



Physicspedia

BUKU • JILID 3 • BAB 25–35

Physicspedia

Fisika Itu Asyik!

Buku fisika 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/physicspedia

Tentang buku ini

Ini adalah Jilid 3 dari versi cetak Physicspedia. Bagian yang di layar dapat digeser dan dimainkan (Rumus Hidup, Lab Mini, animasi langkah) ditampilkan sebagai gambar, sedangkan latihan lengkap ada di PDF Bank Soal dan LKPD.

Physicspedia • Fisika 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, Lab Mini, dan latihan berskor: aurumgen.my.id/physicspedia

Daftar isi

BAGIAN E • LISTRIK & MAGNET

25	Induksi Elektromagnetik	4
26	Arus Bolak-balik	29
27	Gelombang Elektromagnetik	53

BAGIAN F • FISIKA MODERN

28	Kuantum: Foton & Gelombang Materi	75
29	Model Atom & Spektrum	96
30	Relativitas Khusus	118
31	Inti Atom & Radioaktivitas	139
32	Elektronika & Gerbang Logika	161

BAGIAN G • FISIKA UNTUK INDONESIA & SEMESTA

33	Fisika Bumi & Bencana	186
34	Energi Terbarukan & Perubahan Iklim	211
35	Astrofisika & Alam Semesta	238

LAMPIRAN

Peta Rumus: semua Rumus Hidup	267
Penutup, glosarium & panduan guru	285

25 Induksi Elektromagnetik: Menyulap Gerak Menjadi Listrik

Senter goyang menyala tanpa baterai. Kincir raksasa di Sidrap menerangi ribuan rumah. Kompor induksi memasak tanpa api. Rahasia ketiganya sama: medan magnet yang berubah.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **fluks magnet** $\Phi = BA \cos \theta$ dan menjelaskan kapan fluks berubah;
- memakai **hukum Faraday** $\varepsilon = -N \Delta\Phi / \Delta t$ dan **hukum Lenz** untuk besar dan arah arus induksi;
- menghitung **GGL gerak** $\varepsilon = B\ell v$ dan GGL maksimum **generator** $\varepsilon_{\text{maks}} = NBA\omega$;
- memakai persamaan **transformator** dan menjelaskan mengapa listrik dikirim dengan **tegangan tinggi**;
- menjelaskan **induktansi** dan teknologi induksi di sekitarmu: kompor induksi, kartu uang elektronik, pengisian nirkabel.

SENER GOYANG

KOMIK • 4 PANEL

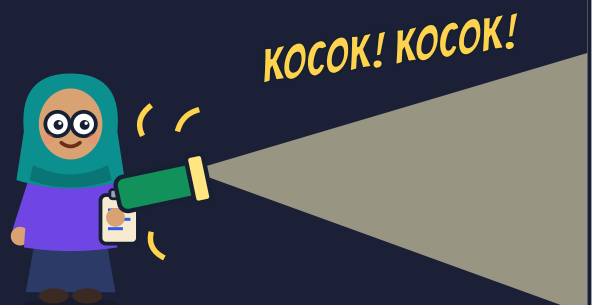
Pukul 20.00, listrik padam

RAKA

Yah, mati lampu! Baterai senterku juga habis...

**SARI**

Tenang, aku punya senter goyang. Nggak pakai baterai!

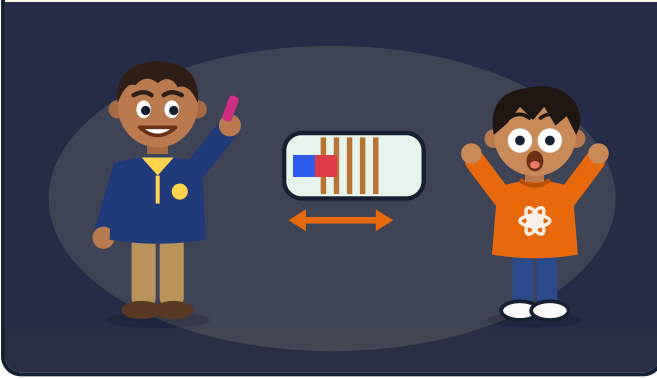


RAKA

Kok bisa nyala?! Listriknya dari mana?

KAK NARA

Dari ototmu! Di dalamnya ada magnet yang meluncur bolak-balik melewati kumparan kawat.



KAK NARA

Faraday menemukannya tahun 1831. Prinsip yang sama menyalakan PLTA dan kincir angin raksasa di Sidrap!

TARSI

Jadi listrik di rumah juga hasil "goyangan" magnet raksasa?



25.1

Fluks magnet: berapa banyak medan yang "menembus"

Bayangkan hujan turun tegak lurus, dan kamu memegang bingkai jendela. Berapa banyak air hujan yang lewat bingkai? Bergantung pada **derasnya hujan**, **luas bingkai**, dan **kemiringan bingkai**. Jika bingkai dipegang mendatar, banyak air yang lewat. Jika bingkai dipegang tegak, hampir tidak ada air yang lewat.

Medan magnet yang menembus sebuah bidang dihitung dengan cara yang sama. Besaran ini disebut **fluks magnet** Φ (phi), dengan satuan **weber** (Wb):

$$\Phi = B A \cos \theta$$

Fluks = kuat medan $\times$ luas bidang $\times$ cos sudut antara medan dan garis normal bidang.
Bidang tegak lurus medan menangkap fluks paling banyak.

 B

Kuat medan magnet T

 A Luas bidang kumparan cm^2 θ Sudut medan terhadap garis normal $^\circ$ Φ

Fluks magnet mWb

FLUKS MAGNET

2

mWb

Medan **0,2 T** yang menembus bidang **100 cm^2** dengan sudut **0 $^\circ$** menghasilkan fluks **2 mWb**. Putar bidangnya ke 90 $^\circ$: fluksnya hilang!

Cek satuan: $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$. Jadi tesla bisa juga ditulis Wb/m^2 , artinya "fluks per luas".

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-INDUKSI-FLUKS](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-INDUKSI-FLUKS)

Bahasa sederhana • Gampangnya: fluks magnet adalah **banyaknya garis medan magnet yang menembus sebuah lingkaran kawat**. Makin banyak garis yang lewat, makin besar fluksnya.



Tebak Dulu!

Magnet yang sangat kuat diletakkan diam di dalam kumparan yang tersambung ke galvanometer (pengukur arus yang sangat peka). Jarum galvanometer akan...

menyimpang jauh dan tetap menyimpang selama magnet ada di dalam.

menunjuk nol, karena tidak ada arus.

bergetar terus-menerus.

menyimpang makin lama makin jauh.

Nol! Magnet sekuat apa pun tidak menghasilkan arus jika diam. Yang diperlukan adalah **perubahan** fluks. Faraday sendiri sempat bertahun-tahun gagal karena memakai magnet yang diam. Jarum baru bergerak tepat ketika magnet dimasukkan atau dikeluarkan.

Pada 29 Agustus 1831, Michael Faraday menemukan bahwa **arus listrik muncul di kumparan setiap kali fluks magnet yang melingkupinya berubah**. Arus ini disebut **arus induksi**, dan "dorongan" yang menghasilkannya disebut **GGL induksi**. Makin cepat perubahannya dan makin banyak lilitannya, makin besar GGL-nya:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

GGL induksi = jumlah lilitan $\times$ laju perubahan fluks. Tanda minus adalah hukum Lenz: arus induksi melawan perubahan.

N Jumlah lilitan lilitan

$\Delta\Phi$ Perubahan fluks mWb

Δt Selang waktu s

$|\varepsilon|$ Besar GGL induksi V

BESAR GGL INDUKSI

0,8

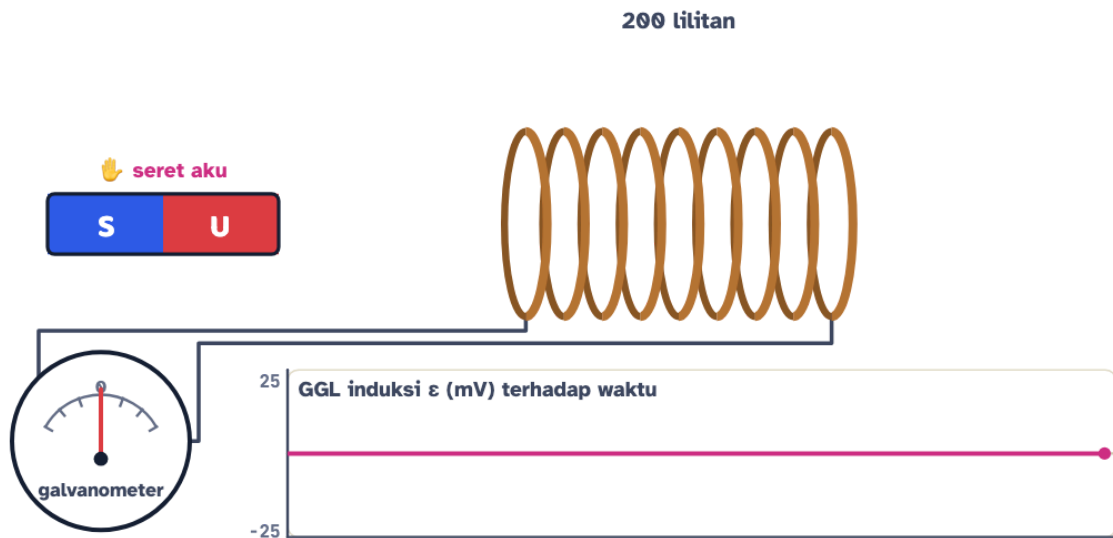
V

Fluks berubah **2** mWb dalam **0,5** s pada kumparan **200** lilitan, sehingga GGL-nya **0,8** V. Gerakkan magnet dua kali lebih cepat, GGL-nya juga dua kali lipat.

Cek satuan: $\frac{\text{Wb}}{\text{s}} = \frac{\text{T m}^2}{\text{s}} = \text{V}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-INDUKSI-FARADAY](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-induksi-faraday)

Fluks $\Phi = BA \cos \theta$ bisa diubah dengan tiga cara: mengubah **kuat medan** B (menggerakkan magnet mendekat atau menjauh), mengubah **luas** A (menarik atau mengempiskan simpal kawat), atau mengubah **sudut** θ (memutar kumparan, seperti di generator).



GGL induksi
0 mV

Fluks total $N\Phi$
0,033 mWb

Kumparan
fluks tetap: tidak ada arus

Seret magnet masuk dan keluar kumparan. Kapan jarum menyimpang ke kanan, kapan ke kiri, dan kapan diam? Coba gerakkan cepat lalu pelan, tambah lilitan, atau balik magnetnya. Tombol  **Gerak otomatis** menggerakkan magnet bolak-balik seperti di dalam senter goyang.



TAMU DARI MASA LALU

Michael Faraday (1791–1867) lahir dari keluarga pandai besi yang miskin di London. Ia hanya sempat sekolah dasar, lalu bekerja sebagai tukang jilid buku dan membaca buku-buku yang dijilidnya. Ia melamar menjadi asisten Humphry Davy dengan membawa catatan kuliah yang ditulis rapi. Faraday hampir tidak memakai matematika, tetapi gambaran "garis gaya"-nya kemudian dirumuskan secara matematis oleh James Clerk Maxwell. Hampir seluruh listrik di dunia kini dibangkitkan dengan prinsip yang ia temukan. Di Amerika, Joseph Henry menemukan gejala serupa pada waktu yang hampir bersamaan.

CONTOH Magnet dimasukkan ke kumparan

Fluks magnet di dalam kumparan 500 lilitan bertambah dari 0 menjadi 0,6 mWb dalam 0,2 s saat magnet dimasukkan. Berapa besar GGL induksinya?

1 $\Delta\Phi = 0,6 \text{ mWb} = 6 \times 10^{-4} \text{ Wb}.$

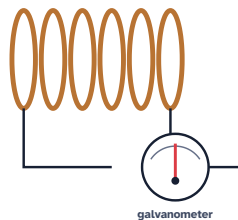
2 $|\varepsilon| = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 500 \times \frac{6 \times 10^{-4}}{0,2} = 1,5 \text{ V}.$

GGL-nya 1,5 V, setara satu baterai senter. Namun GGL ini hanya ada selama magnet bergerak.

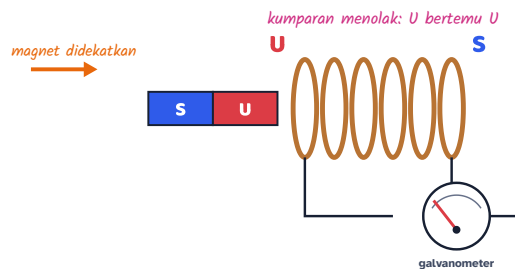
25.3 Hukum Lenz: alam tidak memberi listrik gratis

Hukum Lenz. Arah arus induksi selalu sedemikian rupa sehingga medan magnet yang dihasilkannya **melawan perubahan fluks** penyebabnya.

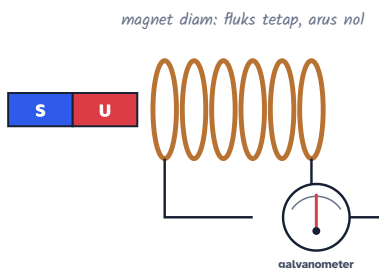
Saat kutub U magnet didekatkan, kumparan "membela diri" dengan membuat kutub U juga di ujung yang menghadap magnet, sehingga magnet **ditolak**. Saat magnet dijauhkan, kumparan membuat kutub S untuk **menahan** magnet pergi. Ikuti animasinya:



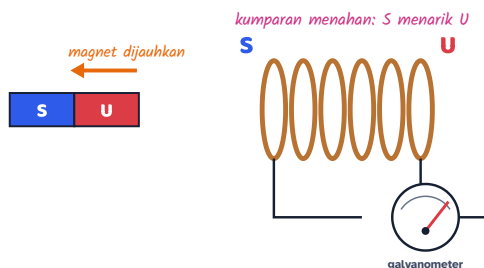
Langkah 1. Magnet diam jauh dari kumparan. Fluks di dalam kumparan tidak berubah, jadi jarum galvanometer menunjuk nol.



Langkah 2. Kutub U didekatkan: fluks bertambah. Arus induksi membuat ujung kiri kumparan menjadi kutub **U** yang **menolak** magnet. Jarum menyimpang ke satu arah.

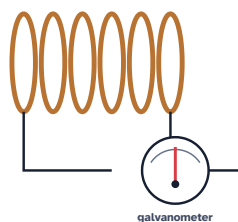


Langkah 3. Magnet berhenti: fluks tetap, arus induksi hilang, jarum kembali ke nol.



Langkah 4. Magnet ditarik menjauh: fluks berkurang. Kini ujung kiri kumparan menjadi kutub **S** yang **menarik** magnet, seolah menahannya pergi. Jarum menyimpang ke arah sebaliknya.

Kamu harus mendorong atau menarik melawan gaya ini. Usahamu = energi listriknya.



Langkah 5. Kumparan selalu melawan perubahan. Karena itu kamu harus mengerahkan usaha untuk menggerakkan magnet, dan usaha itulah yang berubah menjadi energi listrik. Inilah **kekekalan energi**.



TRIK KAK NARA: "LENZ SI PENJAGA STATUS QUO"

Bayangkan kumparan itu orang yang **tidak suka perubahan**. Magnet **didekatkan**? Kumparan membuat kutub yang **sama** untuk menolaknya ("jangan mendekat!"). Magnet **dijauhkan**? Kumparan membuat kutub **berlawanan** untuk menariknya ("jangan pergi!"). Setelah kutubnya ketemu, pakai **aturan genggam tangan kanan**: ibu jari menunjuk kutub utara kumparan, empat jari yang menggenggam menunjukkan arah arus induksi. Tiga detik, beres!



AWAS JEBAKAN: LENZ MELAWAN PERUBAHAN, BUKAN MELAWAN MEDAN

Arus induksi **tidak** selalu membuat medan yang berlawanan arah dengan medan magnet. Ia melawan **perubahan**-nya. Jika fluks bertambah, medan induksi berlawanan arah dengan medan magnet. Jika fluks **berkurang**, medan induksi justru **searah**, untuk "menambal" fluks yang hilang.



Tebak Dulu!

Magnet neodimium kecil dijatuhkan ke dalam pipa tembaga yang berdiri tegak. Tembaga tidak ditarik magnet. Dibandingkan jatuh di dalam pipa plastik, magnet itu...

jatuh sama cepat, karena tembaga tidak bersifat magnet.

jatuh jauh lebih lambat.

menempel di dinding pipa dan berhenti.

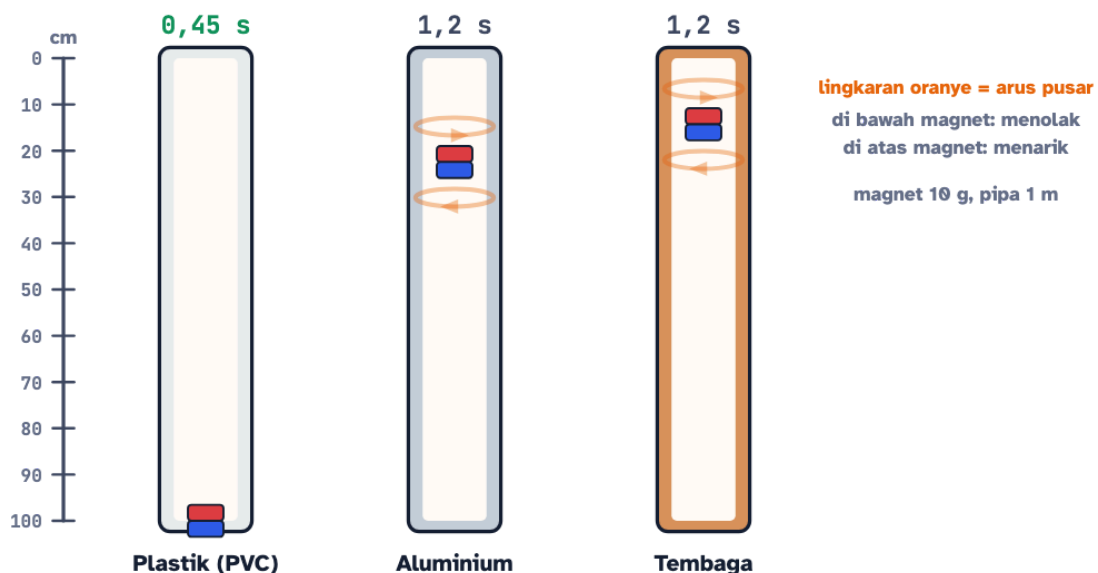
jatuh lebih cepat, karena didorong ke bawah oleh pipa.

Jauh lebih lambat, seperti jatuh di dalam madu! Saat magnet jatuh, fluks di setiap "cincin" dinding pipa berubah, sehingga muncul arus melingkar yang disebut **arus pusar** (eddy current). Menurut hukum Lenz, arus di bawah magnet menolaknya dan arus di atasnya menariknya. Keduanya menahan gerak jatuh. Energi potensial magnet berubah menjadi kalor di dinding pipa.

LAB MINI

Lomba jatuh: pipa plastik, aluminium, dan tembaga

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-25



Plastik

0,45 s

Aluminium

1,2 s...

Tembaga

1,2 s...

Kecepatan terminal (tembaga)

0,12 m/s

Tekan ► **Jalankan** untuk menjatuhkan tiga magnet sekaligus ke pipa sepanjang 1 m. Ubah tebal dinding pipa dan kekuatan magnet. Mengapa pipa tembaga paling "kental"? (Petunjuk: tembaga menghantarkan listrik lebih baik daripada aluminium.)



Rem magnetik

Beberapa wahana jatuh bebas dan kereta memakai rem arus pusar: sirip logam melewati magnet kuat, lalu arus pusar memperlambatnya tanpa gesekan dan tanpa aus.



Peredam jarum timbangan

Keping aluminium yang bergerak di antara magnet membuat jarum timbangan dan meteran analog cepat berhenti bergoyang.



Detektor logam bandara

Kumparan memancarkan medan yang berubah. Benda logam di sakumu menimbulkan arus pusar yang medannya terdeteksi kembali oleh alat.



Gitar listrik

Senar baja yang bergetar di atas magnet kecil mengubah fluks di kumparan *pickup*, sehingga muncul GGL yang naik-turun mengikuti nada.

25.4

GGL gerak: kawat yang meluncur dalam medan

Bayangkan batang logam sepanjang ℓ yang meluncur dengan kecepatan v di atas dua rel, di dalam medan magnet B yang tegak lurus. Setiap detik luas rangkaian bertambah ℓv , sehingga fluksnya bertambah $B\ell v$ per detik. Dari hukum Faraday:

$$\varepsilon = B \ell v$$

GGL = kuat medan $\times$ panjang batang $\times$ kecepatan. Batang tidak perlu kumparan: cukup memotong garis-garis medan.

 B

Kuat medan magnet T

 ℓ

Panjang batang m

 v

Kecepatan batang m/s

 ε

GGL gerak V

GGL GERAK

1

V

Batang **0,4** m yang meluncur **5** m/s dalam medan **0,5** T menghasilkan GGL **1** V.

$$\text{Cek satuan: } T \cdot m \cdot m/s = \frac{N}{A \cdot m} \cdot \frac{m^2}{s} = \frac{J}{A \cdot s} = \frac{J}{C} = V$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-INDUKSI-GERAK

Arah arus induksinya ditentukan dengan **kaidah tangan kanan Fleming** (untuk generator): **ibu jari** = arah gerak, **telunjuk** = arah medan, **jari tengah** = arah arus induksi. Ingat: tangan **kiri** untuk motor (gaya), tangan **kanan** untuk generator (arus induksi).

