas x mol kation dan y mol anion. Kalikan konsentrasi keduanya, masing-masing dipangkatkan koefisiennya.

x Kation per rumus

y Anion per rumus

s Kelarutan molar mol/L

K_{sp} Hasil kali kelarutan

HASIL KALI KELARUTAN

$3,92 \times 10^{-11}$

tipe AB_2 / A_2B : $K_{sp} = 4s^3$

🦷 mirip CaF_2 (fluorit): $K_{sp} \approx 3,9 \times 10^{-11}$

Konsentrasi kation = $2,14 \times 10^{-4}$ M, konsentrasi anion = $4,28 \times 10^{-4}$ M, jadi $K_{sp} = 3,92 \times 10^{-11}$.

Cek satuan: (mol/L) pangkat $(x + y)$: satuan K_{sp} bergantung tipe garam, maka biasanya ditulis tanpa satuan

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



TRIK KAK TIRTA

"Setiap koefisien dipangkatkan dengan **dirinya sendiri**." AB_2 : $1^1 \cdot 2^2 = 4$, jadi $4s^3$. A_2B_3 : $2^2 \cdot 3^3 = 4 \cdot 27 = 108$, jadi $108s^5$. Pangkat s selalu = jumlah ion dalam satu rumus. Cek cepat: $Fe(OH)_3$ punya 4 ion, jadi $27s^4$.



Tebak Dulu!

$K_{sp} \text{ AgCl} = 1,8 \times 10^{-10}$, sedangkan $K_{sp} \text{ Ag}_2\text{CrO}_4 = 1,1 \times 10^{-12}$. Mana yang kelarutan molarnya (mol/L) lebih besar?

AgCl, karena K_{sp} -nya ± 160 kali lebih besar.

Ag_2CrO_4 , walaupun K_{sp} -nya lebih kecil.

Sama besar, karena keduanya garam perak.

Tidak bisa dihitung tanpa percobaan.

Jawabannya: Ag_2CrO_4 . AgCl (tipe AB): $s = \sqrt{1,8 \times 10^{-10}} = 1,3 \times 10^{-5} \text{ M}$. Ag_2CrO_4 (tipe A_2B): $s = \sqrt[3]{1,1 \times 10^{-12}/4} = 6,5 \times 10^{-5} \text{ M}$, lima kali lebih larut! Pangkatnya berbeda, jadi K_{sp} tidak bisa langsung dibandingkan.



AWAS JEBAKAN

Membandingkan K_{sp} untuk menentukan mana yang lebih larut **hanya sah bila tipe rumusnya sama** (AB dengan AB, AB_2 dengan AB_2). Untuk tipe berbeda, hitung s masing-masing dulu. Jebakan kedua: untuk $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $[\text{OH}^-] = 2s$, lalu dikuadratkan menjadi $(2s)^2 = 4s^2$, **bukan** $2s^2$.

Berikut nilai K_{sp} beberapa garam pada 25 °C. Nilai K_{sp} di buku yang berbeda bisa sedikit berbeda (misalnya CaCO_3 ditulis antara $2,8 \times 10^{-9}$ dan $4,8 \times 10^{-9}$) karena cara pengukuran dan bentuk kristalnya berbeda. Ikuti nilai yang diberikan soal.

Garam	Tipe	K_{sp} (25 °C)	s (mol/L)	s (mg/L)	Di mana kamu menemuinya
AgCl	AB	$1,8 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-5}$	1,9	uji ion klorida
AgBr	AB	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,1 \times 10^{-7}$	0,13	film foto lama
AgI	AB	$8,5 \times 10^{-17}$	$9,2 \times 10^{-9}$	0,002	uji ion iodida
BaSO_4	AB	$1,1 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-5}$	2,4	"bubur barium" rontgen
CaCO_3 (kalsit)	AB	$\pm 3,3 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10^{-5}$	5,7*	kapur, kerak, stalaktit
CaC_2O_4	AB	$\pm 2,3 \times 10^{-9}$	$4,8 \times 10^{-5}$	6,1	batu ginjal
CaF_2	AB_2	$3,9 \times 10^{-11}$	$2,1 \times 10^{-4}$	17	mineral fluorit

Mg(OH) ₂	AB ₂	$5,6 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{-4}$	6,5	obat maag (antasida)
PbI ₂	AB ₂	$9,8 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-3}$	620	percobaan "hujan emas"
Ag ₂ CrO ₄	A ₂ B	$1,1 \times 10^{-12}$	$6,5 \times 10^{-5}$	22	titrasi Mohr
Fe(OH) ₃	AB ₃	$2,8 \times 10^{-39}$	$1,0 \times 10^{-10}$	0,00001	karat, air sumur kemerahan
Ca ₃ (PO ₄) ₂	A ₃ B ₂	$2,1 \times 10^{-33}$	$1,1 \times 10^{-7}$	0,035	tulang, pupuk fosfat

*Kelarutan CaCO₃ yang terukur dalam air murni sedikit lebih besar (± 13 mg/L) karena sebagian ion CO₃²⁻ bereaksi dengan air menjadi HCO₃⁻. Inilah petunjuk pertama bahwa pH ikut menentukan kelarutan (subbab 28.5).

RUMUS HIDUP Kelarutan garam AB₂ 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.

K_{sp} Hasil kali kelarutan

M_r Massa molar garam g/mol

s Kelarutan molar mol/L

KELARUTAN MOLAR

$1,119 \times 10^{-4}$

mol/L

🔑 Mg(OH)₂, obat maag: larutan jenuhnya ber-pH $\pm 10,35$

Larut $1,119 \times 10^{-4}$ mol/L, yaitu **6,488** mg per liter. Ion yang dua itu konsentrasinya $2s = 2,237 \times 10^{-4}$ M.

Cek satuan: akar pangkat tiga dari (mol/L)³ = mol/L ✓

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-KSP-AB2

CONTOH Seberapa larut perak klorida?

K_{sp} AgCl pada 25 °C adalah $1,8 \times 10^{-10}$. Hitung kelarutannya dalam mol/L dan mg/L. (Mr AgCl = 143,5)

1 Tipe AB: $K_{sp} = s \cdot s = s^2$.

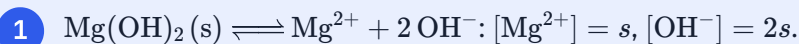
2 $s = \sqrt{1,8 \times 10^{-10}} = 1,34 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$.

3 Dalam gram: $1,34 \times 10^{-5} \times 143,5 = 1,92 \times 10^{-3} \text{ g/L} = 1,9 \text{ mg/L}$.

$s = 1,3 \times 10^{-5} \text{ mol/L} \approx 1,9 \text{ mg per liter}$, kira-kira sebutir kecil garam dalam satu botol air besar. Sukar larut, tetapi tidak nol.

KERJAKAN BERSAMA pH susu magnesia

Obat maag cair "susu magnesia" berisi $\text{Mg}(\text{OH})_2$ yang tersuspensi dalam larutan jenuhnya. $K_{sp} \text{Mg}(\text{OH})_2 = 5,6 \times 10^{-12}$. Hitung kelarutan dan pH larutan jenuhnya.



2 $K_{sp} = s(2s)^2 = 4s^3 = 5,6 \times 10^{-12} \rightarrow s^3 = 1,4 \times 10^{-12} \rightarrow s = 1,12 \times 10^{-4} \text{ M}$.

3 $[\text{OH}^-] = 2s = 2,24 \times 10^{-4} \text{ M} \rightarrow \text{pOH} = -\log(2,24 \times 10^{-4}) = 3,65$.

4 $\text{pH} = 14 - 3,65 = 10,35$.

$s = 1,1 \times 10^{-4} \text{ M}$ dan $\text{pH} \approx 10,35$: cukup basa untuk menetralkan asam lambung, tetapi karena sukar larut, tidak cukup pekat untuk melukai mulut seperti soda api.