Batang sepanjang 0,5 m meluncur 4 m/s di atas rel yang ujungnya dihubungkan oleh lampu 2 Ω . Medan magnet 0,8 T tegak lurus bidang rel. Hambatan batang dan rel diabaikan. Tentukan GGL, arus, dan gaya yang diperlukan agar batang tetap meluncur dengan kecepatan tetap.

1 GGL: $\varepsilon = Blv = 0,8 \times 0,5 \times 4 = 1,6 \text{ V}$.

2 Arus: $I = \varepsilon/R = 1,6/2 = 0,8 \text{ A}$.

3 Batang berarus di dalam medan mengalami gaya Lorentz yang melawan gerak (hukum Lenz): $F = BI\ell = 0,8 \times 0,8 \times 0,5 = 0,32 \text{ N}$.

4 Agar kecepatannya tetap, batang harus ditarik dengan 0,32 N. Daya tarik: $Fv = 0,32 \times 4 = 1,28 \text{ W}$, persis sama dengan daya lampu $I^2R = 0,64 \times 2 = 1,28 \text{ W}$. ✓

GGL 1,6 V, arus 0,8 A, dan gaya tarik 0,32 N. Energi mekanik yang kamu berikan berubah seluruhnya menjadi energi listrik di lampu. Tidak ada listrik gratis!



LANJUT • IB & OLIMPIADE

DARI GAYA LORENTZ, DAN BATANG YANG BERPUTAR

GGL gerak bisa diturunkan tanpa fluks. Elektron di dalam batang ikut bergerak dengan kecepatan v , sehingga mengalami gaya Lorentz evB sepanjang batang. Elektron menumpuk di satu ujung sampai medan listrik di batang mengimbangnya: $eE = evB$, sehingga beda potensial ujung-ujungnya $E\ell = Blv$. Untuk batang sepanjang L yang berputar dengan kecepatan sudut ω pada salah satu ujungnya, tegak lurus medan, setiap bagian batang bergerak dengan kecepatan $v = \omega r$. Jumlahkan: $\varepsilon = \int_0^L B\omega r \, dr = \frac{1}{2}B\omega L^2$. Pesawat bersayap 60 m yang terbang 250 m/s melintasi komponen vertikal medan Bumi $\pm 40 \mu\text{T}$ menghasilkan GGL sekitar $Blv \approx 0,6 \text{ V}$ di antara kedua ujung sayapnya!

25.5

Generator: memutar kumparan, memanen listrik

Putar kumparan di antara kutub magnet, maka sudut θ antara medan dan garis normal kumparan terus berubah. Fluks $\Phi = BA \cos \omega t$ naik-turun, sehingga muncul GGL yang juga naik-turun seperti gelombang sinus:

$$\varepsilon = NBA\omega \sin \omega t = \varepsilon_{\text{maks}} \sin \omega t$$

GGL paling besar justru saat bidang kumparan **sejajar** medan (fluksnya nol, tetapi berubah paling cepat), dan nol saat bidang kumparan **tegak lurus** medan (fluksnya maksimum, tetapi sesaat tidak berubah).

$$\varepsilon_{\text{maks}} = N B A (2\pi f)$$

Tambah lilitan, perkuat magnet, perbesar kumparan, atau putar lebih cepat, maka GGL puncaknya naik.

N
 Jumlah lilitan lilitan

B
 Kuat medan T

A
 Luas kumparan cm^2

f
 Frekuensi putaran Hz

$\varepsilon_{\text{maks}}$
 GGL maksimum V

GGL MAKSIMUM

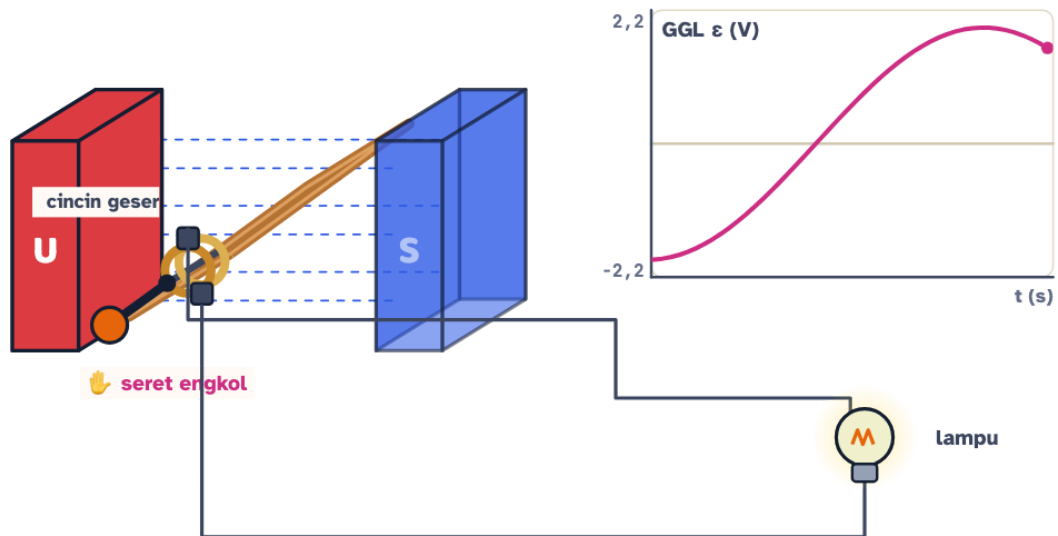
125,7

V

Kumparan **100** lilitan seluas **200** cm^2 yang berputar **50** kali per detik dalam medan **0,2** T menghasilkan GGL puncak **125,7** V.

Cek satuan: $\text{T} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} = \text{Wb/s} = \text{V}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-INDUKSI-GENERATOR](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-induksi-generator)



GGL maksimum $NBA\omega$
1,88 V

GGL sekarang
1,52 V

Frekuensi
0,5 Hz

Tekan ► **Jalankan**, atau **seret engkol** (lingkaran oranye) untuk memutar kumparan dengan tanganmu. Perhatikan kapan grafik GGL mencapai puncak. Ganti **cincin geser** dengan **komutator**: bagaimana bentuk grafiknya berubah? Putar sangat pelan: mengapa lampunya berkedip?

Ujung kumparan yang berputar dihubungkan ke rangkaian luar melalui **cincin geser** (*slip ring*), sehingga keluarannya **arus bolak-balik** (AC). Jika cincin geser diganti **komutator** seperti pada motor, arah arus dibalik setiap setengah putaran, sehingga keluarannya **arus searah yang berdenyut**. Dinamo sepeda dan generator di pembangkit listrik menghasilkan arus bolak-balik. Pada generator besar, biasanya magnetnya (elektromagnet) yang berputar dan kumparannya diam.



FISIKA INDONESIA: DARI CIRATA SAMPAI SIDRAP

Di **PLTA** seperti Cirata dan Saguling di Jawa Barat, air waduk memutar turbin yang memutar generator. PLTA Cirata saja berkapasitas sekitar 1.000 MW. Di Kabupaten Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan, berdiri **PLTB Sidrap**, pembangkit listrik tenaga bayu skala besar pertama di Indonesia (diresmikan 2018). Tiga puluh turbin angin setinggi gedung puluhan lantai menghasilkan total sekitar 75 MW. Semua generator yang tersambung ke jaringan PLN harus berputar serempak agar frekuensinya tepat **50 Hz**. Generator PLTA berputar lambat (ratusan putaran per menit), jadi dipasang puluhan kutub magnet supaya tetap menghasilkan 50 Hz.

Kumparan dinamo berisi 250 lilitan dengan luas 4 cm^2 dan berputar di dalam medan $0,1 \text{ T}$. Berapa putaran per detik yang diperlukan agar GGL puncaknya 6 V ?

1 $\epsilon_{\text{maks}} = NBA\omega$, sehingga $\omega = \frac{6}{250 \times 0,1 \times 4 \times 10^{-4}} = 600 \text{ rad/s}$.

2 $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{600}{2\pi} \approx 95$ putaran per detik.

Sekitar 95 putaran per detik. Roda kecil dinamo yang menempel pada ban memang berputar sangat cepat. Itulah sebabnya lampu sepeda meredup saat sepeda melambat.

25.6 Transformator dan transmisi listrik

Transformator (trafo) terdiri atas dua kumparan, **primer** dan **sekunder**, yang dililitkan pada satu inti besi. Arus **bolak-balik** di kumparan primer membuat fluks yang terus berubah di inti. Fluks itu ikut menembus kumparan sekunder dan menginduksi GGL di sana. Karena fluks per lilitan sama, tegangan sebanding dengan jumlah lilitan:

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p}$$

Tegangan sekunder = tegangan primer $\times$ perbandingan lilitan. Lilitan sekunder lebih banyak berarti tegangan naik (step-up). Lebih sedikit berarti tegangan turun (step-down).

V_p Tegangan primer V

N_p Lilitan primer lilitan

N_s Lilitan sekunder lilitan

V_s Tegangan sekunder V

TEGANGAN SEKUNDER

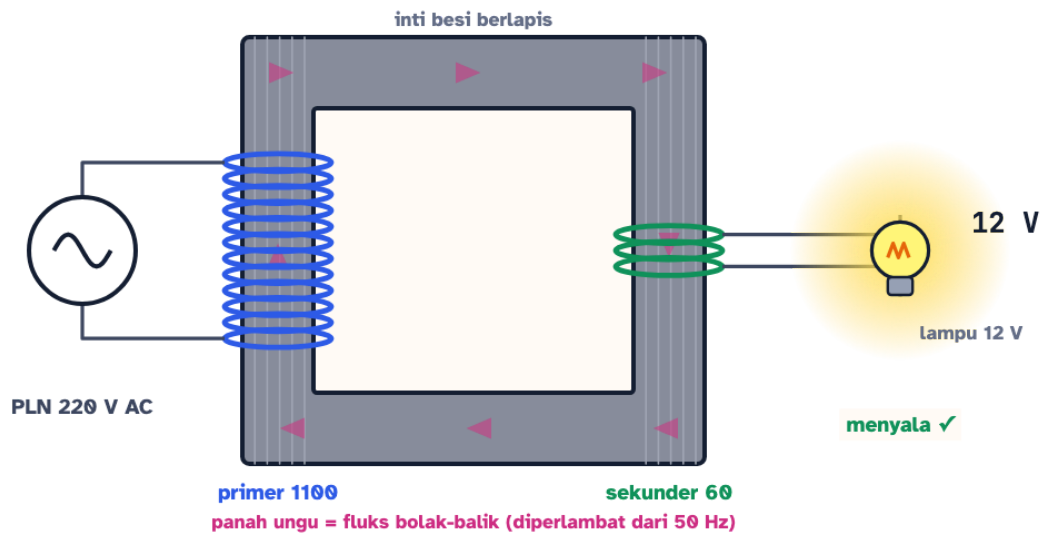
12

V

Trafo dengan **1.100** lilitan primer dan **60** lilitan sekunder mengubah **220 V** menjadi **12 V**.

Cek satuan: Untuk trafo ideal, daya masuk = daya keluar: $V_p I_p = V_s I_s$. Tegangan naik berarti arus turun, dan sebaliknya.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-INDUKSI-TRAFO](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-INDUKSI-TRAFO)



Tegangan sekunder
12 V

Jenis trafo
step-down (penurun)

Arus lampu
2 A

Arus primer (ideal)
0,109 A

Atur lilitan primer dan sekunder sampai lampu 12 V menyala normal dari listrik PLN 220 V. Lalu ganti sumbernya dengan **aki 12 V DC**. Mengapa lampunya hanya berkedip sekali lalu padam?



AWAS JEBAKAN: TRAFU TIDAK BISA DIPAKAI UNTUK DC

Arus searah (DC) yang tetap membuat fluks yang **tetap**, sehingga tidak ada GGL induksi di sekunder (kecuali lonjakan sesaat saat saklar dinyalakan atau dimatikan). Trafo hanya bekerja dengan arus **bolak-balik**. Selain itu, trafo menaikkan tegangan tetapi **tidak** menaikkan daya. Daya keluar paling banyak sama dengan daya masuk, dan pada trafo nyata sedikit lebih kecil.

Trafo nyata kehilangan sedikit energi sebagai kalor: hambatan kawat kumparan, **histeresis** inti besi, dan **arus pusar** di inti. Agar arus pusar kecil, inti dibuat dari lembaran-lembaran tipis baja silikon yang dilapisi isolator (*inti berlapis*). Trafo besar efisiensinya bisa lebih dari 98%, dan dengungnya yang khas berasal dari inti yang bergetar 100 kali per detik.

Mengapa listrik dikirim dengan tegangan sangat tinggi?

Pembangkit sering jauh dari kota. Kabel sepanjang ratusan kilometer punya hambatan R , sehingga sebagian daya terbuang menjadi kalor: $P_{\text{rugi}} = I^2 R$. Untuk mengirim daya $P = VI$ yang sama, tegangan 25 kali lebih tinggi berarti arus 25 kali lebih kecil, dan rugi dayanya $25^2 = 625$ kali lebih kecil!

$$P_{\text{rugi}} = I^2 R = \left(\frac{P}{V} \right)^2 R$$

Rugi daya sebanding dengan kuadrat arus. Gandakan tegangan, maka arus tinggal separuh dan rugi daya tinggal seperempat.

P

Daya yang dikirim MW

V

Tegangan transmisi kV

RHambatan total kabel Ω **P_{rugi}**

Daya yang hilang MW

DAYA YANG HILANG

4,444

MW

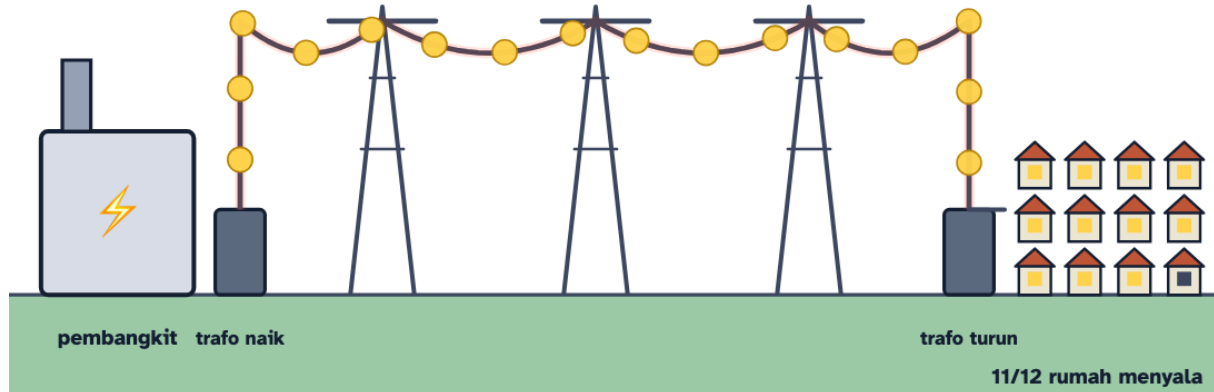
Mengirim **100** MW pada **150** kV lewat kabel **10** Ω membuang **4,444** MW menjadi kalor. Model ini hanya masuk akal jika rugi daya jauh lebih kecil daripada daya yang dikirim.

Cek satuan: $\left(\frac{\text{W}}{\text{V}} \right)^2 \Omega = \text{A}^2 \Omega = \text{W}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-INDUKSI-RUGI

$$I = P / V = 100 \text{ MW} \div 150 \text{ kV} = 667 \text{ A}$$

$$\text{Rugi } I^2R = 4,44 \text{ MW (4,44\% dari daya kirim)}$$



Arus di kabel

667 A

Daya hilang

4,44 MW

Persentase hilang

4,44 %

Daya sampai

95,6 MW

Pilih tegangan transmisi dan perhatikan arus di kabel, kabel yang membara, serta berapa rumah di kota yang menyala. Mengapa mengirim 100 MW dengan 220 V mustahil?

Tahap perjalanan listrik

Tegangan (umum di Indonesia)

Keluaran generator pembangkit	belasan sampai ± 20 -an kV
Trafo step-up di pembangkit → SUTET	500 kV (Jawa-Bali), 275 kV (sebagian Sumatra & Kalimantan)
SUTT (saluran udara tegangan tinggi)	150 kV dan 70 kV
Gardu induk → jaringan distribusi (tiang kota)	20 kV
Trafo distribusi di tiang/gardu → rumahmu	220 V (satu fase) atau 380 V (tiga fase)

COBA SENDIRI Hitung rugi transmisi

Sebuah pembangkit mengirim daya 50 MW lewat kabel berhambatan total 8 Ω . Bandingkan persentase daya yang hilang jika dikirim pada 20 kV dan pada 150 kV.

1 Pada 20 kV: $I = \frac{50 \times 10^6}{20 \times 10^3} = 2\,500$ A, sehingga $P_{\text{rugi}} = 2\,500^2 \times 8 = 50 \times 10^6$ W = 50 MW. Semua daya habis di kabel! Mengirim daya sebesar itu pada 20 kV lewat kabel ini jelas mustahil.

2 Pada 150 kV: $I = \frac{50 \times 10^6}{150 \times 10^3} \approx 333$ A, sehingga $P_{\text{rugi}} = 333^2 \times 8 \approx 0,89$ MW.

3 Persentase: $\frac{0,89}{50} \times 100\% \approx 1,8\%$.

Pada 20 kV hampir seluruh daya hilang, sedangkan pada 150 kV hanya $\pm 1,8\%$. Tegangan naik 7,5 kali, rugi daya turun $7,5^2 \approx 56$ kali. Karena itulah ada SUTET dan trafo di mana-mana.



KESELAMATAN DI DEKAT JARINGAN LISTRIK

- Jangan bermain layangan di dekat kabel listrik, apalagi dengan benang kawat atau benang basah. Layangan yang tersangkut menyebabkan pemadaman dan bisa menyetrum. Biarkan saja dan laporkan ke PLN.
- Jangan memanjat tiang listrik, menara SUTT/SUTET, atau pagar gardu. Listrik tegangan tinggi bisa "meloncat" (busur listrik) walau belum disentuh.
- Jika ada kabel putus menjuntai ke tanah, menjauhlah, dan larang orang lain mendekat. Segera hubungi PLN.

25.7 Induktansi dan teknologi induksi di sekitarmu

Arus yang berubah di sebuah kumparan menghasilkan fluks yang berubah di kumparan **itu sendiri**, sehingga muncul GGL yang melawan perubahan arus. Gejala ini disebut **induksi diri**, dan ukurannya adalah **induktansi** L (satuan henry, H): $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Kumparan seolah punya "kelembaman listrik": sulit dinyalakan dengan cepat dan sulit dimatikan mendadak. Saat saklar motor besar dibuka tiba-tiba, GGL induksi diri yang besar bisa menimbulkan percikan api di saklar.

Jika arus berubah di satu kumparan dan menginduksi GGL di kumparan lain di dekatnya, gejalanya disebut **induksi bersama** (induktansi bersama M). Transformator, pengisi daya nirkabel, dan kompor induksi bekerja dengan prinsip ini.

**SOLENOID, ENERGI, DAN RANGKAIAN R-L**

Untuk solenoid panjang dengan N lilitan, panjang ℓ , dan luas A : $L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell}$. Induktor menyimpan energi di medan magnetnya: $U = \frac{1}{2} L I^2$. Jika induktor L dan resistor R dihubungkan ke baterai GGL ε , arus tidak langsung penuh, tetapi tumbuh menurut $I(t) = \frac{\varepsilon}{R} (1 - e^{-t/\tau})$ dengan **konstanta waktu** $\tau = L/R$. Setelah $t = \tau$, arus mencapai $\pm 63\%$ nilai akhirnya. Saat baterai dilepas (dan rangkaian tetap tertutup), arus meluruh $I = I_0 e^{-t/\tau}$.

**Kompore induksi**

Kumparan di bawah kaca dialiri arus bolak-balik berfrekuensi puluhan kilohertz. Arus pusar muncul langsung di dasar panci, sehingga panci yang memanaskan, bukan kompornya. Pancinya harus berdasar **besi** atau baja yang ditarik magnet.

**Pengisi daya nirkabel**

Kumparan di alas pengisi dan kumparan di dalam HP membentuk "trafo tanpa inti". Medan yang berubah memindahkan energi menembus casing HP.

**Kartu uang elektronik & tol**

Kartu tidak punya baterai. Saat ditempel, medan bolak-balik dari pembaca menginduksi arus di antena kumparan dalam kartu. Arus itu menyalakan cip untuk sesaat dan mengirim data saldo.

**Sensor kendaraan di jalan**

Kumparan kawat yang ditanam di aspal berubah induktansinya saat ada kendaraan logam di atasnya. Sinyal ini bisa dipakai untuk menghitung kendaraan atau mengatur lampu lalu lintas.

**FISIKA INDONESIA: KOMPOR INDUKSI DI DAPUR KITA**

Indonesia mengimpor sebagian besar elpiji yang dipakai di dapur-dapur kita. Karena itu pemerintah dan PLN pernah menguji coba pembagian kompor induksi di beberapa kota, agar memasak bisa memakai listrik dari pembangkit dalam negeri. Efisiensinya tinggi, sebab kalor dibangkitkan langsung di dasar panci. Tips: tempelkan magnet ke dasar pancimu. Jika menempel kuat, panci itu cocok untuk kompor induksi. Panci aluminium tipis biasanya tidak bisa dipakai.

MITOS

"Magnet yang sangat kuat di dalam kumparan pasti menghasilkan listrik terus-menerus."

MITOS

"Transformator bisa menaikkan tegangan aki 12 V menjadi 220 V untuk menyalakan TV."

FAKTA

Listrik induksi hanya muncul saat fluks **berubah**.
Magnet diam, sekuat apa pun, tidak menghasilkan arus. Generator bekerja karena kumparannya terus berputar.

FAKTA

Aki memberi arus searah yang tetap, sehingga trafo tidak bekerja. Alat *inverter* lebih dulu mengubah DC menjadi AC dengan rangkaian elektronik, baru kemudian tegangannya dinaikkan.