ADU CEPAT $K_{sp} \rightarrow s$ (garam tipe AB)

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

$s = \sqrt{K_{sp}}$. Akar dari pangkat 10 genap: bagi pangkatnya dengan 2. Contoh: $\sqrt{(4 \times 10^{-10})} = 2 \times 10^{-5}$. Boleh menulis $2\text{e-}5$.



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1864 dua ilmuwan Norwegia, **Cato Guldberg** dan **Peter Waage**, merumuskan hukum aksi massa yang menjadi dasar semua tetapan kesetimbangan. Dua dasawarsa kemudian, **Svante Arrhenius** mengusulkan bahwa garam dalam air terurai menjadi ion. Pada akhir 1880-an, **Walther Nernst** (kelak peraih Nobel Kimia 1920) memadukan keduanya untuk menjelaskan mengapa garam sukar larut makin sukar larut bila ditambah ion senama. Lahirlah gagasan "hasil kali kelarutan" yang sampai kini dipakai di laboratorium analisis di seluruh dunia.

MITOS

"Garam yang 'tidak larut' sama sekali tidak larut."

MITOS

"Ksp makin besar berarti garamnya pasti makin mudah larut."

FAKTA

Semua garam larut walau sedikit. AgCl melarut $\pm 1,9$ mg per liter. Justru sedikit itulah yang membuat K_{sp} bisa diukur dan dihitung.

FAKTA

Hanya benar untuk tipe rumus yang sama.
 Ag_2CrO_4
 punya K_{sp}
 lebih kecil daripada AgCl, tetapi lima kali lebih larut.

MITOS

"Kalau diaduk lebih lama, garam di larutan jenuh akan larut lebih banyak."

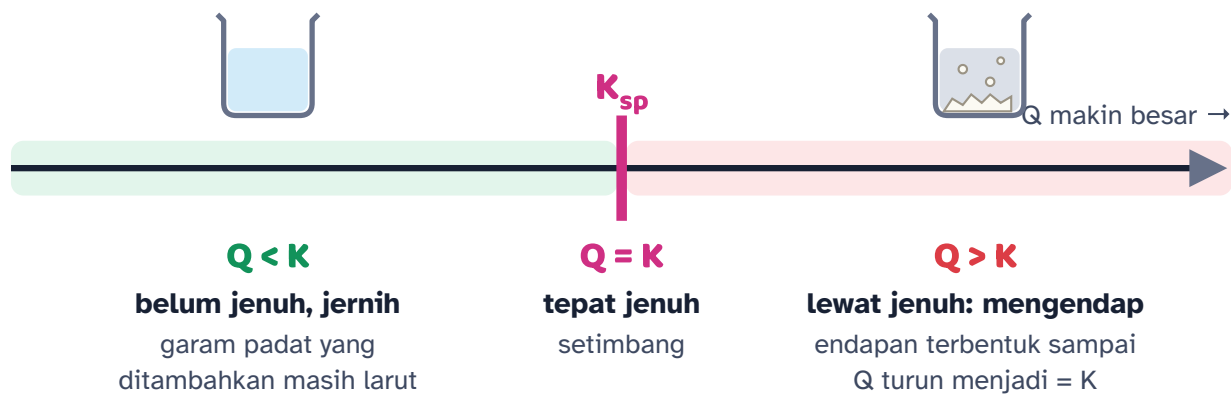
FAKTA

Mengaduk hanya mempercepat tercapainya jenuh. Pada suhu tetap, batasnya tetap. Untuk melarutkan lebih banyak, ubah suhunya atau "curi" salah satu ionnya.

28.3 Memprediksi pengendapan: Q_{sp} lawan K_{sp}

Saat dua larutan jernih dicampur, kadang muncul awan padatan dalam sekejap. Itulah **endapan**. Untuk memprediksinya, hitung hasil kali ion dengan konsentrasi **saat itu juga** (belum tentu setimbang). Nilai ini disebut **hasil kali ion**, Q_{sp} .

$$Q_{sp} = [\text{A}^{y+}]^x [\text{B}^{x-}]^y \quad (\text{konsentrasi sesaat})$$



Bandingkan Q_{sp} dengan K_{sp} . Di sebelah kanan garis, larutan "kelebihan muatan" ion sehingga sebagian ion bergandengan membentuk padatan sampai $Q_{sp} = K_{sp}$.



ATURAN • ENDAPAN ATAU TIDAK?

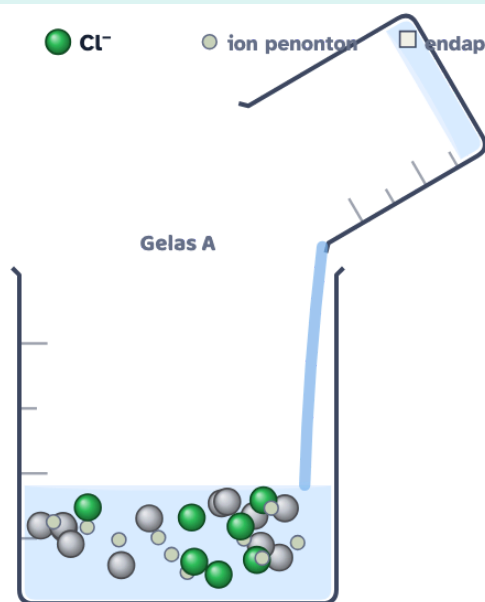
- $Q_{sp} < K_{sp}$: larutan **belum jenuh**; tidak ada endapan.
- $Q_{sp} = K_{sp}$: larutan **tepat jenuh**; endapan belum (atau tepat akan) terbentuk.
- $Q_{sp} > K_{sp}$: larutan **lewat jenuh**; endapan terbentuk sampai Q_{sp} turun menjadi K_{sp} .



AWAS JEBAKAN

Saat dua larutan dicampur, volumenya bertambah, jadi setiap ion **terencerkan**. Hitung dulu konsentrasi setelah dicampur, $c_{\text{baru}} = \frac{c \times V}{V_{\text{total}}}$, baru masukkan ke Q_{sp} . Mencampur volume yang sama berarti setiap konsentrasi menjadi setengahnya.

● Ag^+ ● Cl^- ● ion penonton □ endapan AgCl



A: AgNO_3 0,001 M · 50 mL



Sebelum dicampur

A: AgNO_3 0,001 M

B: NaCl 0,001 M

Volume total nanti 100 mL

$$Q_{sp} = [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-]$$

$$K_{sp} \text{ AgCl} = 1,8 \times 10^{-10}$$

Mengendap atau tidak?

Tebak dulu, lalu tekan ►
(atau ketuk gelas B)

[kation] campuran

—

[anion] campuran

—

Q_{sp}

—

K_{sp}

$$1,8 \times 10^{-10}$$

Hasil

Tebak dulu, lalu tekan ► Jalankan

Massa endapan

—

Pilih pasangan larutan, atur konsentrasi dan volume, lalu **tebak dulu** sebelum menekan ► Jalankan untuk menuang. Coba buat AgCl *hampir* mengendap tetapi tetap jernih. Lalu bandingkan: mengapa Ag_2CrO_4 dan PbI_2 lebih "peka" terhadap kenaikan konsentrasi ion yang dipangkatkan dua? Banyaknya bola hanyalah kesan (skala logaritma), bukan jumlah ion sebenarnya. Senyawa timbal beracun: di laboratorium nyata, "hujan emas" PbI_2 hanya dikerjakan guru.

$$Q_{sp} = \frac{c_1 V_1}{V_1 + V_2} \times \frac{c_2 V_2}{V_1 + V_2}$$

Encerkan dulu setiap ion dengan volume total, baru kalikan. Jika hasilnya melewati Ksp AgCl ($1,8 \times 10^{-10}$), endapan putih muncul.

c_1 Konsentrasi AgNO_3 mol/L

V_1 Volume AgNO_3 mL

c_2 Konsentrasi NaCl mol/L

V_2 Volume NaCl mL

Q_{sp} Hasil kali ion

HASIL KALI ION

$2,5 \times 10^{-11}$

$Q_{sp} < K_{sp} \rightarrow$ tetap jernih (belum jenuh)

Setelah dicampur: $[\text{Ag}^+] = 5 \times 10^{-6} \text{ M}$ dan $[\text{Cl}^-] = 5 \times 10^{-6} \text{ M}$. $Q_{sp}/K_{sp} = 0,139$.