MITOS

"Kalau tegangan dinaikkan dengan trafo, energinya juga bertambah. Bisa jadi mesin energi gratis!"

FAKTA

Trafo ideal:
 $V_p I_p = V_s I_s$
Tegangan naik, arus turun. Daya keluar tidak pernah melebihi daya masuk. Hukum kekekalan energi tetap berlaku.

Cek Cepat

Cara yang tidak menghasilkan GGL induksi pada sebuah kumparan adalah...

memasukkan magnet ke dalam kumparan

membiarkan magnet diam di dalam kumparan

memutar kumparan di antara kutub magnet

menyalakan dan mematikan arus di kumparan lain di dekatnya

Trafo memiliki 200 lilitan primer dan 4.000 lilitan sekunder. Jika tegangan primernya 220 V AC, tegangan sekundernya...

11 V

220 V

4.400 V

0 V

Listrik dikirim lewat SUTET dengan tegangan sangat tinggi terutama untuk...

memperkecil arus sehingga rugi daya I^2R di kabel kecil

mempercepat aliran elektron agar listrik cepat sampai

menambah daya listrik yang diterima kota

supaya kabel tidak perlu isolator

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. C • 3. A



Tantangan Rumah: lomba magnet jatuh

Bahan: magnet neodimium kecil berbentuk silinder atau bola, pipa PVC, gulungan aluminium foil tebal (atau pipa/talang aluminium bekas), stopwatch HP, mistar. **Hati-hati: magnet neodimium bisa menjepit jari, dan jauhkan dari adik kecil karena berbahaya jika tertelan.**

1. Jatuhkan magnet melalui pipa PVC. Ukur waktunya dengan stopwatch (ulangi 3 kali dan hitung rata-ratanya).
2. Gulung aluminium foil berlapis-lapis (± 20 lapis) menjadi tabung yang sedikit lebih besar dari magnet, atau pakai pipa aluminium. Jatuhkan magnet melaluinya dan ukur waktunya.
3. Jatuhkan juga benda bukan magnet yang ukurannya mirip (mur atau baut kecil) melalui tabung aluminium.

Pertanyaan: Mengapa hanya magnet yang melambat di tabung aluminium? Apakah jumlah lapisan foil berpengaruh? Ke mana perginya energi gerak magnet yang "hilang"? Jelaskan dengan hukum Lenz.

✓ **Kamu sekarang bisa...**

- menghitung **fluks magnet** $\Phi = BA \cos \theta$ dan menjelaskan kapan fluks berubah
- memakai **hukum Faraday** $\varepsilon = -N \Delta\Phi / \Delta t$ dan **hukum Lenz** untuk besar dan arah arus induksi
- menghitung **GGL gerak** $\varepsilon = B\ell v$ dan GGL maksimum **generator** $\varepsilon_{\text{maks}} = NBA\omega$
- memakai persamaan **transformator** dan menjelaskan mengapa listrik dikirim dengan **tegangan tinggi**
- menjelaskan **induktansi** dan teknologi induksi di sekitarmu: kompor induksi, kartu uang elektronik, pengisian nirkabel

🔑 **Istilah kunci**

fluks magnet

arus induksi

GGL induksi

arus pusar

kaidah tangan kanan Fleming

induksi diri

📌 **Rumus penting**

$$\Phi = BA \cos \theta$$

Fluks magnet. Fluks = kuat medan × luas bidang × cos sudut antara medan dan garis normal bidang. Bidang tegak lurus medan menangkap fluks paling banyak.

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Hukum Faraday. GGL induksi = jumlah lilitan × laju perubahan fluks. Tanda minus adalah hukum Lenz: arus induksi melawan perubahan.

$$\varepsilon = B\ell v$$

GGL gerak. GGL = kuat medan × panjang batang × kecepatan. Batang tidak perlu kumparan: cukup memotong garis-garis medan.

$$\varepsilon_{\text{maks}} = NBA(2\pi f)$$

GGL maksimum generator. Tambah lilitan, perkuat magnet, perbesar kumparan, atau putar lebih cepat, maka GGL puncaknya naik.

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p}$$

Persamaan transformator. Tegangan sekunder = tegangan primer × perbandingan lilitan. Lilitan sekunder lebih banyak berarti tegangan naik (step-up). Lebih sedikit berarti tegangan turun (step-down).

$$P_{\text{rugi}} = I^2 R = \left(\frac{P}{V}\right)^2 R$$

Rugi daya di kabel transmisi. Rugi daya sebanding dengan kuadrat arus. Gandakan tegangan, maka arus tinggal separuh dan rugi daya tinggal seperempat.

⚠ **Jangan sampai terjebak**

- Arus induksi tidak selalu membuat medan yang berlawanan arah dengan medan magnet.
- Arus searah (DC) yang tetap membuat fluks yang tetap, sehingga tidak ada GGL induksi di sekunder (kecuali lonjakan sesaat saat saklar dinyalakan atau dimatikan).
- Jangan bermain layangan di dekat kabel listrik, apalagi dengan benang kawat atau benang basah.

Teka-teki untuk Bab 26

Generator PLN menghasilkan tegangan yang naik-turun seperti gelombang sinus, 50 kali per detik. Seratus kali setiap detik tegangannya tepat **no!** Lalu mengapa lampu di rumahmu tidak tampak berkedip? Dan apa arti "220 V" kalau puncak tegangannya sebenarnya sekitar 311 V?

▼ Intip petunjuk

Mata kita terlalu lambat untuk melihat kedipan 100 kali per detik, dan filamen atau fosfor lampu masih berpendar di sela-selanya. "220 V" adalah **nilai efektif** (rms): tegangan searah yang memberi efek pemanasan yang sama. Untuk gelombang sinus, $V_{\text{rms}} = V_{\text{maks}}/\sqrt{2}$, dan $311/\sqrt{2} \approx 220$. Lanjutkan ke Bab 26: Arus Bolak-balik.

26 Arus Bolak-balik: Listrik yang Menari

Stopkontak di rumahmu berlabel 220 V, padahal tegangannya naik-turun sampai ± 311 V dan berbalik arah seratus kali setiap detik. Lalu bagaimana radio bisa memilih satu stasiun di antara puluhan siaran yang memenuhi udara?

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **AC** dan **DC**, lalu membaca frekuensi, periode, nilai puncak, dan **nilai efektif (rms)** listrik PLN;
- menjelaskan perilaku **resistor**, **induktor**, dan **kapasitor** pada AC lewat reaktansi dan beda fase;
- menggambar **diagram fasor** dan menghitung **impedansi** rangkaian RLC seri;
- menghitung **frekuensi resonansi** dan menjelaskan cara radio memilih stasiun;
- menghitung **daya dan faktor daya**, serta memahami cara adaptor HP mengubah AC menjadi DC.

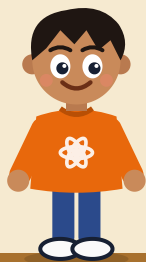
MISTERI 220 VOLT

KOMIK • 4 PANEL

Malam hari, di rumah Raka

RAKA

Di stopkontak tertulis 220 V. Berarti tegangannya tetap 220 V terus, kan?

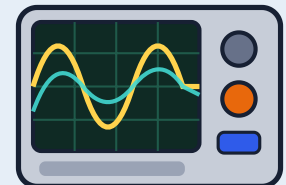


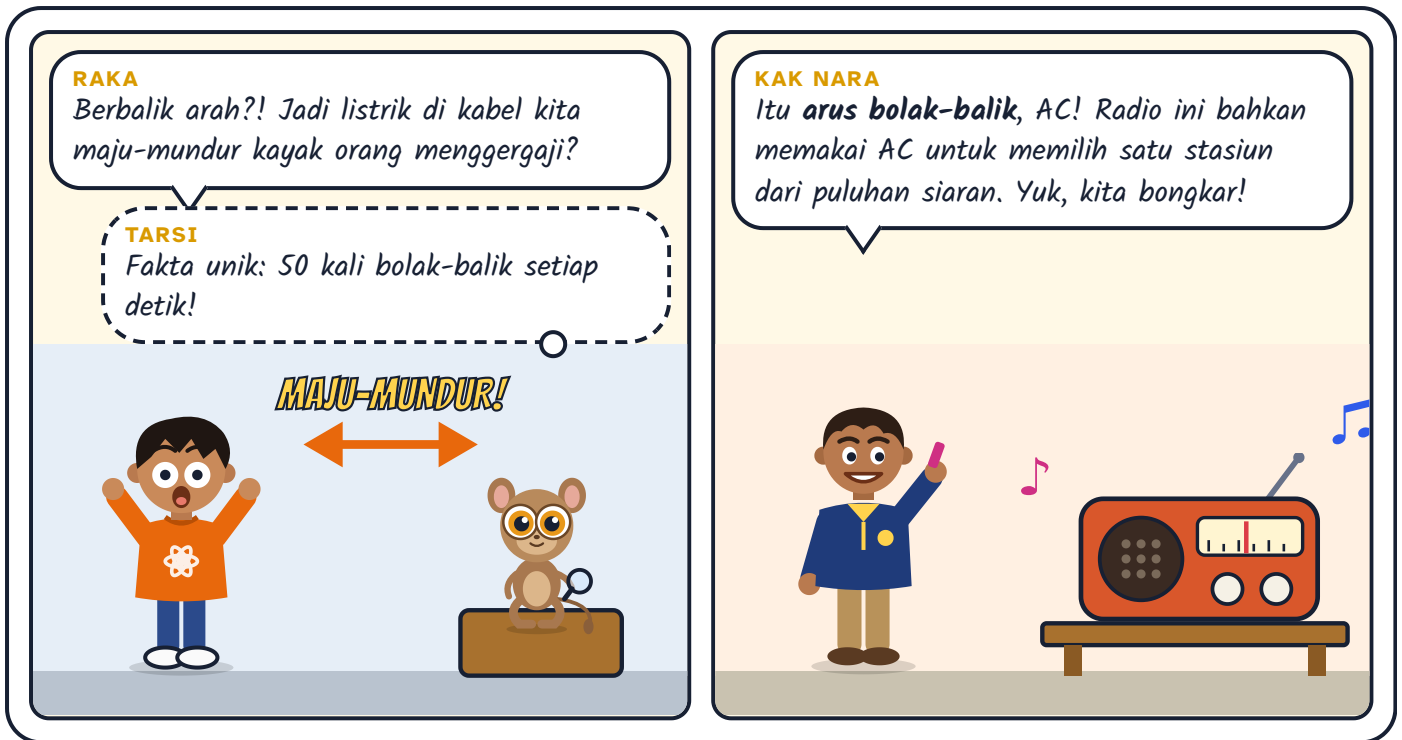
220 V ~

Esoknya, di lab sekolah

SARI

Osiloskop bilang lain, Rak. Tegangannya naik-turun, puncaknya ± 311 V, dan arahnya berbalik terus!

puncak ± 311 V!



Tebak Dulu!

Stopkontak PLN berlabel 220 V. Berapa tegangan tertinggi yang sebenarnya dicapai di stopkontak itu?

Tepat 220 V, karena itulah yang tertulis.

Sekitar 110 V, karena tegangannya dibagi dua untuk dua lubang.

Sekitar 311 V, sesaat, dua kali dalam setiap periode (sekali positif, sekali negatif).

Sekitar 440 V, karena naik-turun dari -220 V ke +220 V.

Jawabannya: sekitar 311 V. Tegangan PLN berbentuk gelombang sinus yang berayun antara +311 V dan -311 V. Angka "220 V" adalah **nilai efektif**: gelombang ini memanaskan setrika sama kuatnya dengan listrik DC 220 V. Hubungannya $311 \approx 220 \times \sqrt{2}$. Kita buktikan di subbab 26.2.

26.1 AC vs DC: listrik yang searah dan yang bolak-balik

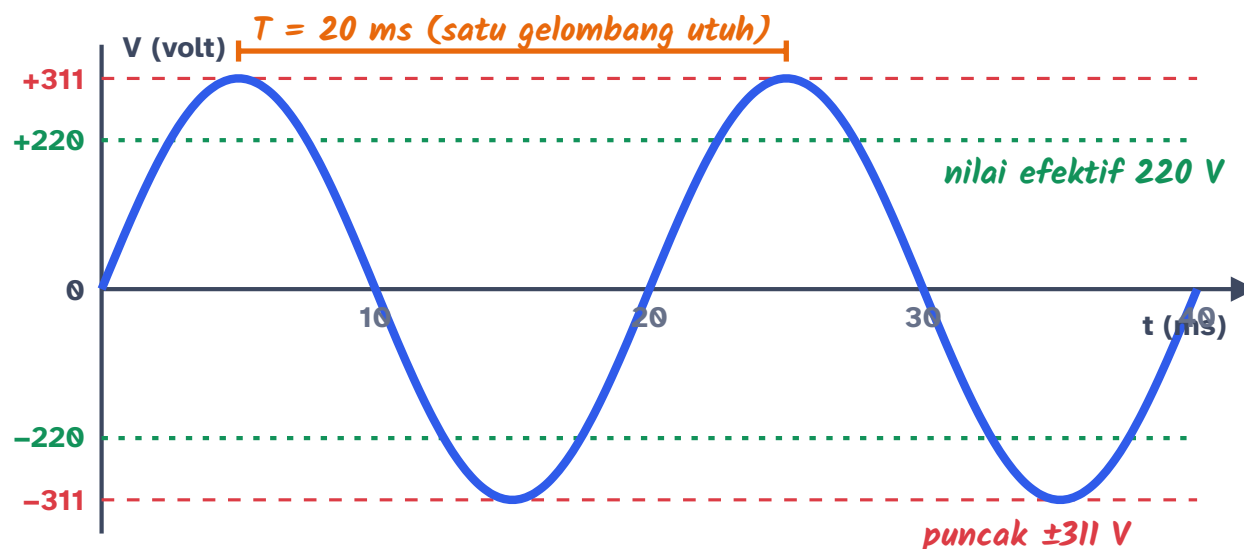
Baterai senter mendorong elektron ke **satu arah saja**, dari kutub negatif ke kutub positif melalui rangkaian. Arus seperti ini disebut **arus searah** atau **DC** (*direct current*).

Listrik PLN berbeda. Di pembangkit, generator memutar kumparan di dalam medan magnet (ingat Bab 25). GGL yang dihasilkan berbentuk **gelombang sinus**: dorongannya ke kanan, melemah, berbalik ke kiri, melemah lagi, lalu berbalik ke kanan. Inilah **arus bolak-balik** atau **AC** (*alternating current*).

$$V = V_{\text{maks}} \sin(\omega t), \quad \omega = 2\pi f, \quad T = \frac{1}{f}$$

Rumus ini bercerita: tegangan V (volt) berayun di antara $+V_{\text{maks}}$ dan $-V_{\text{maks}}$. f adalah **frekuensi** (hertz, Hz): berapa gelombang utuh per detik. T adalah **periode** (detik): lama satu gelombang utuh. ω adalah **frekuensi sudut** (rad/s). PLN memakai $f = 50$ Hz, jadi $T = 1/50 = 0,02$ s = 20 milidetik. Dalam satu periode arus berbalik arah dua kali, sehingga dalam satu detik arus berbalik arah **100 kali**.

Bahasa sederhana • Gampangnya: elektron di kabel AC seperti gergaji kayu yang digerakkan maju-mundur. Gergajinya tidak pernah pergi jauh, tetapi kayunya tetap terpotong. Elektron AC juga hanya maju-mundur di tempat, tetapi energinya tetap sampai ke lampu dan kipas angin di rumahmu.



Tegangan stopkontak PLN selama 40 ms (dua periode). Garis hijau adalah nilai efektif (rms) 220 V, garis merah adalah puncaknya.

	Arus searah (DC)	Arus bolak-balik (AC)
Arah elektron	satu arah terus	maju-mundur, berbalik 2× tiap periode
Grafik V-t	garis datar	gelombang sinus
Sumber	baterai, aki, panel surya, adaptor	generator PLTA, PLTU, PLTB; stopkontak PLN
Bisa dinaikkan/diturunkan trafo?	tidak (trafo butuh fluks yang berubah)	ya, sehingga mudah dikirim jarak jauh dengan tegangan tinggi
Contoh pemakai	HP, laptop, senter, mobil listrik (baterainya)	kipas angin, kulkas, pompa air, setrika



TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1880-an terjadi "Perang Arus". Thomas Edison membangun jaringan listrik **DC** di New York, tetapi DC sulit dikirim jauh karena tegangannya tidak bisa dinaikkan. Nikola Tesla dan George Westinghouse memperjuangkan **AC**, yang tegangannya bisa dinaikkan dengan trafo sehingga rugi daya di kabel kecil (Bab 25). Pada 1896, listrik AC dari pembangkit di air terjun Niagara dialirkan ke kota Buffalo, sekitar 40 km jauhnya. AC menang, dan sampai sekarang hampir semua jaringan listrik dunia memakai AC.



FISIKA INDONESIA

Standar listrik rumah di Indonesia adalah **220 V, 50 Hz**. Sebagian negara lain berbeda: Amerika Serikat memakai sekitar 120 V, 60 Hz. Itulah sebabnya alat elektronik dari luar negeri kadang butuh adaptor khusus. Untungnya, sebagian besar charger HP dan laptop modern tertulis "100–240 V, 50/60 Hz", artinya bisa dipakai di mana saja.

26.2 Nilai efektif (rms): kenapa "220 V"?

Coba hitung **rata-rata** tegangan PLN selama satu periode. Separuh waktu positif, separuh waktu negatif, sama besar. Rata-ratanya... **nol!** Tetapi setrika jelas tetap panas. Jadi rata-rata biasa bukan ukuran yang tepat.

Kuncinya ada di daya. Panas pada resistor sebanding dengan I^2 (ingat $P = I^2 R$ dari Bab 23). Kuadrat selalu positif, jadi saat arus negatif pun resistor tetap memanaskan. Fisikawan lalu mendefinisikan **nilai efektif** atau **rms** (*root mean square*, akar dari rata-rata kuadrat): nilai DC yang menghasilkan panas sama besar.

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \approx 0,707 V_{\text{maks}}, \quad I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

Tegangan efektif = tegangan puncak dibagi akar dua, kira-kira 0,707 kali puncaknya.

 V_{maks}

Tegangan puncak V

 V_{rms}

Tegangan efektif V

TEGANGAN EFEKTIF

219,9

V

Gelombang AC berpuncak **311 V** memanaskan setrika sama kuatnya dengan listrik DC **219,9 V**. Angka inilah yang ditulis di label alat dan yang terbaca di multimeter.

Cek satuan: satuannya tetap volt; $\sqrt{2} \approx 1,414$, sehingga $V_{\text{maks}} = 1,414 \times 220 \approx 311 \text{ V}$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AC-RMS](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-AC-RMS)



BAGAIMANA DENGAN RATA-RATA SETENGAH PERIODE?

Kalau hanya dirata-rata selama setengah periode positif, hasilnya $V_{\text{rata}} = \frac{2V_{\text{maks}}}{\pi} \approx 0,637 V_{\text{maks}}$.

Nilai ini dipakai untuk arus yang sudah disearahkan (subbab 26.7). Jadi ada tiga angka berbeda: puncak (311 V), efektif (220 V), dan rata-rata setengah periode ($\pm 198 \text{ V}$).



AWAS JEBAKAN

Multimeter dan label alat listrik selalu memakai **nilai efektif**. Tetapi isolasi kabel, kapasitor, dan sakelar harus kuat menahan **nilai puncak**. Kapasitor bertuliskan "250 V" yang dipasang langsung di stopkontak 220 V bisa jebol, karena tegangan puncaknya 311 V!

CONTOH Membaca osiloskop

Osiloskop menunjukkan tegangan sinus dengan puncak 12 V dan satu gelombang utuh selebar 4 kotak. Skala waktunya 5 ms per kotak. Tentukan tegangan efektif dan frekuensinya.

1 Tegangan efektif: $V_{\text{rms}} = \frac{12}{\sqrt{2}} = \frac{12}{1,414} \approx 8,5 \text{ V}.$

2 Periode: $T = 4 \times 5 \text{ ms} = 20 \text{ ms} = 0,020 \text{ s}.$

3 Frekuensi: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,020} = 50 \text{ Hz}.$

$V_{\text{rms}} \approx 8,5 \text{ V}$ dan $f = 50 \text{ Hz}$, sama dengan frekuensi PLN. Mungkin ini keluaran trafo kecil dari stopkontak.

MITOS

"Listrik rumah 220 V artinya tegangannya selalu 220 V."

MITOS

"Rata-rata arus AC nol, jadi AC tidak bisa memanaskan apa pun."

FAKTA

Tegangannya terus berubah di antara +311 V dan -311 V, 50 kali per detik. Angka 220 V adalah **nilai efektif**
: setara dengan DC 220 V dalam hal memanaskan dan menyalakan.

FAKTA

Panas sebanding dengan I^2
, yang selalu positif. Yang nol hanya rata-rata **arusnya**
, bukan rata-rata **dayanya**
. Karena itu setrika dan rice cooker tetap panas.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

DARI MANA DATANGNYA $\sqrt{2}$?

Daya sesaat pada resistor: $P(t) = \frac{V_{\text{maks}}^2}{R} \sin^2(\omega t)$. Karena $\sin^2 x = \frac{1}{2}(1 - \cos 2x)$ dan rata-rata $\cos 2x$ dalam satu periode nol, maka $\langle \sin^2 \rangle = \frac{1}{2}$. Jadi $\langle P \rangle = \frac{V_{\text{maks}}^2}{2R} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R}$ dengan $V_{\text{rms}} = V_{\text{maks}}/\sqrt{2}$. Rumus ini **hanya untuk sinus**. Gelombang kotak $\pm V_0$ punya $V_{\text{rms}} = V_0$, sedangkan gelombang segitiga punya $V_{\text{rms}} = V_0/\sqrt{3}$.