Cek satuan: (mol/L) $\times$ (mol/L); mL saling mencoret dalam pecahan pengenceran ✓

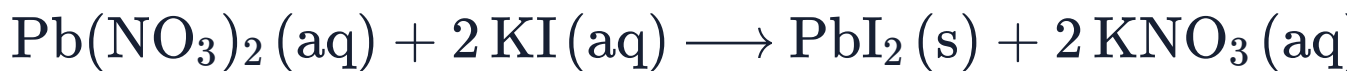
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#RM-QSP-CAMPUR

Sebanyak 50 mL $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 0,010 M dicampur dengan 50 mL KI 0,010 M. Apakah PbI_2 mengendap? Bagaimana jika kedua larutan hanya 0,0010 M? ($K_{sp} \text{PbI}_2 = 9,8 \times 10^{-9}$)

- 1 Volume total 100 mL, jadi setiap konsentrasi menjadi setengahnya: $[\text{Pb}^{2+}] = [\text{I}^-] = 0,0050 \text{ M}$.
- 2 $Q_{sp} = [\text{Pb}^{2+}][\text{I}^-]^2 = (0,0050)(0,0050)^2 = 1,25 \times 10^{-7}$.
- 3 $1,25 \times 10^{-7} > 9,8 \times 10^{-9}$: **mengendap** kuning keemasan.
- 4 Pada 0,0010 M: $[\text{Pb}^{2+}] = [\text{I}^-] = 5,0 \times 10^{-4} \text{ M} \rightarrow Q_{sp} = (5,0 \times 10^{-4})^3 = 1,25 \times 10^{-10} < K_{sp}$: **tetap jernih**.

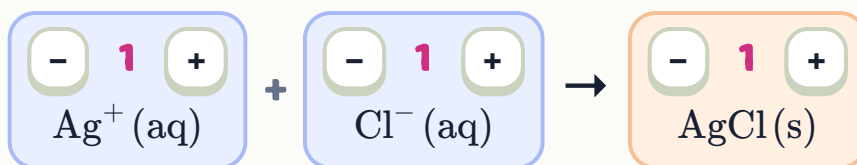
Mengencerkan 10 kali menurunkan Q_{sp} 1.000 kali karena ada tiga ion dalam rumusnya (10^3). Itulah sebabnya garam tipe AB_2 sangat peka terhadap pengenceran.

Saat endapan terbentuk, ion-ion yang tidak ikut mengendap (misalnya K^+ dan NO_3^-) hanya menonton. Kita menulis **persamaan ion bersih** tanpa **ion penonton** itu:

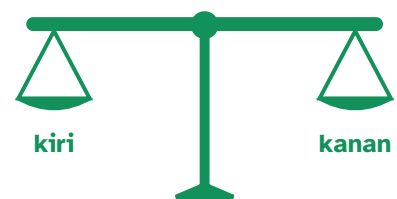


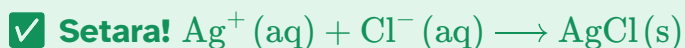
PENYETARA REAKSI

Setarakan persamaan ion bersih pengendapan



Unsur	Kiri	Kanan	
Ag	1 ●	1 ●	✓
Cl	1 ●	1 ●	✓
muatan	0	0	✓





 **Petunjuk**

 **Ulang**

Persamaan berikutnya ▶

Persamaan 1 dari 7

✓ **pernah kamu setarakan**

Perhatikan baris **muatan** di tabel: pada persamaan ion, muatan kiri dan kanan juga harus sama. Persamaan keenam adalah resep stalaktit, dan yang terakhir menunjukkan endapan AgCl yang larut kembali dalam amonia (subbab 28.6).



UJI ION GAYA IGCSE

Pengendapan dipakai untuk mengenali ion. **Halida:** asamkan dengan asam nitrat encer, tambah perak nitrat → endapan **putih** (Cl^-), **krem** (Br^-), atau **kuning** (I^-). **Sulfat:** asamkan dengan asam klorida encer, tambah barium klorida (atau barium nitrat) → endapan **putih** BaSO_4 . Asam ditambahkan lebih dulu untuk menyingkirkan ion karbonat, yang juga membentuk endapan dan bisa menipu.



TRIK KAK TIRTA

"Encerkan, pecah, pangkatkan, bandingkan." (1) Hitung konsentrasi setelah dicampur. (2) Pecah garam menjadi ion-ionnya. (3) Pangkatkan sesuai koefisien. (4) Bandingkan dengan K_{sp} . Seperti memasak sambal: takar, ulek, cicipi, putuskan!



ADU CEPAT

Qsp campuran bervolume sama

ADU CEPAT • MAINKAN DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28

Latihan kilat 60 detik dengan soal acak dan rekor pribadi.

Volume menjadi dua kali lipat, jadi setiap konsentrasi menjadi setengahnya. $Q_{sp} = [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-]$. Boleh menulis $2,5\text{e-}5$.



KIMIA NUSANTARA • DARI GARAM KROSOK KE GARAM MEJA

Garam krosok dari tambak di Madura dan pesisir utara Jawa tidak hanya berisi NaCl. Ada juga ion Mg^{2+} , Ca^{2+} , dan SO_4^{2-} yang membuat garam terasa agak pahit dan mudah lembap. Di industri pemurnian, larutan garam dapat ditambah natrium karbonat dan natrium hidroksida sehingga Ca^{2+} mengendap sebagai CaCO_3 dan Mg^{2+} sebagai $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Endapan disaring, lalu larutannya dikristalkan kembali. NaCl yang sangat mudah larut tetap tinggal di larutan: pengendapan selektif dalam skala pabrik!

28.4 Efek ion senama



Tebak Dulu!

Ke dalam larutan jenuh AgCl (dengan sedikit endapan di dasar) ditambahkan sesendok garam dapur, NaCl. Apa yang terjadi?

Lebih banyak AgCl larut, karena garam membantu melarutkan garam.

Tidak ada perubahan, karena NaCl tidak bereaksi dengan AgCl.

Endapan AgCl bertambah, dan kelarutan AgCl turun.

K_{sp} AgCl turun karena ada zat lain.

Jawabannya: endapan bertambah. NaCl menambah Cl^- , ion yang juga dimiliki AgCl. $Q_{sp} = [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-]$ mendadak melebihi K_{sp} , jadi sebagian Ag^+ "ditangkap" kembali menjadi AgCl padat. K_{sp} tidak berubah (suhu tetap); yang berubah adalah kelarutannya.

Inilah **efek ion senama**: kelarutan garam sukar larut **turun** bila larutan sudah mengandung salah satu ionnya. Menurut asas Le Chatelier (Bab 22), menambah Cl^- menggeser kesetimbangan $\text{AgCl(s)} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$ ke kiri.



ATURAN • KELARUTAN DENGAN ION SENAMA

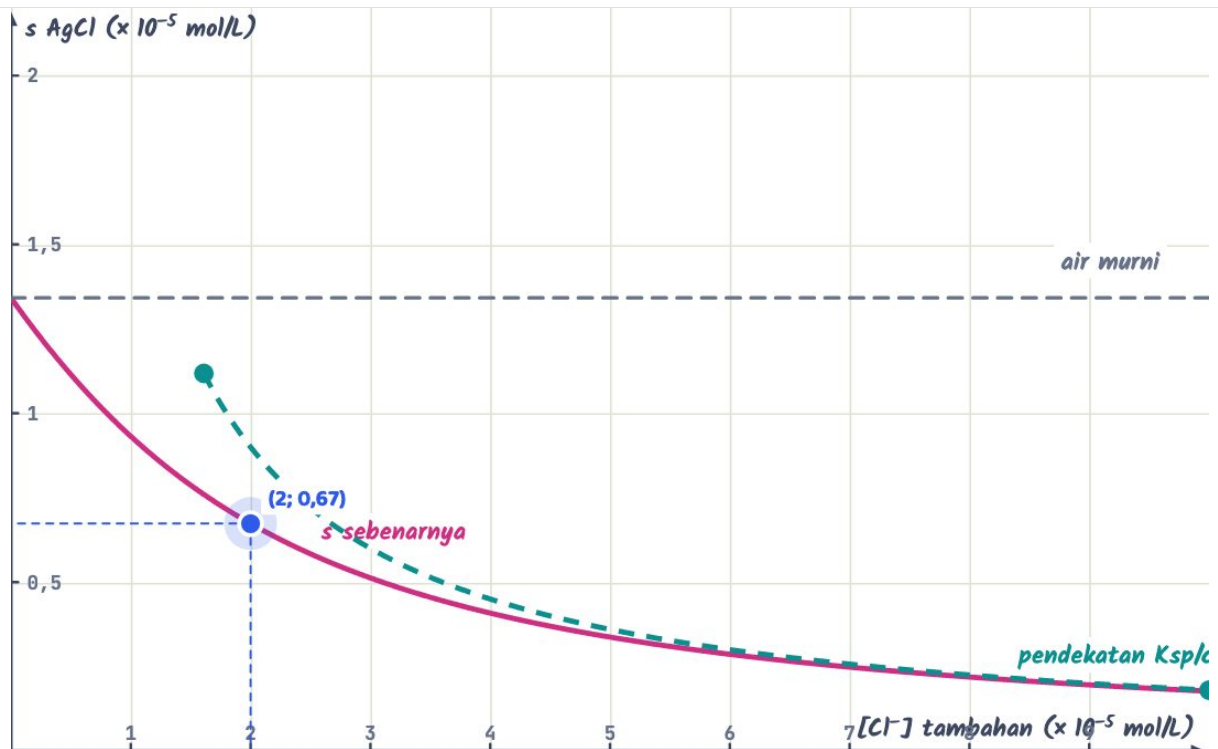
Untuk garam AB dalam larutan yang sudah berisi ion senama c mol/L: $K_{sp} = s(s + c)$. Bila c jauh lebih besar daripada s , maka $s + c \approx c$, sehingga

$$s \approx \frac{K_{sp}}{c} \quad (\text{AB}) \qquad s \approx \frac{K_{sp}}{c^2} \quad (\text{AB}_2 \text{ dengan ion senama B})$$

Contoh: dalam air murni AgCl larut $1,34 \times 10^{-5}$ M. Dalam NaCl 0,10 M, $s = 1,8 \times 10^{-10} / 0,10 = 1,8 \times 10^{-9}$ M, sekitar **7.400 kali lebih kecil**. Kimiawan analisis memanfaatkan ini: endapan dicuci dengan larutan yang mengandung ion senama supaya endapannya tidak ikut larut.

$$s = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 4K_{sp}}}{2}$$

$$[\text{Cl}^-]_{\text{tambahan}} = 2 \times 10^{-5} \text{ M} \Rightarrow s = 0,67 \times 10^{-5} \text{ M}$$



s (mol/L)

 $6,73 \times 10^{-6}$

dibanding air murni

50,2 %

galat pendekatan Ksp/c

33,7 %

Seret titik biru ke kanan untuk menambah ion Cl^- . Kurva magenta adalah kelarutan sebenarnya; garis putus-putus teal adalah pendekatan $s \approx K_{sp}/c$. Pada $[\text{Cl}^-]$ berapa keduanya mulai berimpit? Ubah K_{sp} : apakah polanya sama?

$$s = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 4K_{sp}}}{2} \approx \frac{K_{sp}}{c}$$

Ion senama yang sudah ada membuat larutan cepat jenuh. Bila c jauh lebih besar daripada s , kelarutan cukup dihitung K_{sp} dibagi c .

 K_{sp}

Hasil kali kelarutan

 c

Konsentrasi ion senama mol/L

 s

Kelarutan mol/L

KELARUTAN

 $1,8 \times 10^{-9}$

mol/L

c jauh di atas $\sqrt{K_{sp}}$: pendekatan $s \approx K_{sp}/c$ sangat baik

AgCl dalam NaCl 0,1 M: $s \approx 1,8 \times 10^{-9}$ M

Di air murni $s = 1,342 \times 10^{-5}$ M. Dengan ion senama 0,1 M, kelarutan menjadi $1,8 \times 10^{-9}$ M, turun **7.453,56** kali.

Cek satuan: mol/L ✓ (rumus kuadrat diubah ke bentuk yang stabil secara numerik)

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

COBA SENDIRI Ion senama mana yang lebih ampuh?

Hitung kelarutan Ag_2CrO_4 ($K_{sp} = 1,1 \times 10^{-12}$) dalam (a) AgNO_3 0,10 M dan (b) K_2CrO_4 0,10 M. Ion senama mana yang lebih menekan kelarutan? Mengapa?

- (a) $[\text{Ag}^+] = 0,10 + 2s \approx 0,10$; $K_{sp} = (0,10)^2 \cdot s \rightarrow s = 1,1 \times 10^{-12} / 0,010 = 1,1 \times 10^{-10}$ M.
- (b) $[\text{CrO}_4^{2-}] = 0,10 + s \approx 0,10$; $K_{sp} = (2s)^2(0,10) \rightarrow 4s^2 = 1,1 \times 10^{-11} \rightarrow s = 1,7 \times 10^{-6}$ M.
- Cek pendekatan: kedua nilai s jauh lebih kecil daripada 0,10, jadi sah.

Ion senama Ag^+ (a) menekan kelarutan ± 15.000 kali lebih kuat daripada CrO_4^{2-} (b), karena $[\text{Ag}^+]$ dikuadratkan di ungkapan K_{sp} . Ion yang pangkatnya besar adalah "tuas" yang paling ampuh.

**LANJUT • IB & OLIMPIADE****EFEK GARAM: KETIKA ION ASING JUSTRU MENAMBAH KELARUTAN**

Anehnya, menambahkan garam **tanpa** ion senama, misalnya KNO_3 , sedikit *menaikkan* kelarutan AgCl . Ion-ion asing mengerumuni Ag^+ dan Cl^- dengan "awan" muatan lawan sehingga keduanya kurang leluasa bergandengan. Secara termodinamika, K_{sp} sebenarnya ditulis dengan **aktivitas**, $K_{sp} = a_{\text{Ag}^+} a_{\text{Cl}^-} = \gamma_{\pm}^2 [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-]$, dengan koefisien aktivitas $\gamma_{\pm} < 1$ dalam larutan berkekuatan ion tinggi. Untuk larutan encer (yang kita pakai di sekolah), $\gamma \approx 1$ sehingga konsentrasi cukup akurat.

Pada ion senama yang sangat pekat, kelarutan bisa *naik* lagi karena terbentuk ion kompleks seperti $[\text{AgCl}_2]^-$. Jadi kurva "s turun terus" hanya berlaku pada rentang konsentrasi sedang.

28.5 pH, CO_2 , dan kelarutan: dari gigi sampai gua

Apa persamaan gigi, kapur, dan obat maag? Ketiganya garam yang **anionnya basa**: OH^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , atau F^- . Asam (ion H^+) "mencuri" anion itu dari larutan. Konsentrasinya turun, Q_{sp} turun di bawah K_{sp} , dan padatan terus larut untuk menggantikannya.