26.3 Resistor, induktor, dan kapasitor pada AC



Tebak Dulu!

Frekuensi sumber AC dinaikkan dari 50 Hz menjadi 5.000 Hz, sedangkan tegangan efektifnya tetap. Apa yang terjadi pada arus yang melewati sebuah kapasitor, dan arus yang melewati sebuah kumparan (induktor)?

Keduanya naik, karena frekuensi tinggi membawa lebih banyak energi.

Keduanya turun, karena elektron kewalahan bolak-balik terlalu cepat.

Arus kapasitor naik, arus kumparan turun.

Tidak ada yang berubah, karena tegangannya sama.

Arus kapasitor naik, arus kumparan turun. Kumparan "membenci" perubahan arus (Hukum Lenz, Bab 25), dan perubahan makin cepat pada frekuensi tinggi, jadi kumparan makin menghambat. Kapasitor sebaliknya: makin sering muatan bolak-balik mengisi dan mengosongkan pelatnya, makin besar arusnya. Pengeras suara memanfaatkan sifat ini untuk memisahkan nada tinggi dan nada rendah.

Pada DC, kita hanya mengenal hambatan R . Pada AC muncul dua "penghambat" baru yang bergantung pada frekuensi. Hambatan versi AC ini disebut **reaktansi** (lambang X , satuan ohm). Bedanya dengan resistor: reaktansi **tidak mengubah energi listrik menjadi panas**. Energinya hanya disimpan sebentar, lalu dikembalikan.

Komponen	"Hambatan" terhadap AC	Jika f naik	Fase arus terhadap tegangan	Analogi
Resistor R	R	tetap	sefase (bersamaan)	lorong sempit: selalu menghambat sama
Induktor L	$X_L = 2\pi fL$	naik	arus terlambat 90° ($\frac{1}{4}$ periode)	roda gila berat: malas diubah arah putarnya
Kapasitor C	$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$	turun	arus mendahului 90°	balon karet di dalam pipa air: air bolak-balik "lewat" walau tidak menembus

Mengapa kapasitor membuat arus **mendahului** tegangan? Bayangkan mengisi ember. Arus air paling deras saat ember masih kosong, padahal "tinggi air" (tegangan) baru mulai naik. Saat ember penuh (tegangan puncak), arus justru berhenti. Jadi puncak arus datang $\frac{1}{4}$ periode lebih dulu daripada puncak tegangan. Induktor kebalikannya: ia menahan perubahan arus, sehingga arusnya baru memuncak $\frac{1}{4}$ periode setelah tegangannya.

RUMUS HIDUP Reaktansi kapasitif

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Makin tinggi frekuensinya atau makin besar kapasitornya, makin mudah arus AC melewati kapasitor.

f Frekuensi Hz

C Kapasitansi μF

X_C Reaktansi kapasitif Ω

REAKTANSI KAPASITIF

318,3

Ω

Pada **50** Hz, kapasitor **10** μF menghambat AC sebesar **318,3** Ω . Geser f mendekati 1 Hz (hampir DC): reaktansinya meroket. Itulah sebabnya kapasitor memblokir DC.

Cek satuan: $\frac{1}{\text{Hz} \cdot \text{F}} = \frac{1}{\text{s}^{-1} \cdot \text{C/V}} = \frac{\text{V}}{\text{C/s}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AC-XC

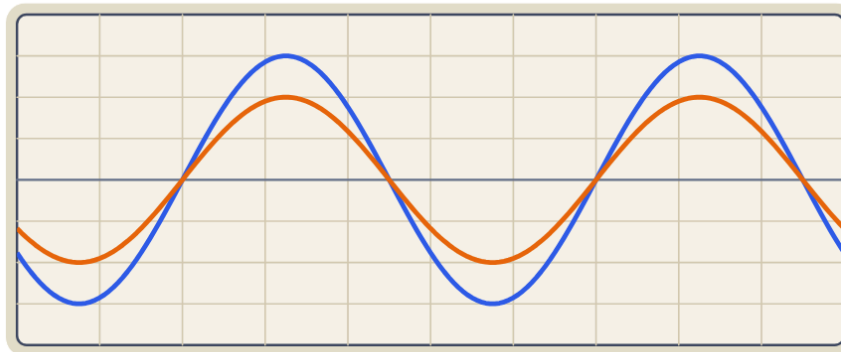


TRIK KAK NARA: CIVIL

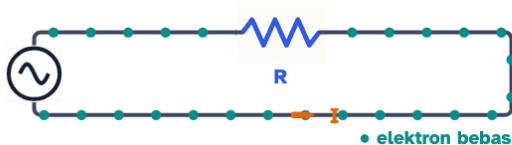
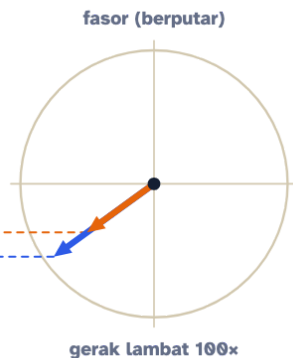
Ingat kata Inggris **CIVIL**. Pada **C** (kapasitor), **I** datang sebelum **V**: C-I-V. Pada **L** (induktor), **V** datang sebelum **I**: V-I-L. Tinggal dibaca dari kiri ke kanan!

• V sumber (maks 10 V)

• I arus (0,05 A/kotak)



waktu → (4 ms/kotak, terbaru di kanan)

 $R = 100 \, \Omega$, tidak bergantung f $I_{\text{maks}} = V_{\text{maks}} / R = 10 / 100 = 0,1 \, \text{A}$

Puncak V dan I datang bersamaan.

Reaktansi / impedansi

 $100 \, \Omega$

Arus puncak

 $0,1 \, \text{A}$ Beda fase ϕ 0°

Siapa duluan?

Sefase: bersamaan

Panah berputar di kanan adalah **fasor**; bayangan vertikalnya menggambar grafik di layar (waktu mengalir ke kanan, jadi gelombang yang **duluan** memuncak lebih ke kiri). Pilih **Resistor saja**, lalu **Kapasitor saja**, lalu **Induktor saja**. Puncak siapa yang datang lebih dulu? Kemudian naikan frekuensinya dan amati arusnya. Coba juga mode **R + L + C** pada 50 Hz. Ada kejutan!

KERJAKAN BERSAMA

Kapasitor di stopkontak

Sebuah kapasitor $10 \, \mu\text{F}$ (tahan $400 \, \text{V}$) dihubungkan ke listrik PLN $220 \, \text{V}$, $50 \, \text{Hz}$. Berapa reaktansinya dan berapa arus efektif yang mengalir?

$$1 \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 10 \times 10^{-6}} = \frac{1}{3,14 \times 10^{-3}} \approx 318 \, \Omega.$$

$$2 \quad I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_C} = \frac{220}{318} \approx 0,69 \, \text{A}.$$

3 Cek isolasi: tegangan puncak 311 V masih di bawah $400 \, \text{V}$. Aman.

$X_C \approx 318 \, \Omega$ dan $I_{\text{rms}} \approx 0,69 \, \text{A}$. Arus ini mengalir walaupun tidak ada satu elektron pun yang menembus celah kapasitor!

MITOS

"Kapasitor memutus semua arus, seperti sakelar yang terbuka."

MITOS

"Kumparan kawat tembaga hanya seutas kabel panjang, jadi tidak menghambat apa-apa."

FAKTA

Kapasitor memblokir

DC

, tetapi meloloskan

AC

. Makin tinggi frekuensinya, makin mudah.

Elektron bolak-balik mengisi dan mengosongkan pelat tanpa pernah menembus celahnya.

FAKTA

Untuk DC memang hampir begitu. Untuk AC, kumparan melawan perubahan arus (Hukum Lenz), sehingga reaktansinya

$$X_L = 2\pi fL$$

bisa ratusan ohm walaupun hambatan kawatnya hanya beberapa ohm.

26.4

Diagram fasor & impedansi rangkaian RLC

Bagaimana kalau R, L, dan C dipasang seri? Arusnya sama di semua komponen, tetapi tegangan di tiap komponen memuncak pada saat yang **berbeda**. Tegangan-tegangan itu tidak bisa dijumlahkan begitu saja. Alatnya adalah **fasor**: panah berputar yang panjangnya menyatakan nilai puncak dan sudutnya menyatakan fase. Bayangan vertikal fasor yang berputar menggambar grafik sinus, persis seperti di Lab Mini tadi.

RLC seri, arus efektif $I = 2 \text{ A}$
 $R = 30 \, \Omega$ $X_L = 80 \, \Omega$ $X_C = 40 \, \Omega$
 (tegangan di bawah ini juga nilai efektif)



Langkah 1. Pada rangkaian seri, arus I sama di mana-mana. Kita jadikan arus sebagai acuan: fasornya mendatar.

RLC seri, arus efektif $I = 2 \text{ A}$
 $R = 30 \, \Omega$ $X_L = 80 \, \Omega$ $X_C = 40 \, \Omega$
 (tegangan di bawah ini juga nilai efektif)

$$V_R = I \cdot R = 2 \times 30 = 60 \text{ V}$$

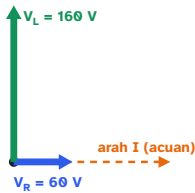


Langkah 2. Tegangan resistor $V_R = IR = 60 \text{ V}$ sefase dengan arus, jadi panahnya searah I .

RLC seri, arus efektif $I = 2 \text{ A}$
 $R = 30 \, \Omega$ $X_L = 80 \, \Omega$ $X_C = 40 \, \Omega$
 (tegangan di bawah ini juga nilai efektif)

$$V_R = I \cdot R = 2 \times 30 = 60 \text{ V}$$

$$V_L = I \cdot X_L = 2 \times 80 = 160 \text{ V}$$



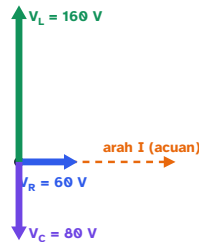
Langkah 3. Tegangan induktor $V_L = IX_L = 160 \text{ V}$ mendahului arus 90° , jadi panahnya tegak ke atas.

RLC seri, arus efektif $I = 2 \text{ A}$
 $R = 30 \, \Omega$ $X_L = 80 \, \Omega$ $X_C = 40 \, \Omega$
 (tegangan di bawah ini juga nilai efektif)

$$V_R = I \cdot R = 2 \times 30 = 60 \text{ V}$$

$$V_L = I \cdot X_L = 2 \times 80 = 160 \text{ V}$$

$$V_C = I \cdot X_C = 2 \times 40 = 80 \text{ V}$$



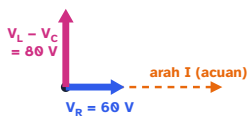
Langkah 4. Tegangan kapasitor $V_C = IX_C = 80 \text{ V}$ tertinggal 90° dari arus, jadi panahnya tegak ke bawah.

RLC seri, arus efektif $I = 2 \text{ A}$
 $R = 30 \, \Omega$ $X_L = 80 \, \Omega$ $X_C = 40 \, \Omega$
 (tegangan di bawah ini juga nilai efektif)

$$V_R = I \cdot R = 2 \times 30 = 60 \text{ V}$$

$$V_L = I \cdot X_L = 2 \times 80 = 160 \text{ V}$$

$$V_C = I \cdot X_C = 2 \times 40 = 80 \text{ V}$$



Langkah 5. V_L dan V_C berlawanan arah, jadi saling mengurangi. Sisanya 80 V ke atas.

RLC seri, arus efektif $I = 2 \text{ A}$
 $R = 30 \, \Omega$ $X_L = 80 \, \Omega$ $X_C = 40 \, \Omega$
 (tegangan di bawah ini juga nilai efektif)

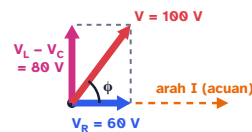
$$V_R = I \cdot R = 2 \times 30 = 60 \text{ V}$$

$$V_L = I \cdot X_L = 2 \times 80 = 160 \text{ V}$$

$$V_C = I \cdot X_C = 2 \times 40 = 80 \text{ V}$$

$$V = \sqrt{60^2 + 80^2} = 100 \text{ V}$$

$$\tan \phi = 80/60 \rightarrow \phi \approx 53^\circ$$



Langkah 6. Jumlahkan dengan Pythagoras: $V = \sqrt{60^2 + 80^2} = 100 \text{ V}$. Tegangan sumber mendahului arus sebesar $\phi \approx 53^\circ$.

RLC seri, arus efektif $I = 2 \text{ A}$
 $R = 30 \, \Omega$ $X_L = 80 \, \Omega$ $X_C = 40 \, \Omega$
 (tegangan di bawah ini juga nilai efektif)

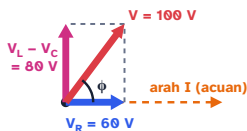
$$V_R = I \cdot R = 2 \times 30 = 60 \text{ V}$$

$$V_L = I \cdot X_L = 2 \times 80 = 160 \text{ V}$$

$$V_C = I \cdot X_C = 2 \times 40 = 80 \text{ V}$$

$$V = \sqrt{60^2 + 80^2} = 100 \text{ V}$$

$$\tan \phi = 80/60 \rightarrow \phi \approx 53^\circ$$



$$\div I \rightarrow Z = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \, \Omega$$

Langkah 7. Bagi semua sisi dengan I : segitiga yang sama berlaku untuk hambatan. Inilah **impedansi** $Z = R^2 + (X_L - X_C)^2 = 50 \, \Omega$.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad \tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R}, \quad I = \frac{V}{Z}$$

Rumus ini bercerita: **impedansi** Z (ohm) adalah "hambatan total" rangkaian AC. R dan selisih reaktansi ($X_L - X_C$) dijumlahkan seperti dua sisi tegak segitiga siku-siku. Sudut ϕ adalah beda fase: positif jika rangkaian bersifat induktif ($X_L > X_C$, tegangan mendahului arus), negatif jika bersifat kapasitif.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Hambatan total AC: R dan selisih reaktansi dijumlahkan seperti sisi-sisi segitiga siku-siku. Pythagoras lagi!

 R Hambatan Ω X_L Reaktansi induktif Ω X_C Reaktansi kapasitif Ω Z Impedansi Ω

IMPEDANSI

50

 Ω

$R = 30 \Omega$, $X_L = 80 \Omega$, $X_C = 40 \Omega$, sehingga $Z = 50 \Omega$. Coba buat X_L sama dengan X_C : impedansi turun menjadi R saja. Itulah resonansi!

Cek satuan: semua besaran dalam ohm, jadi $\sqrt{\Omega^2} = \Omega$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AC-IMPEDANSI](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-ac-impedansi)



AWAS JEBAKAN

Pada contoh di atas, $V_R + V_L + V_C = 60 + 160 + 80 = 300 \text{ V}$, padahal sumbernya hanya 100 V ! Tidak ada yang salah. Voltmeter AC membaca nilai efektif masing-masing, dan ketiga tegangan itu tidak pernah memuncak bersamaan. Jumlahkan sebagai **vektor (fasor)**, bukan sebagai angka biasa.

Resistor $40\ \Omega$, induktor dengan $X_L = 100\ \Omega$, dan kapasitor dengan $X_C = 70\ \Omega$ dipasang seri pada sumber 100 V (efektif). Tentukan impedansi, arus, dan beda fasenya.

- 1 $X_L - X_C = 100 - 70 = 30\ \Omega$ (bersifat induktif).
- 2 $Z = \sqrt{40^2 + 30^2} = \sqrt{2500} = 50\ \Omega$.
- 3 $I = V/Z = 100/50 = 2\text{ A}$.
- 4 $\tan \varphi = 30/40 = 0,75 \Rightarrow \varphi \approx 37^\circ$: tegangan sumber mendahului arus.

$Z = 50\ \Omega$, $I = 2\text{ A}$, $\varphi \approx 37^\circ$. Segitiga 3-4-5 sering muncul di soal: hafalkan polanya!



LANJUT • IB & OLIMPIADE

IMPEDANSI SEBAGAI BILANGAN KOMPLEKS

Fisikawan dan insinyur menulis impedansi sebagai bilangan kompleks: $Z_R = R$, $Z_L = j\omega L$, $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$, dengan $j = \sqrt{-1}$. Rangkaian seri cukup dijumlahkan: $Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$. Besarnya $|Z|$ adalah rumus Pythagoras di atas, dan argumennya adalah φ . Rangkaian paralel dihitung seperti resistor paralel: $\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$. Dengan trik ini, rangkaian AC serumit apa pun diselesaikan seperti rangkaian DC biasa.

26.5 Resonansi: cara radio memilih stasiun

Perhatikan rumus impedansi. Kalau $X_L = X_C$, suku $(X_L - X_C)$ menjadi nol, sehingga $Z = R$. Impedansi mencapai nilai **terkecil** dan arus mencapai nilai **terbesar**. Keadaan istimewa ini disebut **resonansi**. Karena X_L naik dan X_C turun saat frekuensi naik, hanya ada satu frekuensi yang membuat keduanya sama:

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Analoginya ayunan di taman. Kalau kamu mendorong ayunan tepat mengikuti irama alaminya, ayunan makin tinggi. Kalau dorongannya tidak seirama, ayunan hanya bergoyang kecil. Rangkaian LC juga punya "irama alami" f_0 . Sinyal yang frekuensinya sama dengan f_0 membuat arus besar, sedangkan sinyal lain hampir tidak menghasilkan arus.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Setiap pasangan kumparan dan kapasitor punya satu nada favorit. Radio mengubah C supaya nada favoritnya sama dengan frekuensi stasiun.

L Induktansi μH

C Kapasitansi pF

f_0 Frekuensi resonansi MHz

FREKUENSI RESONANSI

98,7

MHz

Dengan $L = 0,1 \mu\text{H}$ dan $C = 26 \text{ pF}$, rangkaian beresonansi pada **98,7 MHz**. Radio FM di Indonesia memakai sekitar 88–108 MHz, sedangkan radio AM sekitar 0,53–1,6 MHz.

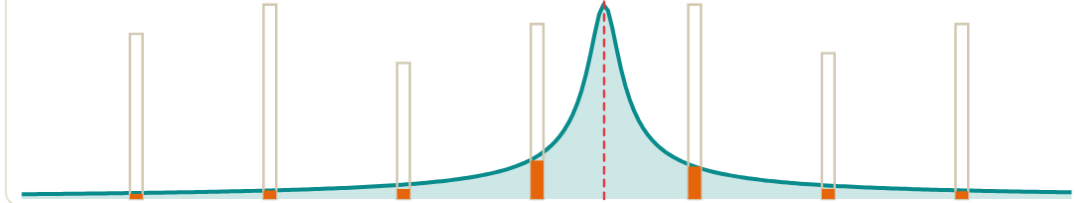
Cek satuan: $\frac{1}{\sqrt{\text{H} \cdot \text{F}}} = \frac{1}{\sqrt{(\Omega \text{ s})(\text{s}/\Omega)}} = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AC-RESONANSI](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-ac-resonansi)

Antena radio menangkap **semua** siaran sekaligus. Di dalam radio, antena terhubung ke rangkaian LC. Saat kamu memutar tombol penala, sebenarnya kamu mengubah kapasitansi C (pada radio lama berupa kapasitor variabel dengan pelat-pelat yang bisa diputar; pada radio digital berupa dioda khusus yang kapasitansinya diatur tegangan). Hanya stasiun yang frekuensinya sama dengan f_0 yang menghasilkan arus besar, lalu diperkuat dan dibunyikan.



respons rangkaian LC (arus relatif) dan kekuatan sinyal tiap stasiun

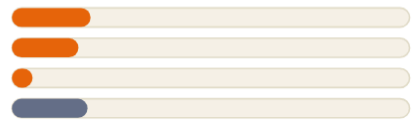


antena



Yang keluar dari speaker:

Radio Pelajar 97,3
Irama Pantura 100,6
Ombak Bahari 103,4
desis (derau)



Frekuensi resonansi
98,7 MHz

Lebar pita Δf
0,64 MHz

Faktor kualitas Q
155

Terdengar
Samar: Radio Pelajar

Seret jarum di papan frekuensi atau geser slider C . Kurva menunjukkan seberapa kuat rangkaian merespons tiap frekuensi. Tekan **Suara** untuk mendengar hasilnya (setiap stasiun berbunyi khas). Lalu besarkan hambatan R : mengapa stasiun-stasiun mulai bercampur?



FISIKA INDONESIA

Di banyak daerah, radio FM masih menjadi sumber informasi utama: berita lokal, info harga panen, jadwal kapal, sampai peringatan dini bencana. Radio komunitas di desa sering memakai pemancar berdaya kecil. Penerimaanya cukup radio murah dengan rangkaian LC yang sama prinsipnya dengan yang kamu mainkan di atas. Saat jaringan internet putus karena gempa atau banjir, radio bertenaga baterai tetap bisa menerima siaran darurat.

Penala radio FM memakai kumparan $L = 0,25 \mu\text{H}$. Berapa kapasitansi yang diperlukan agar radio menangkap stasiun 100 MHz?

1 Dari $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, kuadratkan dan susun ulang: $C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L}$.