**ATURAN • pH DAN KELARUTAN**

Garam dengan anion basa lemah atau kuat (OH^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , F^- , S^{2-} , oksalat) **lebih larut dalam asam**. Garam dengan anion yang hampir tidak bersifat basa (Cl^- , Br^- , I^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) kelarutannya **hampir tidak dipengaruhi pH**.

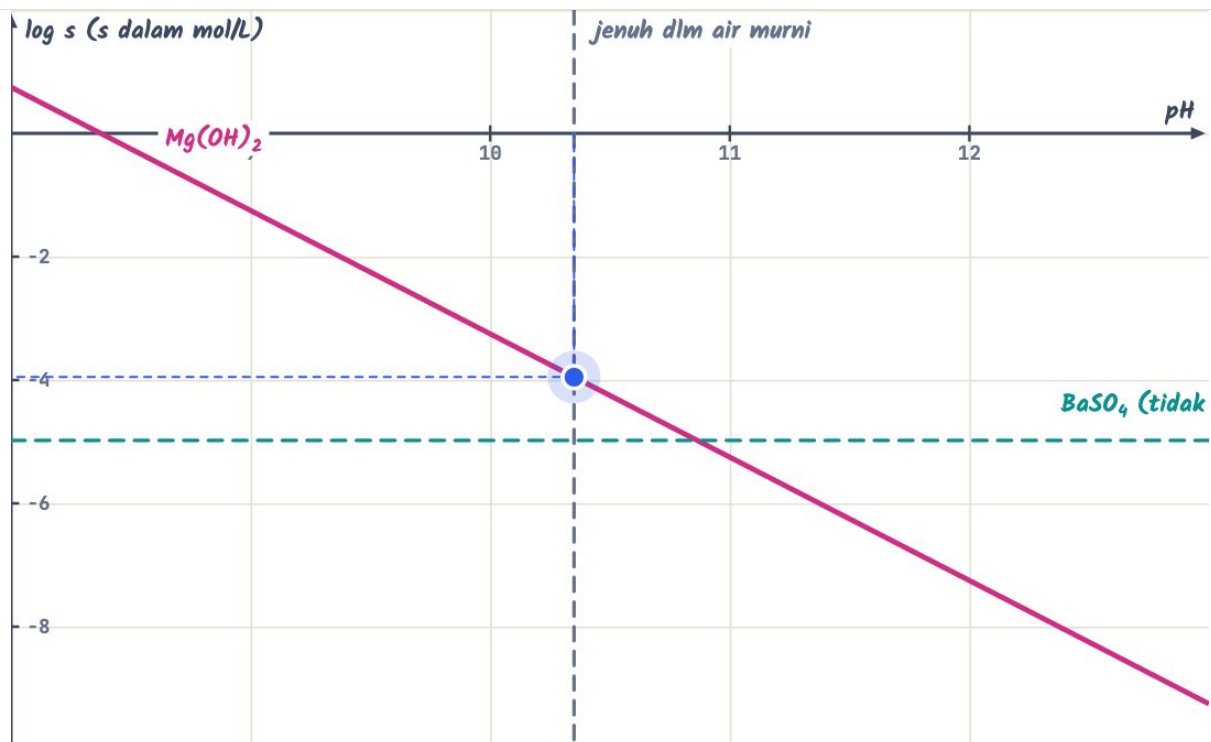
Contoh penting: BaSO_4 dipakai sebagai "bubur barium" untuk foto rontgen saluran cerna. Ion Ba^{2+} beracun, tetapi BaSO_4 begitu sukar larut dan tidak terpengaruh asam lambung, sehingga aman. Sebaliknya BaCO_3 **berbahaya** diminum: asam lambung melarutkannya dan melepaskan Ba^{2+} .

GRAFIK HIDUP pH menentukan nasib $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (dan tidak peduli pada BaSO_4)

GRAFIK HIDUP INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/CHEMIPEDIA#BAB-28

$$\log s = \log K_{sp} + 28 - 2 \text{ pH}$$

$$\text{pH} = 10,35 \Rightarrow s_{\text{Mg}(\text{OH})_2} = 10^{-3,95} \text{ M}$$



$s_{\text{Mg}(\text{OH})_2}$

$1,12 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$

$[\text{OH}^-]$

$2,24 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ larut

$0,01 \text{ g/L}$

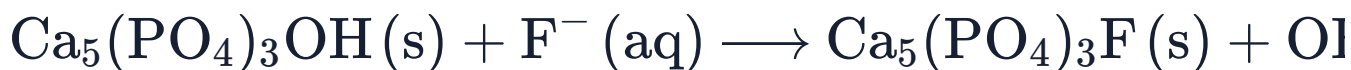
Turunkan pH satu satuan: kelarutan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ naik 100 kali (karena $[\text{OH}^-]$ dikuadratkan). Bandingkan dengan garis BaSO_4 yang datar. Di lambung ($\text{pH} \pm 2$), $\text{Mg}(\text{OH})_2$ larut habis sambil menetralkan asam.

Gigi: perang asam dan fluorida

Email gigi tersusun atas **hidroksiapatit**, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, garam yang sangat sukar larut. Setelah kita makan gula, bakteri di plak mengubahnya menjadi asam. Bila pH di permukaan gigi turun di bawah $\pm 5,5$, ion OH^- dan PO_4^{3-} "dicuri" oleh H^+ dan email perlahan larut (demineralisasi):



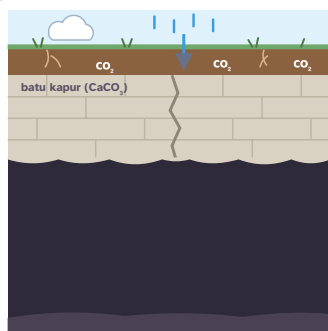
Ion fluorida dari pasta gigi menggantikan OH^- dan membentuk **fluorapatit**, yang lebih sukar larut dan anionnya (F^-) jauh lebih lemah sifat basanya. Fluorapatit baru mulai larut pada pH sekitar 4,5.



Gua kapur: CO_2 sebagai saklar

Air hujan yang meresap ke tanah menyerap CO_2 dan menjadi asam lemah. Air itu melarutkan batu kapur karena CO_3^{2-} diubah menjadi HCO_3^- . Saat air tiba di gua yang udaranya miskin CO_2 , reaksinya berbalik arah.



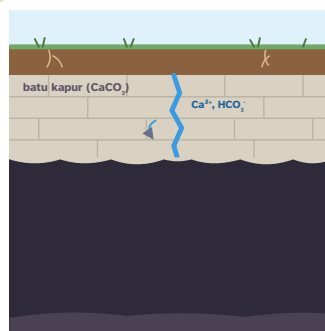


1 • Hujan menyerap CO₂

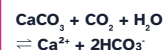


Udara di pori tanah kaya CO₂ dari akar dan mikroba, bisa puluhan kali udara biasa. Air yang meresap menjadi asam karbonat yang lemah.

Langkah 1. Air hujan meresap ke tanah. Akar tanaman dan mikroba membuat udara di pori tanah kaya CO₂, sehingga air menjadi asam karbonat yang lemah.

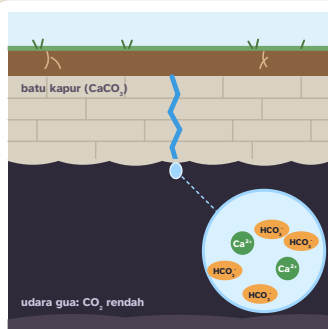


2 • Batu kapur larut



Asam mengubah CO₃²⁻ menjadi HCO₃⁻, jadi Q_{sp} CaCO₃ tetap di bawah K_{sp}: kapur terus larut. Celah melebar menjadi lorong gua.

Langkah 2. Air asam merembes lewat celah batu kapur. H⁺ dari asam karbonat mengubah CO₃²⁻ menjadi HCO₃⁻, jadi Q_{sp} CaCO₃ tetap di bawah K_{sp} dan batu kapur terus larut. Selama ribuan tahun celah melebar menjadi lorong gua.