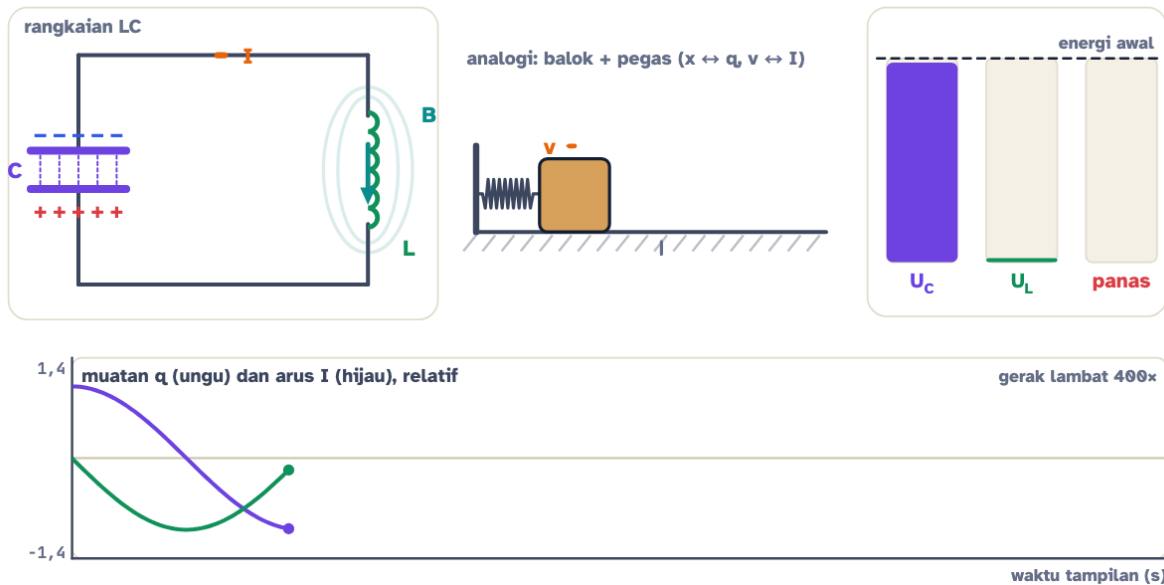
2 $2\pi f_0 = 2\pi \times 10^8 = 6,28 \times 10^8 \text{ rad/s}$, sehingga $(2\pi f_0)^2 = 3,95 \times 10^{17}$.

3 $C = \frac{1}{3,95 \times 10^{17} \times 0,25 \times 10^{-6}} = \frac{1}{9,87 \times 10^{10}} \approx 1,01 \times 10^{-11} \text{ F}$.

$C \approx 10 \text{ pF}$. Untuk menangkap 90 MHz, C harus sedikit lebih besar (sekitar 12,5 pF), karena $f_0 \propto 1/\sqrt{C}$.

Ayunan listrik: osilasi LC

Apa yang terjadi jika kapasitor bermuatan dihubungkan langsung ke kumparan, tanpa sumber? Kapasitor melepas muatan, arus mengalir, dan energinya pindah ke medan magnet kumparan. Kumparan "malas berhenti" (Hukum Lenz), sehingga arus terus mengalir dan mengisi kapasitor dengan kutub terbalik. Lalu semuanya berulang ke arah sebaliknya. Energi berayun bolak-balik antara medan listrik (di kapasitor) dan medan magnet (di kumparan), persis seperti energi potensial dan energi kinetik pada pegas yang berosilasi (Bab 12).

Frekuensi alami f_0

159 Hz

Periode T

6,28 ms

Energi kapasitor

0,98 mJ

Energi kumparan

0,02 mJ

Tekan **Jalankan**. Perhatikan batang energi: kapan energi penuh di kapasitor (ungu), kapan penuh di kumparan (hijau)? Bandingkan dengan balok dan pegas di sebelahnya. Lalu naikan hambatan R . Ke mana energinya pergi?



LANJUT • IB & OLIMPIADE

FAKTOR KUALITAS DAN LEBAR PITA

Persamaan osilasi LC adalah $L\ddot{q} + \frac{q}{C} = 0$, mirip $m\ddot{x} + kx = 0$ pada pegas. Jadi $L \leftrightarrow m$ dan $1/C \leftrightarrow k$, sehingga $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ seperti $\omega_0 = \sqrt{k/m}$. Hambatan R berperan sebagai gesekan.

Ketajaman resonansi diukur dengan **faktor kualitas** $Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{f_0}{\Delta f}$, dengan $\Delta f = \frac{R}{2\pi L}$

adalah **lebar pita** (selang frekuensi tempat daya rangkaian bernilai minimal setengah daya maksimum). Radio yang baik punya Q cukup besar agar stasiun berdekatan tidak bercampur, tetapi tidak terlalu besar agar seluruh lebar siaran satu stasiun tetap tertangkap.

26.6 Daya & faktor daya

Induktor dan kapasitor menyimpan energi selama seperempat periode, lalu **mengembalikannya** ke sumber pada seperempat periode berikutnya. Rata-rata dayanya nol. Yang benar-benar "memakan" energi hanya hambatan. Karena itu daya rata-rata rangkaian AC adalah:

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \varphi$$

Rumus ini bercerita: P (watt) adalah **daya nyata**, yaitu energi per detik yang benar-benar berubah menjadi panas, cahaya, atau gerak. $\cos \varphi$ disebut **faktor daya**: 1 untuk resistor murni (setrika, rice cooker), lebih kecil dari

1 untuk alat yang punya kumparan (pompa air, kipas, kulkas). Hasil kali $S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$ tanpa $\cos \varphi$ disebut **daya semu**, dengan satuan volt-ampere (VA).

RUMUS HIDUP Daya nyata pada rangkaian AC

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \varphi$$

Daya yang benar-benar terpakai = tegangan $\times$ arus $\times$ faktor daya. Kalau arus dan tegangan tidak kompak, sebagian energi hanya mondar-mandir.

V_{rms} Tegangan efektif V

I_{rms} Arus efektif A

$\cos \varphi$ Faktor daya

P Daya nyata W

DAYA NYATA

440

W

Pompa air pada **220 V** menarik arus **2,5 A** dengan faktor daya **0,8**: daya nyatanya **440 W**. Meteran listrik PLN menghitung energi dari daya nyata ini (kWh).

Satuan Nusantara: $\approx 1,1 \times$ rice cooker saat memasak $\cdot \approx 7\%$ dari mesin motor bebek $\cdot \approx 44 \times$ lampu LED

$$\text{Cek satuan: } V \cdot A = \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \frac{\text{C}}{\text{s}} = \text{W}; \text{ faktor daya tidak bersatuan.}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AC-DAYA



FISIKA INDONESIA: KENAPA DAYA RUMAH DITULIS DALAM VA?

Pelanggan PLN memilih daya tersambung seperti 900 VA, 1.300 VA, atau 2.200 VA, bukan watt. Alasannya, yang dibatasi PLN adalah **arus**, lewat pemutus arus (MCB) di dekat meteran. Untuk 1.300 VA, arus maksimumnya $1300/220 \approx 5,9$ A, sehingga dipasang MCB sekitar 6 A. Kalau total arus semua alat melebihi batas itu, MCB memutus listrik: "jeglek!" Alat dengan faktor daya rendah menarik arus lebih besar untuk daya nyata yang sama, sehingga lebih cepat membuat MCB turun. Pelanggan industri besar bahkan bisa dikenai biaya tambahan jika faktor dayanya terlalu rendah.

Rumah berdaya 1.300 VA (220 V) sedang menyalakan rice cooker 400 W (faktor daya 1) dan pompa air yang menarik arus 3,5 A dengan faktor daya 0,75. Bisakah setrika 350 W (faktor daya 1) ikut dinyalakan tanpa membuat MCB turun?

- 1 Batas arus: $I_{\text{maks}} = 1300/220 \approx 5,91$ A.
- 2 Arus rice cooker: $400/220 \approx 1,82$ A, sefase dengan tegangan.
- 3 Arus pompa 3,5 A tertinggal $\varphi = \arccos 0,75 \approx 41,4^\circ$. Komponennya: sefase $3,5 \times 0,75 \approx 2,63$ A, tegak lurus $3,5 \times \sin 41,4^\circ \approx 2,31$ A.
- 4 Arus setrika: $350/220 \approx 1,59$ A, sefase.
- 5 Jumlahkan sebagai fasor: komponen sefase $1,82 + 2,63 + 1,59 = 6,04$ A, komponen tegak lurus 2,31 A. Total $\sqrt{6,04^2 + 2,31^2} \approx 6,5$ A.

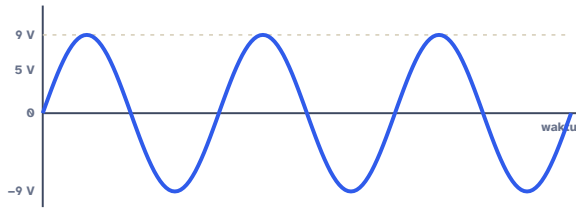
Sekitar 6,5 A, melebihi batas 5,9 A. Setrika sebaiknya menunggu nasi matang, kalau tidak MCB bisa turun! Tanpa setrika, arusnya hanya sekitar 5,0 A. (Kalau arus dijumlahkan biasa, $1,82 + 3,5 + 1,59 \approx 6,9$ A: terlalu besar karena beda fase diabaikan.)

Dulu, lampu TL (neon panjang) memakai **ballast** berupa kumparan besar untuk membatasi arus. Mengapa kumparan, bukan resistor? Resistor membatasi arus sambil membuang energi menjadi panas. Kumparan membatasi arus lewat reaktansinya, dan energinya dikembalikan ke jaringan setiap setengah periode. Hemat! Kumparan semacam ini disebut *choke*.

26.7 Penyearah & adaptor: dari AC ke DC

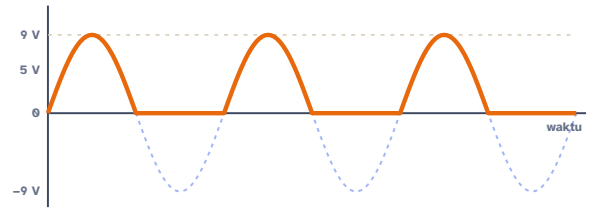
Baterai HP membutuhkan DC sekitar 5 V, sedangkan stopkontak memberi AC 220 V. Charger HP melakukan empat tugas: **menurunkan** tegangan, **menyearahkan** arus, **meratakan** gelombang, dan **menstabilkan** hasilnya. Komponen kuncinya adalah **dioda**, "pintu satu arah" bagi arus listrik. Cara kerja dioda secara lengkap akan kamu pelajari di Bab 32.

① Trafo: AC kecil, puncak 9 V



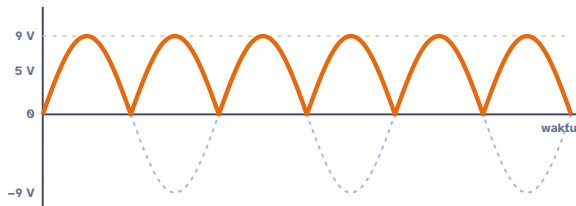
Langkah 1. Dari stopkontak: 220 V AC. Bagian pertama charger menurunkan tegangannya, misalnya menjadi AC dengan puncak 9 V. Arusnya masih bolak-balik.

② 1 dioda: setengah gelombang



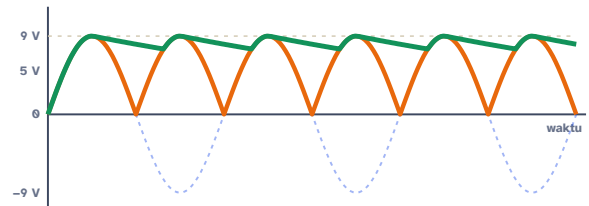
Langkah 2. Satu **dioda** hanya meloloskan arus satu arah. Setengah gelombang negatif dibuang. Hasilnya **penyearah setengah gelombang**: arahnya selalu sama, tetapi separuh waktu kosong.

③ 4 dioda (jembatan): gelombang penuh



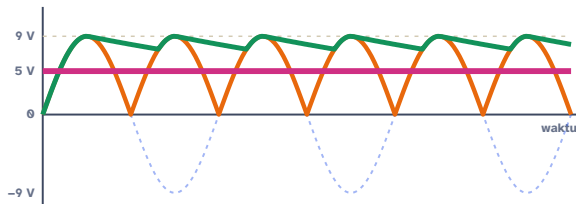
Langkah 3. Empat dioda yang disusun sebagai **jembatan** membalik setengah gelombang negatif menjadi positif. Inilah **penyearah gelombang penuh**. Arahnya selalu sama, tetapi besarnya masih naik-turun 100 kali per detik.

④ Kapasitor: diratakan, sisa riak kecil



Langkah 4. **Kapasitor** besar "menabung" muatan di puncak dan melepasnya saat gelombang turun. Hasilnya hampir rata, dengan sedikit naik-turun yang disebut **riak**.

⑤ Regulator: 5 V DC rata, siap ke HP!



Langkah 5. **Regulator** memangkas riak dan menahan tegangan tetap 5 V. Sekarang listriknya DC rata, siap mengisi baterai HP.



KENAPA CHARGER ZAMAN SEKARANG RINGAN SEKALI?

Charger lama memakai trafo besi yang berat, karena trafo yang bekerja pada 50 Hz butuh inti besar. Charger modern lebih dulu menyearahkan listrik 220 V, lalu "mencacahnya" menjadi AC berfrekuensi puluhan ribu hertz. Pada frekuensi setinggi itu, trafonya cukup sebesar ruas jari. Sistem ini disebut *switch-mode power supply*. Itulah sebabnya charger cepat 65 W pun muat di saku.



Charger HP

Mengubah 220 V AC menjadi sekitar 5 V DC: diturunkan, disearahkan dioda, diratakan kapasitor, lalu distabilkan.



Radio FM

Rangkaian LC di dalamnya beresonansi pada frekuensi satu stasiun saja, sehingga siaran lain tidak terdengar.



Daya rumah dalam VA

PLN membatasi arus lewat MCB. Rumah 1.300 VA memakai MCB sekitar 6 A. Kelebihan beban? "Jeglek!"



Kompur induksi

Kumparnya dialiri AC berfrekuensi puluhan kilohertz. Medan magnet yang berubah sangat cepat memanaskan dasar panci besi (Bab 25).



Speaker aktif

Kapasitor mengirim nada tinggi ke speaker kecil (tweeter), induktor mengirim nada rendah ke speaker besar (woofer). Reaktansi bekerja sebagai pemilah frekuensi.

Cek Cepat

Tegangan efektif listrik PLN 220 V. Tegangan puncaknya kira-kira...

110 V

156 V

220 V

311 V

Jika frekuensi sumber AC dinaikkan, reaktansi sebuah kapasitor akan...

mengecil

membesar

tetap

menjadi nol tepat pada 50 Hz

Rangkaian RLC seri berada dalam keadaan resonansi ketika...

$$R = X_L$$

$$X_C = 0$$

$$X_L = X_C$$

arusnya paling kecil

Kunci Cek Cepat: 1. D • 2. A • 3. C

Tantangan Rumah: memergoki lampu berkedip

Bahan: HP dengan mode video gerak lambat (*slow motion*), beberapa lampu di rumah (LED, TL, pijar), dan senter bertenaga baterai

1. Rekam tiap lampu dari dekat dengan mode gerak lambat, kira-kira 3 detik. **Jangan menyentuh stopkontak atau kabel**; cukup rekam lampunya.
2. Putar ulang videonya. Apakah cahayanya berdenyut terang-redup? Bandingkan lampu-lampu itu dengan senter baterai (DC).
3. Jika HP-mu bisa merekam 240 bingkai per detik, hitung berapa bingkai yang dibutuhkan untuk satu denyut terang-redup.

Pertanyaan: Lampu yang berdenyut biasanya berkedip **100** kali per detik, bukan 50. Mengapa? (Petunjuk: lihat grafik di subbab 26.1. Berapa kali dalam satu periode tegangannya mencapai puncak, kalau tanda plus-minus diabaikan?) Mengapa senter tidak berkedip, dan mengapa lampu pijar hampir tidak berkedip?

 RINGKASAN KILAT **Bab 26 dalam 3 menit**

✓ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **AC** dan **DC**, lalu membaca frekuensi, periode, nilai puncak, dan **nilai efektif (rms)** listrik PLN
- menjelaskan perilaku **resistor, induktor, dan kapasitor** pada AC lewat reaktansi dan beda fase
- menggambar **diagram fasor** dan menghitung **impedansi** rangkaian RLC seri
- menghitung **frekuensi resonansi** dan menjelaskan cara radio memilih stasiun
- menghitung **daya dan faktor daya**, serta memahami cara adaptor HP mengubah AC menjadi DC

🔑 Istilah kunci

arus searah

arus bolak-balik

nilai efektif

reaktansi

fasor

impedansi

resonansi

faktor daya

dioda

📖 Rumus penting

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

Nilai efektif (rms) tegangan AC. Tegangan efektif = tegangan puncak dibagi akar dua, kira-kira 0,707 kali puncaknya.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Reaktansi kapasitif. Makin tinggi frekuensinya atau makin besar kapasitornya, makin mudah arus AC melewati kapasitor.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Impedansi rangkaian RLC seri. Hambatan total AC: R dan selisih reaktansi dijumlahkan seperti sisi-sisi segitiga siku-siku. Pythagoras lagi!

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Frekuensi resonansi penala radio. Setiap pasangan kumparan dan kapasitor punya satu nada favorit. Radio mengubah C supaya nada favoritnya sama dengan frekuensi stasiun.

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \varphi$$

Daya nyata pada rangkaian AC. Daya yang benar-benar terpakai = tegangan × arus × faktor daya. Kalau arus dan tegangan tidak kompak, sebagian energi hanya mondar-mandir.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Multimeter dan label alat listrik selalu memakai nilai efektif.
- Pada contoh di atas, $V_R + V_L + V_C = 60 + 160 + 80 = 300 \text{ V}$, padahal sumbernya hanya 100 V!

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=26

Teka-teki untuk Bab 27

Rangkaian LC di radiomu beresonansi pada 100 MHz. Tetapi bagaimana sinyal dari pemancar sampai ke antena radiomu **tanpa kabel sama sekali**, bahkan menembus dinding kamar? Lalu apa hubungannya dengan cahaya senter?

▼ Intip petunjuk

Muatan listrik yang bergetar bolak-balik di antena pemancar "melemparkan" pasangan medan listrik dan medan magnet ke udara. Seorang fisikawan bernama Maxwell menghitung kecepatan lemparan itu, dan hasilnya sama persis dengan kecepatan cahaya. Kebetulan? Jawabannya ada di Bab 27: Gelombang Elektromagnetik.

27 Gelombang Elektromagnetik: Satu Keluarga, Banyak Wajah

Pesan dari Palembang sampai di Jayapura dalam sekejap. Oven microwave memanaskan sayur, sinar matahari menghangatkan kulit, dan sinar X memotret tulang. Ternyata semuanya saudara kandung: gelombang listrik dan magnet yang saling menggendong.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan bagaimana **Maxwell** menyatukan listrik, magnet, dan cahaya, termasuk ide **arus pergeseran**;
- menjelaskan terbentuknya gelombang EM dari **muatan yang bergetar**, serta hubungan arah E , B , dan arah rambat;
- menghitung dengan $c = \lambda f$, $E = cB$, dan $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$;
- mengurutkan **spektrum elektromagnetik** serta menyebut kegunaan dan bahaya tiap jenisnya;
- menghitung **intensitas** $I = P/(4\pi r^2)$ dan menjelaskan cara kerja BTS, satelit, dan radar cuaca.

PESAN KE PAPUA

KOMIK • 4 PANEL

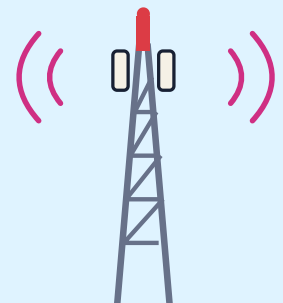
Palembang, pukul 19.00

RAKA

Terkirim! Pesanku ke sepupu di Jayapura langsung centang dua. Pesannya naik apa, sih?

**SARI**

Lewat gelombang radio ke menara BTS, lalu kabel serat optik di dasar laut. Isinya sama-sama gelombang **elektromagnetik**!



Di dapur

RAKA

Tunggu... sinyal HP, microwave Ibu, dan sinar matahari itu bersaudara?!

TARSI

Fakta unik: semuanya melaju ± 300.000 km per detik!



KAK NARA

Betul! Semuanya gelombang elektromagnetik. Bedanya cuma panjang gelombangnya. Yuk, kenalan dengan keluarga besarnya!



Tebak Dulu!

Di ruang hampa, mana yang merambat paling cepat: gelombang radio, cahaya tampak, atau sinar X?

Sinar X, karena energinya paling besar.

Gelombang radio, karena gelombangnya paling panjang sehingga "langkahnya" lebar.

Cahaya tampak, karena itulah "cahaya" yang sesungguhnya.

Semuanya sama cepat, sekitar 300.000 km per detik.

Semuanya sama cepat. Di ruang hampa, semua gelombang elektromagnetik melaju dengan kecepatan cahaya $c \approx 3 \times 10^8$ m/s, apa pun panjang gelombangnya. Gelombang radio memang "melangkah" lebar (panjang gelombangnya besar), tetapi jumlah langkahnya per detik sedikit (frekuensinya kecil). Hasil kali keduanya selalu $c = \lambda f$.

27.1 Maxwell menyatukan listrik, magnet, dan cahaya

Di Bab 25 kamu bertemu Faraday: **medan magnet yang berubah menimbulkan medan listrik**. Itulah dasar generator dan trafo. Sekitar tahun 1860-an, James Clerk Maxwell bertanya kebalikannya: apakah **medan listrik yang berubah juga menimbulkan medan magnet**?

Contohnya kapasitor yang sedang diisi. Di kabel ada arus, dan di sekitarnya ada medan magnet. Di celah antara pelat kapasitor tidak ada satu elektron pun yang menyeberang, tetapi medan listriknya terus bertambah. Maxwell menyimpulkan bahwa medan listrik yang berubah itu berperilaku seperti arus. Ia menyebutnya **arus pergeseran**. Pengukuran kemudian membuktikan bahwa di sekitar celah kapasitor memang ada medan magnet, persis seperti di sekitar kabelnya.

Bahasa sederhana • Gampangnya: **listrik yang berubah membuat magnet, dan magnet yang berubah membuat listrik**. Keduanya seperti dua sahabat yang bergantian saling menggendong. Karena saling menghasilkan, mereka bisa terus melaju sendiri, tanpa kabel, bahkan di ruang hampa. Itulah gelombang elektromagnetik.

Hukum	Isinya dalam bahasa sehari-hari	Contoh
1. Gauss (listrik)	Muatan listrik menghasilkan medan listrik. Garis medannya keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif.	rambut berdiri setelah disisir (Bab 22)
2. Gauss (magnet)	Tidak ada kutub magnet tunggal. Garis medan magnet selalu berupa lintasan tertutup.	magnet dipotong dua tetap punya kutub U dan S
3. Faraday	Medan magnet yang berubah menimbulkan medan listrik.	generator, trafo, kompor induksi (Bab 25)
4. Ampère–Maxwell	Arus listrik dan medan listrik yang berubah menimbulkan medan magnet.	elektromagnet; medan di celah kapasitor

Hukum 3 dan 4 bersama-sama meramalkan sesuatu yang luar biasa. Gangguan listrik-magnet bisa menjalar sendiri sebagai gelombang. Maxwell menghitung kecepatannya dari dua tetapan yang diukur di laboratorium listrik dan magnet, dan hasilnya sekitar 3×10^8 m/s. Angka itu sama dengan kecepatan cahaya yang sudah diukur sebelumnya. Kesimpulan Maxwell: **cahaya adalah gelombang elektromagnetik**.



TAMU DARI MASA LALU

James Clerk Maxwell (1831–1879) dari Skotlandia menerbitkan teori lengkapnya pada 1865. Saat itu belum ada yang pernah membuat gelombang elektromagnetik buatan. Baru pada 1887–1888, Heinrich Hertz di Jerman membuktikannya: percikan listrik di satu alat membuat percikan kecil di alat lain di seberang ruangan, tanpa kabel penghubung. Satuan frekuensi "hertz" diambil dari namanya. Konon, ketika ditanya apa gunanya penemuan itu, Hertz menjawab bahwa penemuannya tidak ada gunanya. Sekarang, setiap HP di sakumu memakai gelombang Hertz!

**HUKUM AMPÈRE-MAXWELL**

Hukum Ampère lama berbunyi $\oint B \cdot dl = \mu_0 I$. Maxwell menambahkan arus pergeseran $I_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$, dengan Φ_E adalah fluks medan listrik:

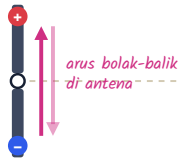
$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \left(I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right).$$

Untuk kapasitor pelat sejajar yang diisi arus I , medan di celah $E = \frac{q}{\varepsilon_0 A}$, sehingga $\varepsilon_0 \frac{d(EA)}{dt} = \frac{dq}{dt} = I$. Arus pergeseran di celah tepat sama dengan arus di kabel, sehingga "arus" tidak terputus di kapasitor.

27.2**Bagaimana gelombang EM terbentuk: muatan yang bergetar**

Muatan yang **diam** hanya punya medan listrik yang tenang. Muatan yang bergerak dengan kecepatan **tetap** membawa medan listrik dan medan magnet, tetapi tidak memancarkan gelombang. Gelombang baru lahir saat muatan **dipercepat**, misalnya bergetar bolak-balik.

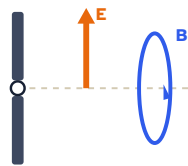
Bayangkan medan listrik sebagai helai-helai rambut panjang yang menempel pada muatan. Kalau kepalamu diam, rambut juga diam. Kalau kepalamu digoyang ke kiri dan ke kanan, "lekukan" menjalar sepanjang helai rambut, menjauhi kepala. Lekukan pada medan listrik itulah gelombang elektromagnetik. Bedanya, lekukan ini melaju dengan kecepatan cahaya.



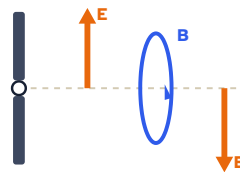
Langkah 1. Arus bolak-balik dari pemancar mendorong elektron di antenna naik-turun. Ujung antenna bergantian bermuatan positif dan negatif.



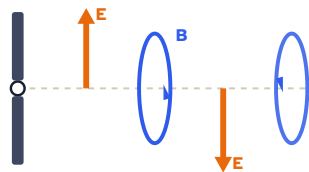
Langkah 2. Muatan yang berubah-ubah membuat **medan listrik** E di dekat antenna ikut berubah.



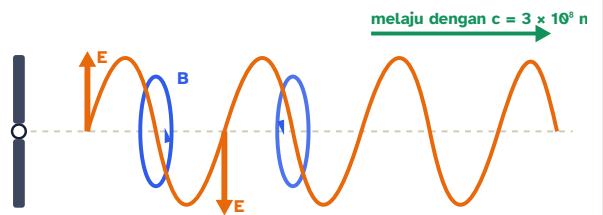
Langkah 3. Hukum Ampère–Maxwell: medan listrik yang berubah menimbulkan **medan magnet** B yang melingkar.



Langkah 4. Hukum Faraday: medan magnet yang berubah menimbulkan medan listrik baru, sedikit lebih jauh, dengan arah berlawanan.



Langkah 5. Medan listrik baru itu menimbulkan medan magnet baru lagi, dan seterusnya...

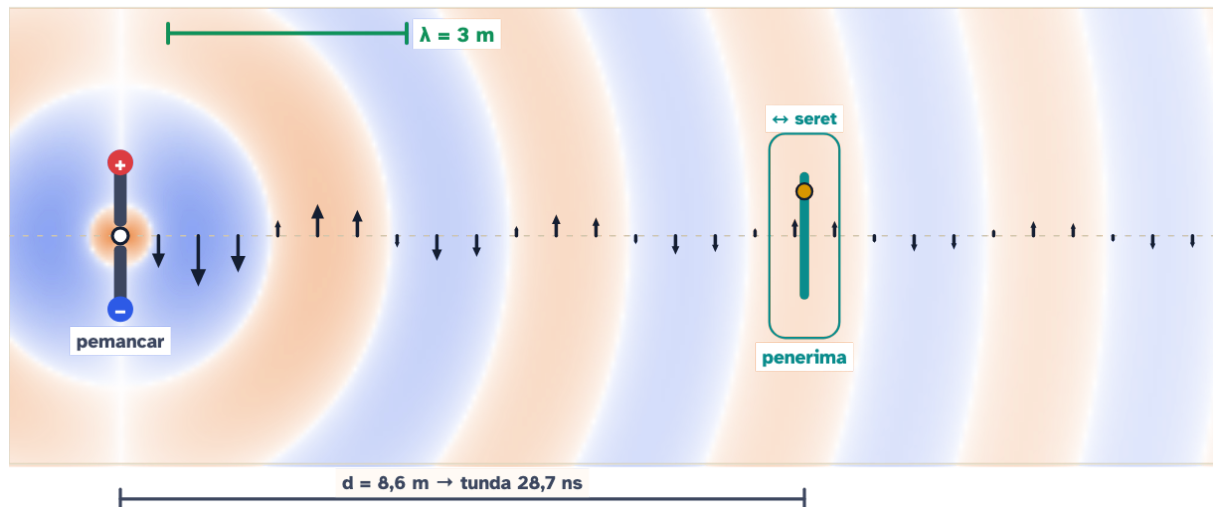


Langkah 6. Rantai "listrik → magnet → listrik → ..." ini melaju menjauhi antenna dengan kecepatan cahaya. Inilah **gelombang elektromagnetik**, dan frekuensinya sama dengan frekuensi arus di antenna.

skala: 50 px = 1 m • gerak super lambat

E ke atas

E ke bawah



Panjang gelombang λ
3 m

Jarak penerima
8,6 m

Tunda = jarak/c
28,7 ns

Penerima

Elektron bergoyang (kuat medan $\propto 1/d$)

Warna oranye berarti medan listrik mengarah ke atas, biru ke bawah. Seret **antena penerima** menjauh, lalu amati tundanya. Putar penerima menjadi **mendatar**: apakah elektronnya masih bergoyang? Tekan untuk menghentikan getaran muatan. Apa yang terjadi pada gelombang yang sudah terlanjur dipancarkan? Perhatikan juga: di atas dan di bawah antenna, medannya hampir nol.



AWAS JEBAKAN

Gelombang EM **tidak membutuhkan medium**. Bunyi butuh udara, gelombang laut butuh air, tetapi gelombang EM justru paling cepat di ruang hampa. Karena itu cahaya Matahari bisa sampai ke Bumi melewati 150 juta km ruang hampa, sedangkan suara ledakan di permukaan Matahari tidak akan pernah terdengar di Bumi.



KENAPA ANTENA HP KECIL DAN ANTENA RADIO AM PANJANG?

Antena bekerja paling baik jika panjangnya sekitar setengah atau seperempat panjang gelombang yang dipancarkan atau diterima. Sinyal HP 4G sekitar 1.800 MHz punya $\lambda \approx 17$ cm, jadi antenanya cukup beberapa sentimeter dan tersembunyi di dalam bodi HP. Radio AM 1 MHz punya $\lambda = 300$ m, sehingga menara pemancar AM tingginya puluhan sampai ratusan meter.

27.3

Kecepatan cahaya dan hubungan E dengan B

Dari persamaan-persamaannya, Maxwell menemukan bahwa kecepatan gelombang EM hanya bergantung pada dua tetapan alam:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(1,257 \times 10^{-6})(8,854 \times 10^{-12})}} \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Rumus ini bercerita: ϵ_0 (permitivitas ruang hampa, F/m) mengukur seberapa "mudah" ruang diisi medan listrik, dan μ_0 (permeabilitas ruang hampa, T·m/A) mengukur hal yang sama untuk medan magnet. Kedua angka ini diukur dengan kapasitor dan kumparan, tanpa senter sama sekali. Tetapi hasilnya adalah kecepatan cahaya!

RUMUS HIDUP Kecepatan gelombang EM dari Maxwell

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

Kecepatan cahaya ditentukan oleh dua sifat ruang: seberapa mudah ruang dimasuki medan magnet dan medan listrik.

μ Permeabilitas $\times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$

ϵ Permitivitas $\times 10^{-12} \text{ F/m}$

v Kecepatan gelombang m/s

KECEPATAN GELOMBANG

$2,998 \times 10^8$
m/s

Dengan $\mu = 12,566 \times 10^{-7}$ dan $\epsilon = 8,854 \times 10^{-12}$, gelombang EM melaju **$2,998 \times 10^8$** m/s. Coba ubah ϵ menjadi 2,25 kali nilai awalnya (sekitar 19,92): cahaya melambat menjadi $\pm 2 \times 10^8$ m/s, seperti di dalam kaca.

Satuan Nusantara: $\approx 100\%$ dari cahaya

$$\text{Cek satuan: } \frac{1}{\sqrt{(\text{T m/A})(\text{F/m})}} = \frac{1}{\sqrt{\text{s}^2/\text{m}^2}} = \text{m/s}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-EM-MAXWELL

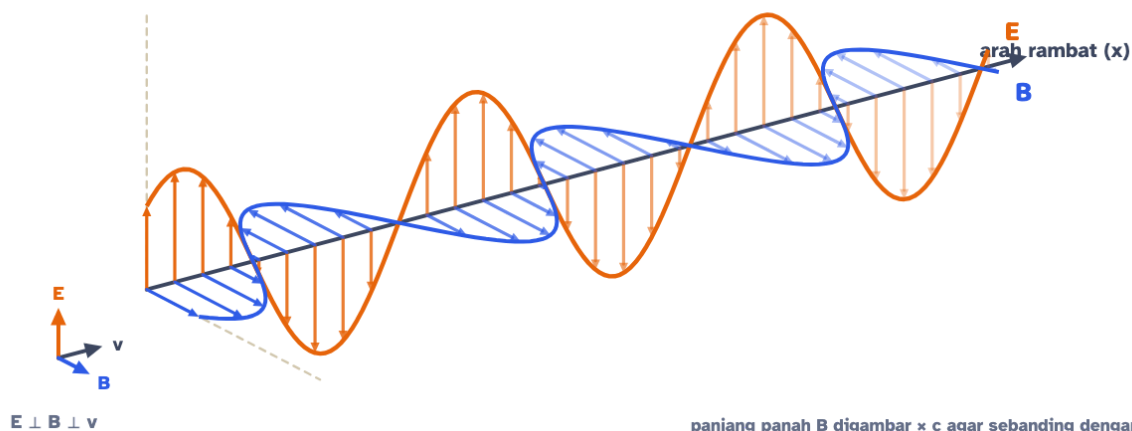
Dalam gelombang EM, medan listrik E dan medan magnet B selalu **tegak lurus** satu sama lain, dan keduanya tegak lurus arah rambat. Jadi gelombang EM adalah **gelombang transversal**. Keduanya juga **sefase**: mencapai puncak bersama, melewati nol bersama.

$$E = E_0 \sin(kx - \omega t), \quad B = B_0 \sin(kx - \omega t), \quad \frac{E_0}{B_0} = c, \quad c = \frac{\omega}{k} = \lambda f$$

LAB MINI Gelombang EM 3D: E dan B menari bersama

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-27

↳ seret untuk memutar



E_0

600 V/m

$B_0 = E_0/c$

2,001 μT

E_0/B_0

$2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$

Arah rambat

$E \times B \rightarrow +x$

Seret gambar untuk memutar sudut pandang. Coba pandangan **dari depan**: kamu melihat gelombang datang ke arahmu, dengan E naik-turun dan B kiri-kanan. Lalu bandingkan angka E_0 dan B_0 . Mengapa B_0 begitu kecil?

$$E = cB$$

Medan listrik = kecepatan cahaya $\times$ medan magnet. Karena c sangat besar, medan magnet gelombang EM selalu terlihat mungil.

 B Medan magnet μT E Medan listrik V/m

MEDAN LISTRIK

1.019 V/m

Medan magnet **3,4** μT dalam gelombang EM selalu ditemani medan listrik **1.019** V/m . Untuk sinar matahari terik, E_0 sekitar 1.000 V/m .

$$\text{Cek satuan: } \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{T} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{N}}{\text{A m}} = \frac{\text{N}}{\text{A s}} = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-EM-ECB



TRIK KAK NARA: TANGAN KANAN

Arah rambat gelombang EM adalah arah $E \times B$. Arahkan empat jari tangan kananmu ke E , lalu tekuk ke arah B . Ibu jarimu menunjuk arah rambat. Kalau E ke atas dan B keluar dari layar, gelombang melaju ke kanan.

27.4

Spektrum elektromagnetik: keluarga besar

Semua gelombang EM melaju dengan kecepatan c di ruang hampa. Yang membedakan anggota keluarga ini hanya **panjang gelombang** λ (atau frekuensi f). Hubungannya sama dengan gelombang mana pun (Bab 18):

$$c = \lambda f$$

Rumus ini bercerita: λ (meter) adalah jarak antara dua puncak, f (hertz) adalah jumlah puncak yang lewat per detik, dan hasil kalinya selalu $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Frekuensi tinggi berarti gelombang pendek, dan sebaliknya.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Panjang gelombang = kecepatan cahaya dibagi frekuensi. Makin tinggi frekuensinya, makin pendek gelombangnya.

 f

Frekuensi MHz

 λ

Panjang gelombang m

PANJANG GELOMBANG

2,998

m

Pemancar **100** MHz memancarkan gelombang sepanjang **2,998** m. Coba: FM 100 MHz → ±3 m; 4G 1.800 MHz → ±17 cm; Wi-Fi 2.400 MHz → ±12,5 cm.

Satuan Nusantara: $\approx 2 \times$ tinggi Raka · $\approx 3\%$ dari panjang lapangan sepak bola · $\approx 2\%$ dari tinggi Monas

$$\text{Cek satuan: } \frac{\text{m/s}}{\text{Hz}} = \frac{\text{m/s}}{1/\text{s}} = \text{m}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-EM-LAMBDA](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-EM-LAMBDA)

Jenis	Panjang gelombang	Frekuensi	Sumber	Kegunaan
Gelombang radio	> 1 m	$< 3 \times 10^8$ Hz	antena pemancar	radio AM/FM, TV, HT, radio kapal
Gelombang mikro	1 mm – 1 m	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^{11}$ Hz	antena HP & BTS, magnetron	HP, Wi-Fi, oven microwave, radar, satelit
Inframerah	700 nm – 1 mm	$3 \times 10^{11} - 4,3 \times 10^{14}$ Hz	semua benda hangat, LED remote	remote TV, kamera termal, serat optik
Cahaya tampak	400 – 700 nm	$4,3 - 7,5 \times 10^{14}$ Hz	Matahari, lampu, layar	penglihatan, fotosintesis, fotografi

Ultraviolet (UV)	10 – 400 nm	$7,5 \times 10^{14}$ – 3×10^{16} Hz	Matahari, lampu UV	sterilisasi, cek uang, pembentukan vitamin D
Sinar X	0,01 – 10 nm	3×10^{16} – 3×10^{19} Hz	tabung sinar X	rontgen, CT scan, pemeriksaan bagasi
Sinar gamma	< 0,01 nm	$> 3 \times 10^{19}$ Hz	inti radioaktif, ledakan bintang	radioterapi kanker, sterilisasi alat medis



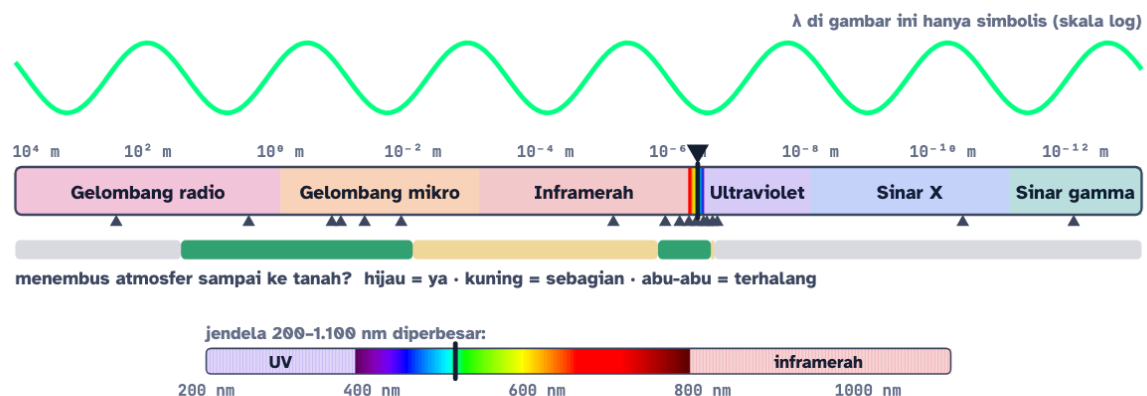
TRIK KAK NARA: URUTAN KELUARGA

Dari gelombang terpanjang ke terpendek: **R**ajin **M**andi **I**tu **T**anda **U**ntuk **eX**tra **G**anteng → **R**adio, **M**ikro, **I**nframerah, **T**ampak, **U**ltraviolet, sinar **X**, **G**amma. Dari kiri ke kanan, frekuensi dan energinya makin besar.

LAB MINI

Jelajah spektrum: dari radio sampai gamma

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-27



Cahaya tampak

$$\lambda = 501 \text{ nm} \quad \cdot \quad f = 598 \text{ THz}$$

Ukuran pembanding: 🦠 sebuah bakteri ($\pm 1 \mu\text{m}$)

● **Cahaya hijau ($\pm 530 \text{ nm}$)**

Mata manusia paling peka di sekitar warna ini.

Non-pengion: efek utamanya pada tubuh hanya pemanasan.

Panjang gelombang λ

501 nm

Frekuensi f

598 THz

Energi foton (Bab 28)

2,474 eV

Jenis

Cahaya tampak

Geser slider atau ketuk pita spektrum. Perhatikan ukuran pembandingnya: gelombang HP kira-kira sebesar HP itu sendiri! Temukan juga bagian mana yang bisa menembus atmosfer sampai ke tanah. Kenapa astronom harus menaruh teleskop sinar X di luar angkasa?



BATASNYA TIDAK TAJAM

Batas antarjenis dalam tabel hanyalah kesepakatan. Gelombang mikro dan radio saling bersambung tanpa garis tegas. Sinar X dan sinar gamma bahkan bisa punya panjang gelombang yang sama; namanya dibedakan berdasarkan **asalnya**: sinar X dari elektron yang diperlambat atau melompat di kulit atom, sinar gamma dari inti atom.

27.5 Kegunaan dan bahaya

Anggota keluarga EM dengan frekuensi tinggi (UV jauh, sinar X, gamma) membawa "paket energi" yang cukup besar untuk melepas elektron dari atom. Radiasi ini disebut **radiasi pengion**. Ia dapat merusak sel dan DNA, sehingga paparannya harus dibatasi. Radio, gelombang mikro, inframerah, dan cahaya tampak termasuk **radiasi non-pengion**: efek utamanya pada tubuh hanyalah pemanasan. Kenapa yang menentukan adalah frekuensi, bukan kekuatan sinarnya? Jawabannya ada di Bab 28.



Tebak Dulu!

Kamu bermain di pantai saat langit berawan. Udaranya sejuk dan tidak terasa terik. Mengapa kulitmu tetap bisa terbakar?

Karena panas inframerah menembus awan dan memanggang kulit.

Karena sebagian besar sinar UV tetap menembus awan, padahal UV-lah yang membakar kulit, bukan rasa panasnya.

Karena angin laut membuat kulit kering dan merah.

Karena pasir memantulkan panas ke kulit.

Sinar UV tetap lolos. Rasa hangat berasal terutama dari inframerah, yang banyak ditahan awan. Tetapi kulit terbakar (kemerahan, perih) disebabkan oleh **UV-B**, dan sebagian besar UV masih menembus awan tipis. Pasir, air, dan permukaan terang malah memantulkan sebagian UV ke kulitmu. Jadi tabir surya tetap perlu, walaupun cuaca tidak terasa panas.