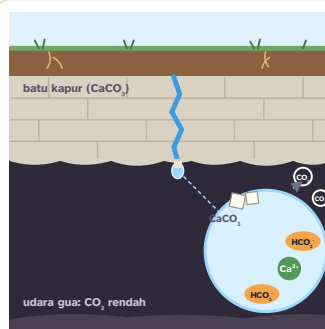


3 • Tetesan di atap gua

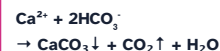
membawa Ca²⁺ + HCO₃⁻

Udara gua jauh lebih miskin CO₂ daripada udara tanah. Tetesan yang tiba di atap tidak lagi setimbang dengan udara di sekitarnya.

Langkah 3. Air yang kini kaya Ca²⁺ dan HCO₃⁻ menetes dari atap gua. Udara gua mengandung jauh lebih sedikit CO₂ daripada udara tanah.

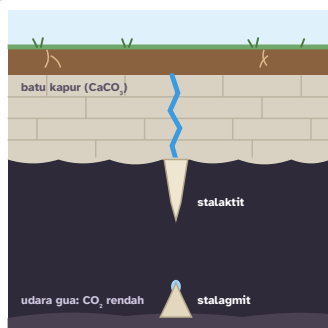


4 • CO₂ kabur, kapur muncul



CO₂ lepas dari tetesan. Kesetimbangan bergeser ke arah CaCO₃; [CO₃²⁻] naik, Q_{sp} > K_{sp}, cincin kapur mengendap di tepi tetesan.

Langkah 4. CO₂ lepas dari tetesan ke udara gua. Sesuai asas Le Chatelier, kesetimbangan bergeser ke arah pembentukan CaCO₃: Q_{sp} > K_{sp} dan cincin kapur halus mengendap di tepi tetesan.

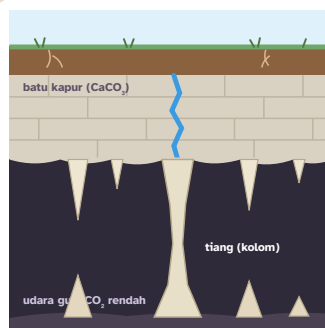


5 • Tumbuh dua arah

stalaktit ↓ stalagmit ↑

Cincin CaCO₃ memanjang jadi "pipa sedotan", lalu stalaktit. Tetesan yang jatuh melepas CO₂ lagi di lantai gua: stalagmit tumbuh ke atas.

Langkah 5. Cincin itu memanjang menjadi "pipa sedotan" lalu stalaktit yang menggantung. Tetesan yang jatuh ke lantai melepas CO₂ lagi, sehingga stalagmit tumbuh dari bawah.



6 • Ribuan tahun kemudian

±0,1 mm per tahun

Kira-kira 1 cm per abad, bergantung pada derasnya tetesan dan kadar CO₂. Akhirnya stalaktit dan stalagmit bertemu: tiang!

Langkah 6. Laju pertumbuhan rata-rata hanya sekitar 0,1 mm per tahun (sekitar 1 cm per abad), bisa lebih lambat atau lebih cepat. Setelah ribuan sampai puluhan ribu tahun, keduanya bertemu menjadi tiang (kolom).

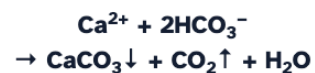
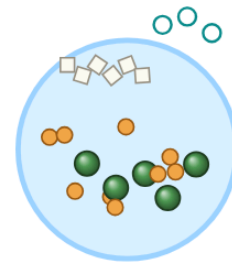


TRIK KAK TIRTA (DIBISIKKAN KIMO)

StalakTit itu Tergantung dari atap; stalagMit itu Mencuat dari lantai. Dan keduanya sama-sama CaCO₃ yang "terusir" dari air karena CO₂-nya kabur.



Di dalam setetes air



136 mg CaCO₃ per liter
bisa mengendap

599 tahun

≈ 6 abad • laju 10,6 mm/abad

Waktu berlalu

600 tahun

Panjang stalaktit

6,3 cm

Tinggi stalagmit

11,9 cm

Ca²⁺ dalam tetesan

80 mg/L

CaCO₃ yang bisa mengendap

136 mg/L

Laju stalaktit

10,6 mm/abad

Atur kadar CO₂ di tanah dan di udara gua, kecepatan tetesan, lalu tekan ► Jalankan. Satu detik di layar bisa berarti ratusan tahun! Apa yang terjadi bila udara gua sama kaya CO₂-nya dengan udara tanah? Mengapa gua yang ramai dikunjungi orang (napas manusia menambah CO₂) bisa memperlambat pertumbuhan stalaktit? Model ini disederhanakan: hanya sebagian kecil kapur terlarut yang benar-benar menempel di stalaktit.



KIMIA NUSANTARA • GUA GONG DAN KARST GUNUNG SEWU

Di selatan Jawa, dari Gunungkidul (DIY), Wonogiri, sampai Pacitan, terbentang **karst Gunung Sewu**: ribuan bukit kerucut batu kapur yang diakui UNESCO sebagai Global Geopark sejak 2015. Di bawahnya tersembunyi ratusan gua dan sungai bawah tanah. **Gua Gong** di Pacitan terkenal dengan stalaktit dan stalagmit raksasa; konon namanya berasal dari bunyi mirip gong saat batuannya diketuk. Setiap ornamen di sana adalah catatan ribuan tahun pertarungan antara Q_{sp} dan K_{sp} . Karena tumbuhnya sangat lambat, menyentuh atau mematahkannya berarti merusak karya alam yang tidak tergantikan dalam umur manusia.

Air sadah dan kerak teko

Air sumur di daerah kapur seperti Gunungkidul mengandung banyak Ca²⁺ dan HCO₃⁻. Air semacam ini disebut **air sadah**. Saat direbus, CO₂ terusir dari air panas (dan kelarutan CaCO₃ pun turun), sehingga terjadi "stalaktit

mini" di dasar teko:



Cara membersihkannya memakai prinsip pH: rendam kerak dengan cuka atau air jeruk nipis. Asam mengubah karbonat menjadi CO_2 , sehingga kerak larut sambil berbuih halus:



LANJUT • IB & OLIMPIADE

BERAPA BANYAK KAPUR YANG DIBAWA AIR GUA?

Gabungkan empat kesetimbangan: K_{sp} kalsit, hukum Henry untuk CO_2 (K_H), serta K_{a1} dan K_{a2} asam karbonat. Hasilnya satu reaksi total:



Karena $[\text{HCO}_3^-] \approx 2[\text{Ca}^{2+}]$, maka $K = \frac{4[\text{Ca}^{2+}]^3}{p_{\text{CO}_2}}$, sehingga $[\text{Ca}^{2+}] = \sqrt[3]{K p_{\text{CO}_2}/4}$. Untuk udara biasa ($p_{\text{CO}_2} \approx 0,0004 \text{ atm}$), $[\text{Ca}^{2+}] \approx 4,7 \times 10^{-4} \text{ M}$. Untuk udara tanah dengan 3% CO_2 (0,03 atm), $[\text{Ca}^{2+}] \approx 2,0 \times 10^{-3} \text{ M}$, sekitar 80 mg Ca per liter. Selisih itulah yang "dijatuhkan" air di dalam gua. Lab Mini **Gua Waktu** memakai persamaan ini.



KESELAMATAN • AIR KAPUR



Merusak mata



Iritasi kulit

Air kapur sirih (larutan jenuh $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ber-pH sekitar 12,4. Cipratannya bisa merusak mata. Pakai kacamata pelindung, hembuskan napas pelan lewat sedotan dan **jangan pernah menyedot**, jangan diminum, dan bilas kulit atau mata yang terkena dengan air mengalir selama 15 menit.