FISIKA INDONESIA: INDEKS UV TROPIS

Indonesia berada di sekitar khatulistiwa, sehingga Matahari siang hari hampir tegak lurus di atas kepala dan sinar UV menempuh lapisan udara yang tipis. Pada siang yang cerah, **indeks UV** di banyak kota Indonesia sering mencapai kategori "sangat tinggi" sampai "ekstrem" (8 ke atas), terutama antara pukul 10.00 dan 14.00. Lindungi dirimu dengan topi, baju berlengan, kacamata hitam, dan tabir surya, terutama saat upacara, berolahraga, atau ke pantai.

MITOS

"Makanan yang dipanaskan dengan microwave menjadi radioaktif."

FAKTA

Gelombang mikro hanya membuat molekul air di makanan bergoyang sehingga makanan panas. Begitu oven dimatikan, tidak ada radiasi yang tersisa. Gelombang mikro juga tidak cukup kuat untuk mengubah inti atom.

MITOS

"Kalau mendung, kita aman dari sinar UV."

FAKTA

Sebagian besar UV menembus awan tipis. Rasa sejuk membuat kita lengah dan berjemur lebih lama. Gunakan tabir surya walaupun langit berawan.

MITOS

"Radiasi HP sama berbahayanya dengan sinar X."

FAKTA

Paket energi gelombang mikro HP sekitar sejuta kali lebih kecil daripada yang dibutuhkan untuk merusak ikatan molekul, sedangkan sinar X jauh di atasnya. Penelitian sejauh ini tidak menemukan bukti kuat bahaya HP, tetapi batas paparannya tetap diatur.

Sinar X di rumah sakit menembus jaringan lunak tetapi diserap tulang, sehingga tulang tampak terang pada foto rontgen. Satu kali foto rontgen dada memberi dosis yang kecil, kira-kira setara radiasi alam yang kita terima selama beberapa hari. Petugas radiologi tetap berlindung di balik dinding berlapis timbal, karena mereka bekerja dengan sinar X setiap hari.

27.6 Energi dan intensitas gelombang EM

Gelombang EM membawa energi. Buktinya, kulitmu hangat di bawah Matahari dan panel surya menghasilkan listrik. Ukurannya adalah **intensitas** I : daya yang menembus setiap meter persegi bidang yang tegak lurus arah rambat (W/m^2). Sumber titik memancarkan daya P ke segala arah. Daya itu tersebar di permukaan bola yang makin besar, sehingga:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Rumus ini bercerita: jika jarakmu dari sumber menjadi 2 kali, intensitasnya tinggal $\frac{1}{4}$; jika 10 kali, tinggal $\frac{1}{100}$. Itulah **hukum kuadrat terbalik**.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Intensitas = daya dibagi luas permukaan bola. Menjauh dua kali, sinyal tinggal seperempat.

 P

Daya pemancar W

 r

Jarak m

 I Intensitas W/m^2

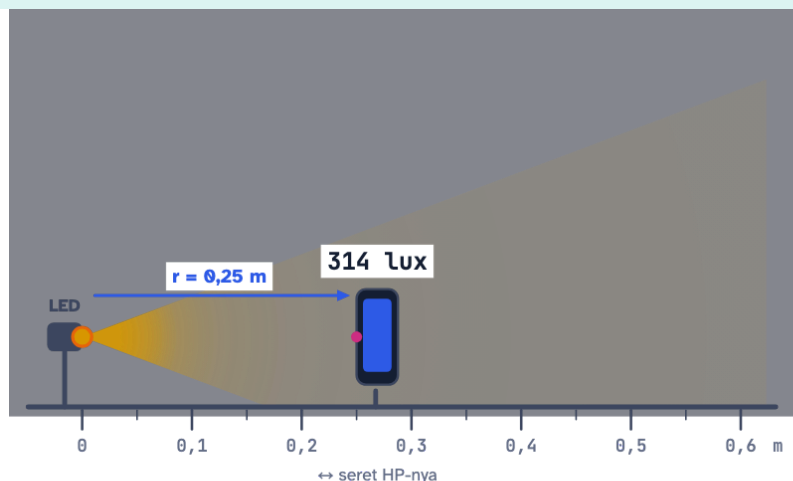
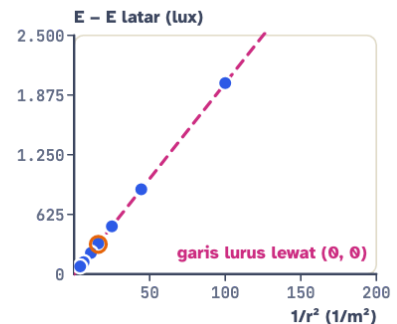
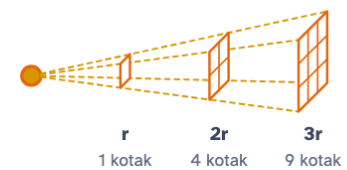
INTENSITAS

$$3,18 \times 10^{-6}$$
 W/m^2

Pemancar **40 W** pada jarak **1.000 m** memberi intensitas **$3,18 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$** . Bandingkan dengan sinar matahari siang: sekitar **1.000 W/m^2** . HP tetap bisa menangkap sinyal yang miliaran kali lebih lemah!

Cek satuan: $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$: joule per detik per meter persegi.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-EM-INTENSITAS

Cahaya sama, luas sebaran = r^2 

Terbaca sensor

314 lux $E - E_{\text{latar}}$ **312 lux** $(E - E_{\text{latar}}) \times r^2$ **19,5 lux · m²**Kemiringan grafik $1/r^2$ **20 cd**

Data tercatat

7

Seret HP-nya menjauhi lampu. Saat jaraknya menjadi 2 kali, angka lux tinggal kira-kira $\frac{1}{4}$. Tekan **Catat data** di 0,10; 0,15; 0,20; 0,30; dan 0,50 m, lalu ganti grafiknya. Grafik E terhadap $1/r^2$ menjadi garis lurus, dan kemiringannya adalah kuat cahaya lampu. Nyalakan lampu kamar: kenapa cahaya latar harus dikurangkan dulu?

CONTOH

Panjang gelombang radio FM

Stasiun radio FM memancar pada 100 MHz. Berapa panjang gelombangnya?

1 $f = 100 \text{ MHz} = 1,00 \times 10^8 \text{ Hz.}$

2 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8}{1,00 \times 10^8} = 3,0 \text{ m.}$

$\lambda = 3,0 \text{ m}$, kira-kira dua kali tinggi badanmu. Antena teleskopik radio sepanjang $\pm 75 \text{ cm}$ adalah antena seperempat gelombang.

Matahari memancarkan daya $3,8 \times 10^{26} \text{ W}$ ke segala arah. Jarak Bumi–Matahari $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$. Berapa intensitas sinar matahari di atas atmosfer Bumi?

1 Luas bola berjari-jari jarak Bumi–Matahari: $4\pi r^2 = 4\pi(1,5 \times 10^{11})^2 \approx 2,83 \times 10^{23} \text{ m}^2$.

2 $I = \frac{3,8 \times 10^{26}}{2,83 \times 10^{23}} \approx 1,3 \times 10^3 \text{ W/m}^2$.

Sekitar **1.300 W/m²** (nilai terukur $\pm 1.361 \text{ W/m}^2$). Setelah melewati atmosfer, yang sampai ke tanah saat siang cerah sekitar **1.000 W/m²**. Inilah "bahan bakar" panel surya.

Energi gelombang tersimpan di medan listrik dan medan magnetnya, dengan porsi yang sama besar. Rata-ratanya memberi hubungan intensitas dengan amplitudo medan listrik:

$$I = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2$$

Sinar matahari di permukaan Bumi berintensitas $1,0 \times 10^3 \text{ W/m}^2$. Hitung amplitudo medan listrik E_0 dan medan magnet B_0 -nya.

1 $E_0 = \sqrt{\frac{2I}{c \varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{2 \times 1000}{(3,0 \times 10^8)(8,85 \times 10^{-12})}} = \sqrt{7,53 \times 10^5}$.

2 $E_0 \approx 868 \text{ V/m}$.

3 $B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{868}{3,0 \times 10^8} \approx 2,9 \times 10^{-6} \text{ T} = 2,9 \mu\text{T}$.

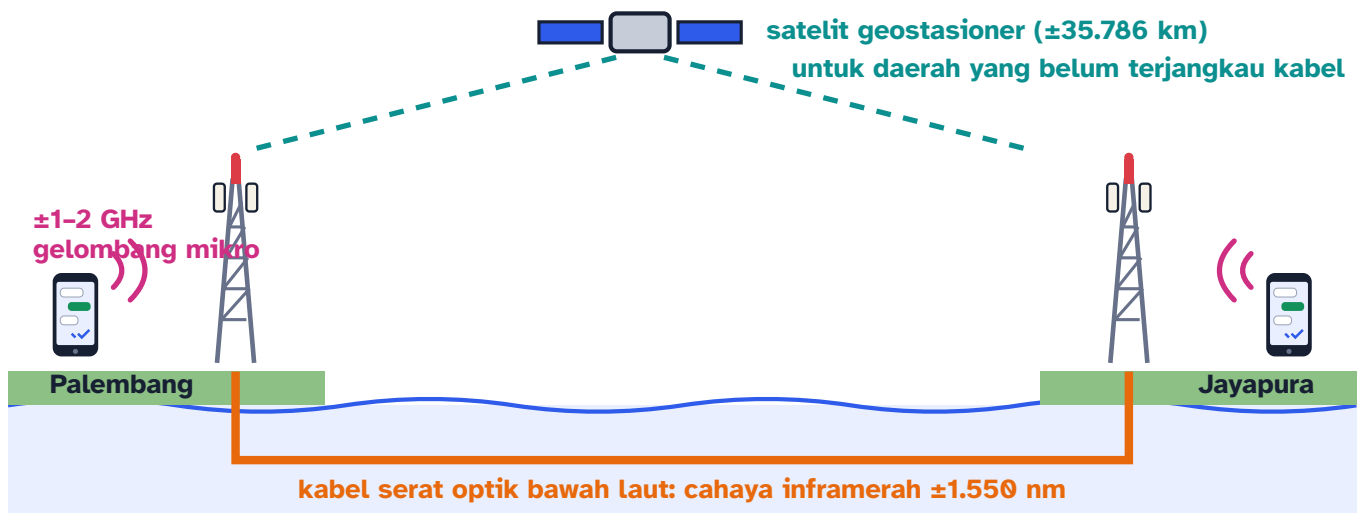
$E_0 \approx 870 \text{ V/m}$ dan $B_0 \approx 2,9 \mu\text{T}$, kira-kira **1/14** medan magnet Bumi. Medannya bergetar sekitar 5×10^{14} kali per detik, jadi kompas tidak sempat merasakannya.

**CAHAYA BISA MENDORONG: TEKANAN RADIASI**

Gelombang EM tidak hanya membawa energi U , tetapi juga momentum $p = U/c$. Jika diserap seluruhnya, cahaya memberi tekanan $P_{\text{rad}} = I/c$. Jika dipantulkan sempurna, $P_{\text{rad}} = 2I/c$, karena arah momentumnya berbalik. Untuk sinar matahari (1.361 W/m^2) yang dipantulkan cermin: $P_{\text{rad}} = 2(1361)/(3 \times 10^8) \approx 9 \mu\text{Pa}$, sangat kecil. Tetapi di ruang hampa tanpa gesekan, dorongan sekecil itu bekerja terus-menerus. Wahana IKAROS milik Jepang (2010) berhasil berlayar memakai "layar surya" seluas $\pm 200 \text{ m}^2$ yang didorong cahaya Matahari.

27.7**Telekomunikasi Indonesia: gelombang EM menyatukan Nusantara**

Indonesia terdiri atas belasan ribu pulau. Menghubungkan semuanya dengan kabel tembaga hampir mustahil, jadi gelombang EM menjadi tulang punggung komunikasi. Ikuti perjalanan pesan Raka dari Palembang ke Jayapura:



Pesan berpindah wujud beberapa kali: gelombang mikro dari HP ke BTS, cahaya inframerah di serat optik, lalu gelombang mikro lagi. Daerah terpencil memakai satelit. (Gambar tidak berskala.)

**FISIKA INDONESIA**

Palapa Ring adalah jaringan kabel serat optik nasional sepanjang lebih dari 12.000 km yang menghubungkan pulau-pulau dari Sumatra sampai Papua, sebagian besar melintasi dasar laut. Daerah yang belum terjangkau kabel dilayani **BTS desa** dan satelit, termasuk satelit internet **SATRIA-1** yang diluncurkan pada 2023 untuk sekolah, puskesmas, dan kantor desa. Sementara itu, **radar cuaca BMKG** memancarkan gelombang mikro untuk "melihat" awan hujan dari jarak ratusan kilometer.

Radar cuaca memancarkan pulsa gelombang mikro. Gema dari awan hujan kembali setelah $400 \mu\text{s}$. Berapa jarak awan itu?

1 Pulsa menempuh jarak pergi-pulang: $2d = ct$.

2
$$d = \frac{ct}{2} = \frac{(3,0 \times 10^8)(400 \times 10^{-6})}{2} = \frac{1,2 \times 10^5}{2} = 6,0 \times 10^4 \text{ m.}$$

Awan hujan berada 60 km dari radar. Dengan memutar antenanya, radar memetakan hujan di sekelilingnya; perubahan frekuensi gemanya (efek Doppler) bahkan bisa mengukur kecepatan angin di dalam awan.

Sinyal telepon dari Merauke dikirim ke satelit geostasioner (tinggi $\pm 35.786 \text{ km}$ di atas khatulistiwa), lalu diteruskan ke Jakarta. Anggap satelit tepat di atas kedua tempat. Berapa tunda minimum sinyal satu arah? Mengapa percakapan lewat satelit terasa "berjeda"?

1 Jarak tempuh satu arah: naik lalu turun $\approx 2 \times 35\,786 \text{ km} \approx 7,16 \times 10^7 \text{ m}$.

2
$$t = \frac{d}{c} = \frac{7,16 \times 10^7}{3,0 \times 10^8} \approx 0,24 \text{ s.}$$

3 Jawaban lawan bicara menempuh perjalanan yang sama kembali, jadi jeda bolak-balik minimal $\pm 0,48 \text{ s}$, ditambah waktu pengolahan.

Tunda satu arah sekitar 0,24 s. Hampir setengah detik jeda bolak-balik cukup untuk membuat dua orang saling memotong pembicaraan. Kabel serat optik antarpulau jauh lebih pendek jalurnya, jadi tundanya hanya puluhan milidetik.

Kenapa teknologi 5G butuh BTS lebih rapat? Frekuensi yang lebih tinggi membawa data lebih banyak per detik, tetapi gelombangnya lebih mudah diserap dinding, pepohonan, dan hujan. Jangkauannya pendek, jadi perlu banyak pemancar kecil.



Radar cuaca BMKG

Memancarkan pulsa gelombang mikro dan mendengarkan gemanya dari butiran hujan untuk memetakan hujan dan badai.



Satelit komunikasi

Menerima gelombang mikro dari Bumi lalu memancarkannya kembali ke pulau-pulau yang jauh, termasuk ke kapal di tengah laut.



Termometer tembak

Mengukur suhu dahi dari radiasi inframerah yang dipancarkan kulit, tanpa menyentuh.



Rontgen

Sinar X menembus otot tetapi diserap tulang, sehingga dokter bisa melihat tulang yang patah.



Remote TV

LED di ujungnya berkedip-kedip memancarkan inframerah sekitar 940 nm. Tak terlihat mata, tetapi terlihat kamera HP!



Oven microwave

Gelombang mikro 2,45 GHz menggoyang molekul air, sehingga makanan memanaskan sampai beberapa sentimeter di bawah permukaannya.

Cek Cepat

Urutan dari panjang gelombang terpanjang ke terpendek yang benar adalah...

sinar X, ultraviolet, cahaya tampak, radio

radio, inframerah, cahaya tampak, sinar gamma

gamma, sinar X, ultraviolet, radio

cahaya tampak, radio, sinar X, inframerah

Stasiun radio FM memancar pada 100 MHz. Panjang gelombangnya...

100 m

30 m

0,3 m

3 m

Gelombang elektromagnetik dipancarkan oleh...

muatan listrik yang dipercepat, misalnya bergetar

muatan listrik yang diam

magnet batang yang diam

arus searah yang tetap besarnya

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. D • 3. A



Tantangan Rumah: mengukur kecepatan cahaya dengan cokelat

Bahan: oven microwave (dengan izin dan pendampingan orang dewasa), piring datar tahan panas, sebatang cokelat atau beberapa lembar keju, penggaris

1. Minta orang dewasa melepas piring putar oven, agar makanan **tidak berputar**. Jangan pernah memasukkan benda logam dan jangan menyalakan oven dalam keadaan kosong.
2. Letakkan cokelat di atas piring datar, lalu panaskan selama 15–25 detik saja.
3. Keluarkan dengan hati-hati (piring bisa panas). Kamu akan melihat beberapa titik yang meleleh, sedangkan bagian lain masih keras. Ukur jarak d antara dua titik leleh yang berdekatan.
4. Baca frekuensi oven di label belakangnya (biasanya 2.450 MHz).

Pertanyaan: Di dalam oven terbentuk gelombang berdiri (Bab 18). Jarak antara dua titik "terpanas" adalah setengah panjang gelombang, jadi $\lambda = 2d$. Hitung $c = \lambda f = 2df$. Seberapa dekat hasilmu dengan 3×10^8 m/s? Mengapa piring putar dalam oven justru berguna untuk memasak?



RINGKASAN KILAT

Bab 27 dalam 3 menit

✓ **Kamu sekarang bisa...**

- menjelaskan bagaimana **Maxwell** menyatukan listrik, magnet, dan cahaya, termasuk ide **arus pergeseran**
- menjelaskan terbentuknya gelombang EM dari **muatan yang bergetar**, serta hubungan arah E , B , dan arah rambat
- menghitung dengan $c = \lambda f$, $E = cB$, dan $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$
- mengurutkan **spektrum elektromagnetik** serta menyebut kegunaan dan bahaya tiap jenisnya
- menghitung **intensitas** $I = P/(4\pi r^2)$ dan menjelaskan cara kerja BTS, satelit, dan radar cuaca

🔑 **Istilah kunci**

arus pergeseran

gelombang transversal

radiasi pengion

intensitas

📖 **Rumus penting**

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

Kecepatan gelombang EM dari Maxwell.

Kecepatan cahaya ditentukan oleh dua sifat ruang: seberapa mudah ruang dimasuki medan magnet dan medan listrik.

$$E = cB$$

Medan listrik dan medan magnet dalam

gelombang EM. Medan listrik = kecepatan cahaya × medan magnet. Karena c sangat besar, medan magnet gelombang EM selalu terlihat mungil.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Panjang gelombang pemancar. Panjang gelombang = kecepatan cahaya dibagi frekuensi. Makin tinggi frekuensinya, makin pendek gelombangnya.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Intensitas dari sumber titik. Intensitas = daya dibagi luas permukaan bola. Menjauh dua kali, sinyal tinggal seperempat.

⚠ **Jangan sampai terjebak**

- Gelombang EM tidak membutuhkan medium.

📄 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=27

Teka-teki untuk Bab 28

Cahaya adalah gelombang elektromagnetik; Maxwell dan Hertz sudah membuktikannya. Tetapi ada yang aneh. Sinar UV yang **redup** bisa langsung melepaskan elektron dari pelat logam, sedangkan cahaya merah yang **sangat terang** tidak bisa melepaskan satu elektron pun, berapa lama pun disorotkan. Kalau cahaya adalah gelombang, bukankah gelombang yang lebih besar seharusnya lebih kuat?

▼ Intip petunjuk

Bagaimana jika energi cahaya tidak mengalir mulus seperti air, melainkan datang dalam "butiran" kecil, dan besar setiap butir bergantung pada frekuensinya? Albert Einstein memenangkan Hadiah Nobel karena ide ini. Simak di Bab 28: Kuantum, Foton, dan Gelombang Materi.

28 Kuantum: Cahaya Berbutir, Elektron Bergelombang

Kenapa cahaya merah seterang apa pun tidak sanggup melepaskan satu elektron dari pelat seng, sedangkan sinar UV yang redup langsung bisa? Jawabannya mengguncang fisika pada awal abad ke-20, dan kini menyalakan panel surya di atap rumah.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan krisis **radiasi benda hitam** dan ide **kuanta** Planck, $E = hf$;
- menjelaskan **efek fotolistrik**: frekuensi ambang, fungsi kerja, tegangan henti, dan $E_{k,\text{maks}} = hf - \phi$;
- menghitung energi dan momentum **foton** dalam joule dan elektronvolt;
- menghitung **panjang gelombang de Broglie** dan menjelaskan dualisme gelombang-partikel lewat celah ganda elektron;
- menjelaskan cara kerja **panel surya**, **sensor kamera**, dan **mikroskop elektron**.

LAMPU REDUP MENANG!

KOMIK • 4 PANEL

Lab sekolah

KAK NARA

Pelat seng di atas elektroskop ini bermuatan negatif, makanya daunnya mekar. Siapa bisa membuat elektronnya kabur pakai cahaya?

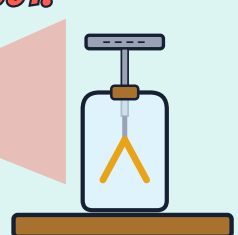


RAKA

Gampang! Lampu sorot merah super terang ini pasti bisa. Rasakan ini!



SYUUUT!



Lima menit kemudian...

RAKA

Lho?! Sudah lima menit, daunnya tetap mekar!