Hal serupa terjadi di tubuh. Batu ginjal yang paling umum tersusun atas **kalsium oksalat**, CaC_2O_4 (K_{sp} sekitar $2,3 \times 10^{-9}$). Bila urine terlalu pekat, $Q_{sp} = [\text{Ca}^{2+}][\text{C}_2\text{O}_4^{2-}]$ melampaui K_{sp} dan kristal mulai tumbuh. Itulah sebabnya dokter biasanya menganjurkan cukup minum air putih: urine yang lebih encer menjaga Q_{sp} tetap di bawah K_{sp} .

Lanjut: pengendapan selektif, uji ion, dan ion kompleks

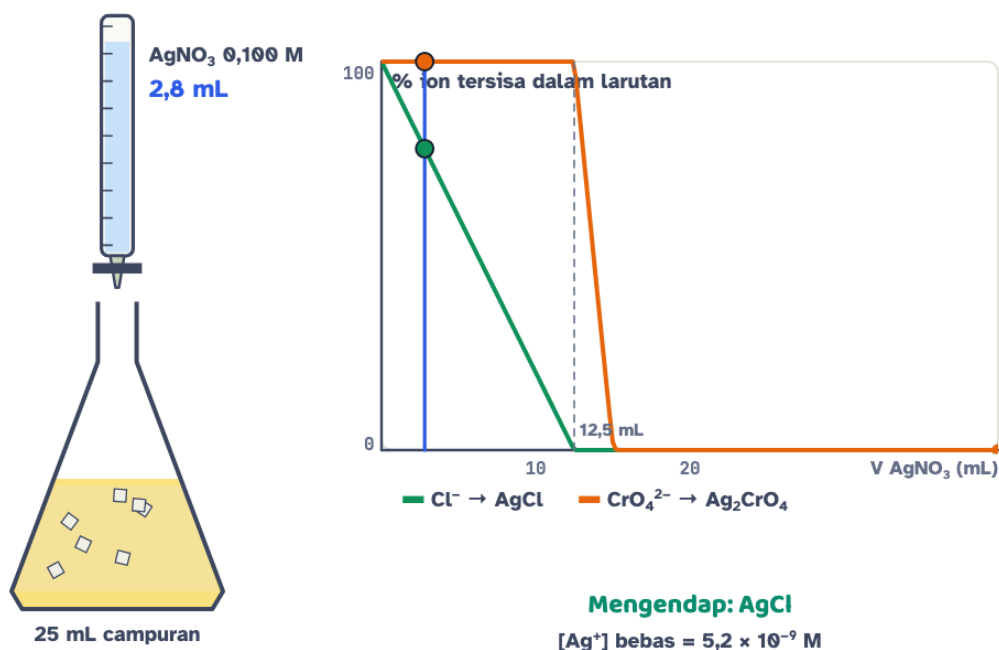
Bayangkan larutan yang berisi dua anion, misalnya Cl^- dan CrO_4^{2-} . Bila perak nitrat diteteskan sedikit demi sedikit, siapa yang mengendap lebih dulu? Jawabannya: garam yang membutuhkan $[\text{Ag}^+]$ **paling kecil** untuk mencapai K_{sp} -nya. Teknik memisahkan ion dengan cara ini disebut **pengendapan selektif**.

COBA SENDIRI **Rahasia titrasi Mohr**

Larutan berisi Cl^- 0,010 M dan CrO_4^{2-} 0,010 M. Larutan AgNO_3 ditambahkan tetes demi tetes (abaikan perubahan volume). (a) Endapan mana yang terbentuk lebih dulu? (b) Berapa persen Cl^- yang sudah mengendap ketika Ag_2CrO_4 merah bata mulai muncul? ($K_{sp} \text{ AgCl} = 1,8 \times 10^{-10}$; $\text{Ag}_2\text{CrO}_4 = 1,1 \times 10^{-12}$)

- 1 $[\text{Ag}^+]$ agar AgCl mulai mengendap: $1,8 \times 10^{-10} / 0,010 = 1,8 \times 10^{-8} \text{ M}$.
- 2 $[\text{Ag}^+]$ agar Ag_2CrO_4 mulai mengendap: $\sqrt{1,1 \times 10^{-12} / 0,010} = 1,05 \times 10^{-5} \text{ M}$.
- 3 (a) AgCl butuh $[\text{Ag}^+]$ ± 580 kali lebih kecil, jadi **AgCl putih mengendap lebih dulu**, walaupun K_{sp} -nya lebih besar!
- 4 (b) Saat $[\text{Ag}^+] = 1,05 \times 10^{-5} \text{ M}$, sisa $[\text{Cl}^-] = 1,8 \times 10^{-10} / 1,05 \times 10^{-5} = 1,7 \times 10^{-5} \text{ M}$, yaitu 0,17% dari semula.

Ketika warna merah bata muncul, 99,8% Cl^- sudah mengendap. Itulah dasar titrasi Mohr untuk menentukan kadar garam (misalnya kadar NaCl dalam garam krosok atau air laut): ion kromat menjadi indikator titik akhir.

[Ag^+] bebas $5,16 \times 10^{-9} \text{ M}$ $\text{pAg} = -\log[\text{Ag}^+]$

8,29

Ion tersisa

 Cl^- 77,6% • CrO_4^{2-} 100%

Endapan (mmol)

 AgCl 0,28 • Ag_2CrO_4 0

Tambahkan larutan AgNO_3 0,100 M dari buret ke 25 mL campuran anion. Perhatikan grafik "% ion tersisa": ion mana yang habis lebih dulu? Pada campuran Mohr, kapan warna merah bata muncul? Pada campuran tiga halida, berapa mL untuk setiap "anak tangga"? Kromat berbahaya bagi kesehatan, jadi titrasi Mohr nyata hanya dikerjakan dengan pengawasan guru.

Pengendapan juga menjadi "detektor" ion logam. Natrium hidroksida dan amonia mengendapkan hidroksida logam dengan warna khas. Bila pereaksi ditambahkan **berlebih**, beberapa endapan larut kembali, karena terbentuk ion kompleks atau karena hidroksidanya amfoter.

Ion logam	+ NaOH sedikit	+ NaOH berlebih	+ NH_3 berlebih
Al^{3+}	endapan putih $\text{Al}(\text{OH})_3$	larut: $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$	endapan putih tetap
Zn^{2+}	endapan putih $\text{Zn}(\text{OH})_2$	larut: $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$	larut: $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$
Ca^{2+}	endapan putih (sedikit)	tetap	tidak ada / sangat sedikit

Cu^{2+}	endapan biru muda $\text{Cu}(\text{OH})_2$	tetap	larut, biru tua: $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$
Fe^{2+}	endapan hijau $\text{Fe}(\text{OH})_2$	tetap	endapan hijau tetap
Fe^{3+}	endapan coklat kemerahan $\text{Fe}(\text{OH})_3$	tetap	endapan coklat tetap

Ion kompleks juga bisa melarutkan endapan "keras kepala". Endapan AgCl larut dalam amonia encer karena Ag^+ dirangkul dua molekul NH_3 menjadi $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$. Konsentrasi Ag^+ bebas anjlok, Q_{sp} turun di bawah K_{sp} , dan endapan terus larut.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MENGHITUNG KELARUTAN AgCl DALAM AMONIA

Jumlahkan dua kesetimbangan; tetapan reaksi totalnya adalah hasil kali kedua tetapan:



Dalam NH_3 1,0 M: $\frac{s^2}{(1,0 - 2s)^2} = 2,9 \times 10^{-3} \rightarrow \frac{s}{1,0 - 2s} = 0,054 \rightarrow s = 0,048$ M. Itu ± 3.600 kali lebih larut daripada di air murni! Untuk AgI ($K_{sp} = 8,5 \times 10^{-17}$), cara yang sama memberi $s \approx 3,7 \times 10^{-5}$ M saja. Maka amonia encer dipakai untuk membedakan endapan AgCl (larut) dari AgI (tidak larut).



TAMU DARI MASA LALU • FOTO YANG TIDAK MEMUDAR

Foto-foto pertama di abad ke-19 terus menghitam bila terkena cahaya, karena sisa garam perak di kertas tetap peka cahaya. Pada 1819 **John Herschel** menemukan bahwa natrium tiosulfat ("hipo") melarutkan garam perak halida dengan membentuk ion kompleks $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$. Sejak 1839 "hipo" dipakai sebagai *fixer* untuk mengawetkan foto, dan terus dipakai di kamar gelap selama lebih dari 150 tahun.

Kimia di sekitarmu



Kerak teko & air sadah

Air sumur di daerah kapur seperti Gunungkidul dan Tuban kaya Ca^{2+} dan HCO_3^- . Saat direbus, CaCO_3 mengendap menjadi kerak. Cuka atau air jeruk nipis melarutkannya kembali.



Pasta gigi berfluorida

Fluorida (sekitar 1.000–1.500 ppm) mengubah sebagian hidroksiapatit email menjadi fluorapatit yang lebih tahan asam dari sisa makanan manis.



"Bubur barium" rontgen

BaSO_4 sangat sukar larut dan tidak terpengaruh asam lambung, sehingga aman diminum untuk memotret saluran cerna, walaupun ion Ba^{2+} bebas beracun.



Garam beryodium

Garam konsumsi diperkaya kalium iodat, KIO_3 , yang cukup larut untuk disemprotkan merata dan lebih stabil daripada KI di udara tropis yang panas dan lembap.



Batu ginjal

Kalsium oksalat mengkristal bila urine terlalu pekat ($Q_{sp} > K_{sp}$). Cukup minum air membantu menjaga ion-ionnya tetap terlarut.



Sabun susah berbusa

Di air sadah, ion Ca^{2+} mengendapkan anion sabun menjadi "daki sabun" lengket. Busanya sedikit dan cucian terasa kusam.



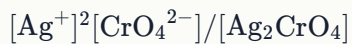
Limbah logam berat

Industri pelapisan logam menaikkan pH limbahnya sehingga ion seperti Cu^{2+} , Ni^{2+} , dan Cr^{3+} mengendap sebagai hidroksida yang bisa disaring sebelum air dibuang.



Cek Cepat

Ungkapkan K_{sp} yang benar untuk Ag_2CrO_4 adalah ...



Saat dua larutan dicampur, ternyata $Q_{sp} > K_{sp}$. Artinya ...

larutan belum jenuh

larutan tepat jenuh

endapan terbentuk sampai $Q_{sp} = K_{sp}$

garam menjadi lebih mudah larut

Ke dalam larutan jenuh CaF_2 ditambahkan NaF padat. Apa yang terjadi?

Kelarutan CaF_2 turun dan endapannya bertambah

K_{sp} CaF_2 turun

K_{sp} CaF_2 naik

Tidak ada pengaruh karena NaF mudah larut

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. C • 3. A



Tantangan Rumah: kerak, cangkang telur, dan cuka

Bahan: 2 potong cangkang telur bersih (atau sedikit kerak teko), cuka dapur, air, 2 gelas bening, sendok, senter HP, spidol.

1. Isi gelas A dengan cuka dan gelas B dengan air, masing-masing setinggi 3 cm. Beri label.
2. Masukkan sepotong cangkang telur (atau kerak teko) ke setiap gelas. Amati permukaannya dengan senter HP selama 2 menit.
3. Biarkan semalam. Esoknya, bandingkan ukuran, kekerasan, dan warna kedua potongan.
4. Catat semua pengamatan dalam tabel, lalu foto hasilnya.

Keselamatan: kerjakan bersama orang dewasa. Cuka bisa perih di mata dan luka, jadi jauhkan dari wajah. Jangan pernah mencampur cuka dengan pemutih pakaian atau pembersih lain. Jangan mencicipi larutan. Buang cairan ke wastafel sambil dialiri air, dan cuci tangan sesudahnya.

Pertanyaan: Dari mana gelembung kecil di gelas cuka? Mengapa cangkang di dalam air tidak berubah, padahal CaCO_3 juga "sedikit larut" dalam air? Hubungkan dengan cara membersihkan kerak teko dan dengan aturan "garam beranion basa lebih larut dalam asam".



RINGKASAN KILAT

Bab 28 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **kelarutan** serta larutan tak jenuh, jenuh, dan lewat jenuh pada tingkat partikel
- menulis ungkapan **hasil kali kelarutan** (K_{sp}) dan menghitung kelarutan s dari K_{sp} untuk garam AB, AB_2 , A_2B , AB_3 , dan A_2B_3
- memprediksi **terbentuknya endapan** dengan membandingkan Q_{sp} dan K_{sp} , lalu menulis persamaan ion bersihnya
- menjelaskan pengaruh **ion senama** dan **pH** terhadap kelarutan, dari gigi berlubang sampai stalaktit
- merancang **pengendapan selektif** dan menjelaskan larutnya endapan karena pembentukan **ion kompleks**



Istilah kunci

Kelarutan

kelarutan molar

Larutan tak jenuh

Larutan jenuh

Larutan lewat jenuh

aturan kelarutan

hasil kali kelarutan

endapan

hasil kali ion

persamaan ion bersih

ion penonton

efek ion senama

air sadah

pengendapan selektif



Rumus penting

$$K_{sp} = x^x y^y s^{x+y}$$

Ksp dari kelarutan (garam A_xB_y). Setiap mol garam yang larut melepas x mol kation dan y mol anion. Kalikan konsentrasi keduanya, masing-masing dipangkatkan koefisiennya.

$$s = \sqrt[3]{\frac{K_{sp}}{4}}$$

Kelarutan garam AB_2 dari Ksp. Untuk garam yang melepas satu ion dan dua ion pasangannya, $K_{sp} = s \times (2s)^2 = 4s^3$. Bagi Ksp dengan 4, lalu tarik akar pangkat tiga.

$$Q_{sp} = \frac{c_1 V_1}{V_1 + V_2} \times \frac{c_2 V_2}{V_1 + V_2}$$

Qsp setelah dua larutan dicampur ($AgNO_3 + NaCl$). Encerkan dulu setiap ion dengan volume total, baru kalikan. Jika hasilnya melewati Ksp AgCl ($1,8 \times 10^{-10}$), endapan putih muncul.

$$s = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 4K_{sp}}}{2} \approx \frac{K_{sp}}{c}$$

Kelarutan garam AB bila ada ion senama. Ion senama yang sudah ada membuat larutan cepat jenuh. Bila c jauh lebih besar daripada s , kelarutan cukup dihitung Ksp dibagi c .

⚠ Jangan sampai terjebak

- Membandingkan K_{sp} untuk menentukan mana yang lebih larut hanya sah bila tipe rumusnya sama (AB dengan AB , AB_2 dengan AB_2).
- Saat dua larutan dicampur, volumenya bertambah, jadi setiap ion terencerkan.
- Merusak mata Iritasi kulit Air kapur sirih (larutan jenuh $Ca(OH)_2$) ber-pH sekitar 12,4.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/chemipedia#soal?bab=28

🧩 Teka-teki untuk Bab 29

Apel yang dipotong menjadi cokelat, paku berkarat, dan kembang api yang menyala: tiga peristiwa, satu tema. Di ketiganya ada sesuatu yang "dicuri" dari satu zat oleh zat lain. Apa yang dicuri?

▼ Intip petunjuk

Yang dicuri adalah **elektron**. Oksigen dan zat lain yang "rakus" mengambil elektron dari besi, dari zat dalam buah, atau dari logam di kembang api. Peristiwa serah-terima elektron ini disebut reaksi **redoks**. Bahkan garam beryodium bisa diuji dengan reaksi redoks: iodat mengubah iodida menjadi iodin yang membirukan kanji. Sampai jumpa di Bab 29!