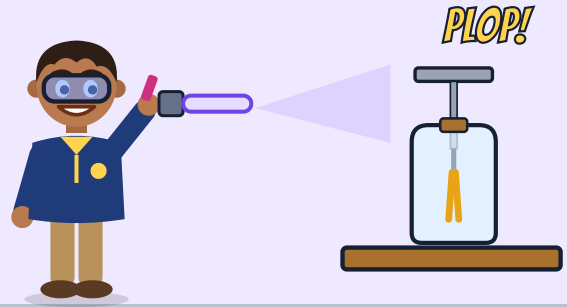
SARI

Mungkin masalahnya bukan soal terang...



KAK NARA

Lampu UV kecil ini redup, tapi daunnya langsung kuncup! Cahaya datang dalam **butiran energi**. Inilah awal fisika kuantum!



Catatan keselamatan: lampu UV-C (lampu kuman) berbahaya bagi mata dan kulit. Demonstrasi seperti ini hanya dilakukan guru dengan kacamata pelindung khusus.



Tebak Dulu!

Cahaya merah yang sangat terang disorotkan ke pelat seng bermuatan negatif, tetapi tidak satu elektron pun lepas. Apa yang terjadi jika cahaya merah itu dibuat sepuluh kali lebih terang?

Elektron mulai lepas, karena energi cahayanya kini cukup besar.

Elektron lepas setelah ditunggu cukup lama, karena energinya menumpuk sedikit demi sedikit.

Tetap tidak ada elektron yang lepas.

Pelat justru menjadi lebih negatif.

Tetap tidak ada yang lepas. Cahaya datang dalam butiran energi yang disebut **foton**. Cahaya yang lebih terang berarti foton lebih **banyak**, bukan foton yang lebih **kuat**. Setiap elektron hanya menyerap satu foton dalam satu waktu, dan foton merah terlalu "lemah" untuk melepaskan elektron dari seng. Seribu kali lebih terang pun tetap gagal. Inilah teka-teki yang dipecahkan Einstein pada 1905.

28.1 Radiasi benda hitam: krisis fisika klasik

Semua benda memancarkan gelombang EM sesuai suhunya. Pandai besi yang menempa golok tahu betul: besi yang dipanaskan mula-mula merah tua, lalu oranye, lalu kuning keputihan. Makin panas benda, makin terang ia bersinar dan makin pendek panjang gelombang cahaya terkuatnya.

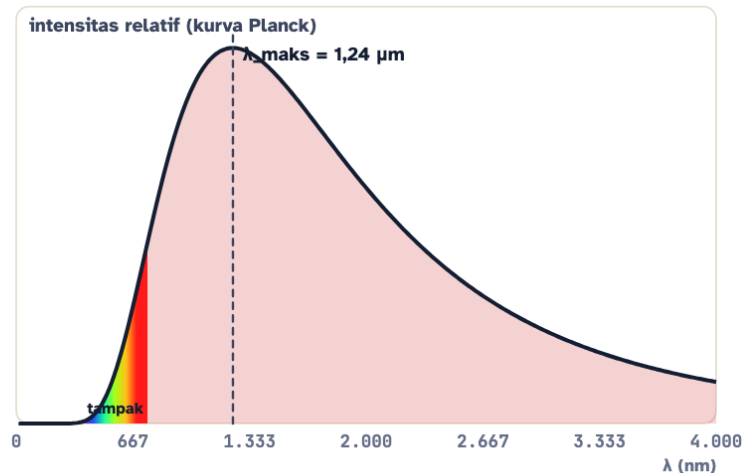
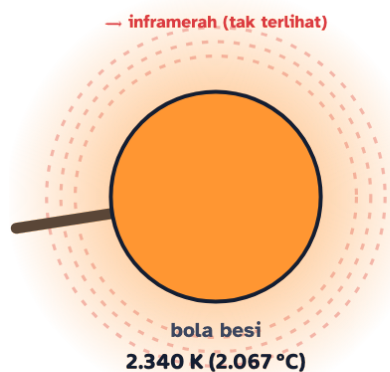
Bahasa sederhana • Tubuhmu pun "bersinar"! Hanya saja sinarnya inframerah, yang tak terlihat mata. Kamera termal di bandara bisa melihatnya. Benda yang lebih panas, seperti kawat kompor listrik, mulai bersinar merah. Matahari jauh lebih panas lagi, sehingga sinarnya putih terang.

Fisikawan mempelajari **benda hitam**: benda ideal yang menyerap semua cahaya yang mengenainya, sehingga cahaya yang dipancarkannya hanya bergantung pada suhu. Panjang gelombang puncak pancarannya mengikuti **hukum pergeseran Wien**:

$$\lambda_{\text{maks}} T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m K}$$

Benda	Suhu	λ_{maks}	Yang terlihat
Tubuh manusia	$\pm 310 \text{ K}$ (37 °C)	$\pm 9,4 \text{ }\mu\text{m}$	tidak berpendar; hanya terlihat kamera termal
Kawat kompor listrik	$\pm 1.000 \text{ K}$	$\pm 2,9 \text{ }\mu\text{m}$	merah redup
Filamen lampu pijar	$\pm 2.800 \text{ K}$	$\pm 1,0 \text{ }\mu\text{m}$	kuning kemerahan (sebagian besar energinya inframerah!)
Permukaan Matahari	$\pm 5.800 \text{ K}$	$\pm 500 \text{ nm}$	putih
Bintang Rigel	$\pm 12.000 \text{ K}$	$\pm 240 \text{ nm}$	putih kebiruan

Masalahnya muncul saat fisikawan menghitung bentuk spektrum ini dengan fisika klasik (teori Rayleigh–Jeans). Hasil hitungan cocok untuk gelombang panjang, tetapi untuk gelombang pendek, intensitasnya terus naik tanpa batas. Artinya, setiap benda hangat seharusnya memancarkan energi tak terhingga dalam bentuk ultraviolet dan sinar X! Jelas tidak masuk akal. Krisis ini dijuluki **bencana ultraviolet**.

Puncak λ_{maks} **1,24 μm**

Tampak berwarna

kuning-oranyeDaya pancar per m^2 (σT^4) **$1,7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$**

Tekan **Jalankan** untuk memanaskan besi perlahan, atau geser suhunya. Perhatikan puncak kurva bergeser ke kiri saat suhu naik. Lalu nyalakan **ramalan fisika klasik**: di sebelah mana teori lama gagal total?

28.2 Planck dan kuantum energi

Pada tahun 1900, Max Planck menemukan rumus yang cocok sempurna dengan data, tetapi dengan satu syarat yang aneh: energi pancaran tidak boleh bernilai sembarang. Energi hanya boleh dipancarkan dalam "paket" atau **kuanta** sebesar

$$E = hf, \quad h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Rumus ini bercerita: energi satu paket E (joule) sebanding dengan frekuensi f (hertz). Pengalinya adalah **tetapan Planck** h , angka yang sangat kecil. Analoginya uang logam: kamu bisa membayar Rp1.000 atau Rp1.500 dengan koin Rp500, tetapi tidak bisa membayar Rp1.250. Bagi gelombang EM berfrekuensi f , "koin" energinya bernilai hf . Karena h sangat kecil, butir-butirnya tidak terasa dalam kehidupan sehari-hari, seperti butiran gula pasir yang terlihat mulus dari kejauhan.



TAMU DARI MASA LALU

Max Planck (1858–1947) sendiri tidak yakin dengan idenya. Ia menyebut langkah itu "tindakan putus asa" dan berharap suatu hari ada penjelasan klasik. Penjelasan itu tidak pernah datang. Lima tahun kemudian, Albert Einstein yang berusia 26 tahun menganggap serius butiran energi ini: menurutnya, cahaya itu sendiri memang terdiri atas butiran, yang kemudian disebut **foton**. Planck menerima Nobel Fisika 1918.

Energi satu foton sangat kecil dalam joule, jadi fisikawan memakai satuan **elektronvolt** (eV): energi yang diperoleh satu elektron saat dipercepat beda potensial 1 volt. $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$. Karena $f = c/\lambda$, energi

foton juga bisa ditulis $E = hc/\lambda$.

RUMUS HIDUP

Energi satu foton

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Energi satu butir cahaya ditentukan warnanya: makin pendek gelombangnya (makin ke arah biru dan ungu), makin besar energinya.

 λ

Panjang gelombang nm

 E

Energi foton eV

ENERGI FOTON

2,339

eV

Satu foton **530** nm membawa energi **2,339** eV. Ikatan kimia dalam kulit dan DNA kira-kira beberapa eV. Itulah sebabnya foton UV bisa merusak sel, sedangkan foton inframerah hanya menghangatkan.

Cek satuan: $hc = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J s})(2,998 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1,986 \times 10^{-25} \text{ J m} \approx 1240 \text{ eV nm}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-KUANTUM-FOTON



TRIK KAK NARA: ANGKA SAKTI 1240

Hafalkan $E \text{ (eV)} \times \lambda \text{ (nm)} \approx 1240$. Foton 620 nm (oranye) berenergi $1240/620 = 2,0$ eV. Foton 248 nm (UV) berenergi 5,0 eV. Tanpa kalkulator, tanpa pangkat sepuluh!

Gelombang	λ	Energi satu foton
Radio FM	3 m	$4 \times 10^{-7} \text{ eV}$
Oven microwave	12 cm	$1 \times 10^{-5} \text{ eV}$
Inframerah remote TV	940 nm	1,3 eV
Cahaya merah	700 nm	1,8 eV

Cahaya ungu	400 nm	3,1 eV
UV-C lampu kuman	254 nm	4,9 eV
Sinar X rontgen	0,05 nm	±25.000 eV

CONTOH Energi foton hijau

Hitung energi satu foton cahaya hijau 500 nm, dalam joule dan dalam elektronvolt.

$$1 \quad E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,63 \times 10^{-34})(3,00 \times 10^8)}{500 \times 10^{-9}} \approx 3,98 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$2 \quad \text{Dalam eV: } \frac{3,98 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} \approx 2,5 \text{ eV. Dengan angka sakti: } 1240/500 = 2,48 \text{ eV. Cocok!}$$

Satu foton hijau membawa sekitar 4×10^{-19} J atau 2,5 eV. Lampu LED 1 W memancarkan miliaran miliar foton setiap detik.

28.3 Efek fotolistrik: Einstein memecahkan teka-teki

Cahaya yang mengenai logam dapat melepaskan elektron dari permukaannya. Peristiwa ini disebut **efek fotolistrik**, dan elektron yang lepas disebut **fotoelektron**. Dalam percobaan, logam dipasang di dalam tabung hampa sebagai **katode**, berhadapan dengan **anode**. Elektron yang sampai ke anode menghasilkan arus yang terbaca amperemeter. Hasil pengamatannya membingungkan para ahli teori gelombang:

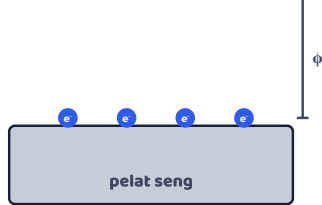
1. **Ada frekuensi ambang f_0 .** Di bawah frekuensi itu, tidak ada elektron yang lepas, seterang apa pun cahayanya.
2. **Energi kinetik maksimum elektron bergantung pada frekuensi**, bukan pada kecerahan cahaya.
3. **Kecerahan (intensitas) hanya menambah jumlah elektron**, sehingga arusnya bertambah.
4. **Tidak ada jeda waktu.** Elektron lepas seketika, bahkan saat cahayanya sangat redup.

Menurut teori gelombang, cahaya terang seharusnya selalu bisa melepaskan elektron, asal ditunggu cukup lama. Einstein (1905) menjawab dengan model **foton**: setiap foton membawa energi hf dan memberikan **seluruh** energinya kepada **satu** elektron. Elektron butuh energi minimum ϕ , yang disebut **fungsi kerja**, untuk keluar dari logam. Sisanya menjadi energi gerak:

$$E_{k,\text{maks}} = hf - \phi, \quad eV_0 = E_{k,\text{maks}}, \quad f_0 = \frac{\phi}{h}$$

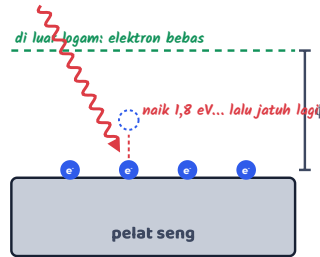
Rumus ini bercerita: hf adalah "uang saku" yang dibawa satu foton, ϕ adalah "ongkos keluar" dari logam (eV atau J), dan sisanya adalah energi kinetik elektron tercepat. Elektron yang berada lebih dalam butuh ongkos lebih besar, sehingga keluar lebih lambat. V_0 adalah **tegangan henti**: tegangan balik yang tepat cukup untuk menghentikan elektron tercepat, sehingga arusnya nol.

di luar logam: elektron bebas



Pelat seng: $\phi = 4,3 \text{ eV}$
("ongkos keluar" elektron)

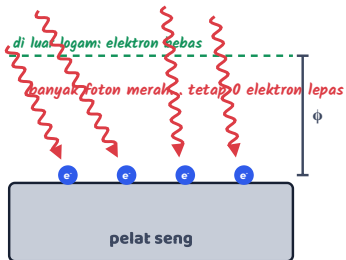
Langkah 1. Elektron di dalam pelat seng terikat. Untuk keluar, setiap elektron harus "membayar" energi minimal $\phi = 4,3 \text{ eV}$, yaitu fungsi kerja seng.



Pelat seng: $\phi = 4,3 \text{ eV}$
("ongkos keluar" elektron)

Foton merah 690 nm:
 $E = 1240/690 \approx 1,8 \text{ eV}$
 $1,8 < 4,3 \rightarrow \text{gagal}$

Langkah 2. Datang satu foton merah (690 nm). Energinya hanya 1,8 eV. Elektron terguncang sedikit, lalu kembali. Tidak ada yang lepas.



Pelat seng: $\phi = 4,3 \text{ eV}$
("ongkos keluar" elektron)

Foton merah 690 nm:
 $E = 1240/690 \approx 1,8 \text{ eV}$
 $1,8 < 4,3 \rightarrow \text{gagal}$
 $10 \times \text{lebih terang} = 10 \times \text{lebih banyak foton, tiap foton tetap } 1,8 \text{ eV}$

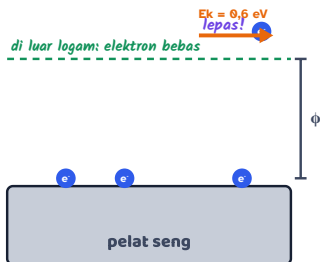
Langkah 3. Cahaya merah dibuat sepuluh kali lebih terang: fotonnya sepuluh kali lebih banyak. Tetapi setiap foton tetap 1,8 eV, dan energi dari beberapa foton tidak bisa ditabung oleh satu elektron. Tetap gagal!



Pelat seng: $\phi = 4,3 \text{ eV}$
("ongkos keluar" elektron)

Foton merah 690 nm:
 $E = 1240/690 \approx 1,8 \text{ eV}$
 $1,8 < 4,3 \rightarrow \text{gagal}$
 $10 \times \text{lebih terang} = 10 \times \text{lebih banyak foton, tiap foton tetap } 1,8 \text{ eV}$
Foton UV-C 254 nm: 4,9 eV
 $4,9 > 4,3 \rightarrow \text{lepas!}$

Langkah 4. Kini datang satu foton UV-C (254 nm) dengan energi 4,9 eV. Lebih besar daripada 4,3 eV, jadi elektron langsung lepas dari permukaan.



Pelat seng: $\phi = 4,3 \text{ eV}$
("ongkos keluar" elektron)

Foton merah 690 nm:
 $E = 1240/690 \approx 1,8 \text{ eV}$
 $1,8 < 4,3 \rightarrow \text{gagal}$
 $10 \times \text{lebih terang} = 10 \times \text{lebih banyak foton, tiap foton tetap } 1,8 \text{ eV}$
Foton UV-C 254 nm: 4,9 eV
 $4,9 > 4,3 \rightarrow \text{lepas!}$
 $4,9 = 4,3 + 0,6 \text{ (eV)}$

Langkah 5. Sisa energinya menjadi energi gerak: $hf = \phi + E_{k,\text{maks}}$, yaitu $4,9 = 4,3 + 0,6 \text{ eV}$. Inilah persamaan fotolistrik Einstein.

$$E_{k,\text{maks}} = hf - \phi$$

Energi gerak elektron tercepat = energi satu foton dikurangi ongkos keluar dari logam.

 λ

Panjang gelombang cahaya nm

 ϕ

Fungsi kerja logam eV

 $E_{k,\text{maks}}$

Energi kinetik maksimum eV

ENERGI KINETIK MAKSIMUM

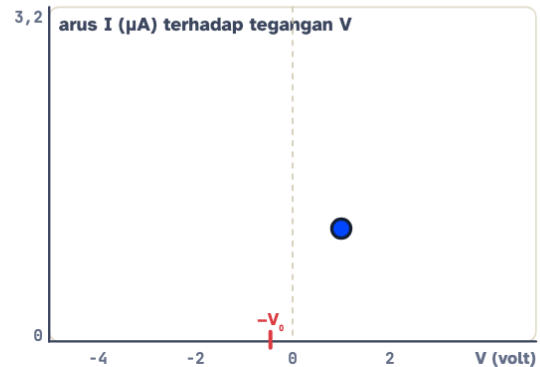
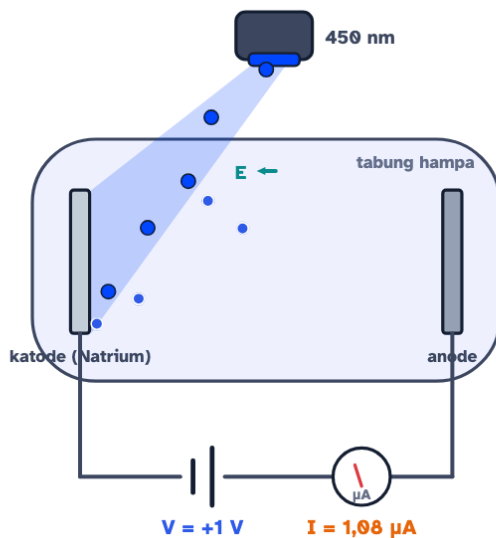
0,8

eV

Foton **400** nm pada logam berfungsi kerja **2,3** eV menghasilkan elektron tercepat berenergi **0,8** eV, jadi tegangan hentinya **0,8** V. Kalau hasilnya **0**, tidak ada elektron yang lepas!

Cek satuan: 1 eV adalah energi satu elektron yang dipercepat 1 volt = $1,602 \times 10^{-19}$ J. Karena itu energi dalam eV sama dengan tegangan henti dalam volt.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-KUANTUM-EINSTEIN](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-kuantum-einstein)



$$hf = 1240 / 450 = 2,76 \text{ eV}$$

$$\phi (\text{Natrium}) = 2,3 \text{ eV}$$

$$E_{k \text{ maks}} = 2,76 - 2,3 = 0,46 \text{ eV} \rightarrow V_0 = 0,46 \text{ V}$$

Energi foton hf **2,76 eV** $E_{k \text{ maks}}$ **0,46 eV**Tegangan henti V_0 **0,46 V**

Arus

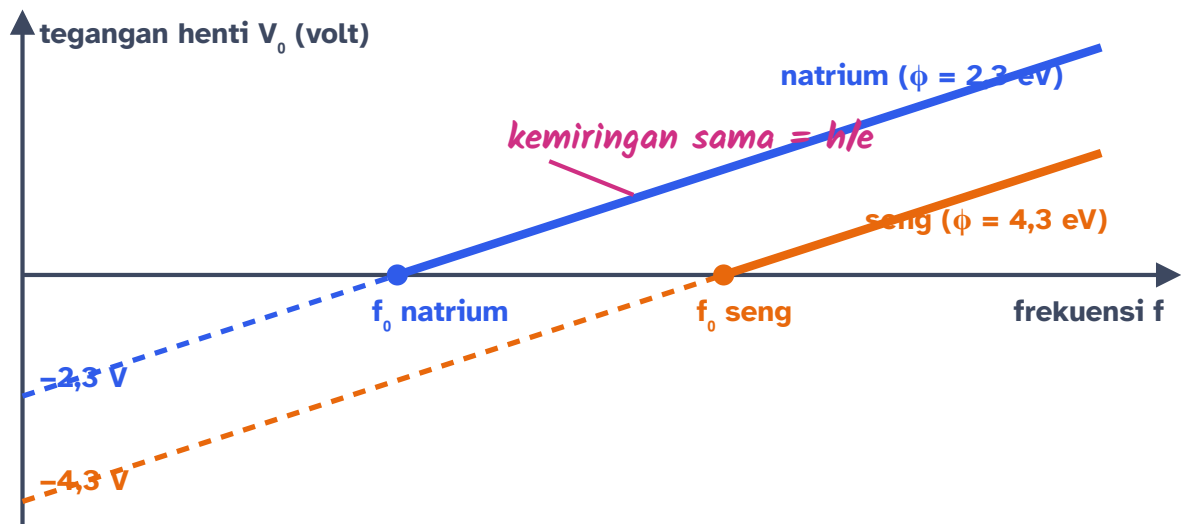
1,08 μA

Keadaan

Semua elektron sampai anode

Mulailah dengan natrium dan cahaya biru. Ubah tegangan menjadi negatif sampai arusnya tepat nol: itulah tegangan henti. Tekan **Rekam kurva I-V**, lalu ulangi dengan kecerahan berbeda dan warna berbeda. Kurva mana yang memotong sumbu di titik yang sama? Coba juga seng dengan cahaya merah 100% terang.

Logam	Fungsi kerja ϕ (kira-kira)	Panjang gelombang ambang $\lambda_0 = hc/\phi$	Bisa dilepas cahaya tampak?
Sesium	2,1 eV	±590 nm (kuning)	ya, hampir semua warna kecuali merah-oranye
Natrium	2,3 eV	±540 nm (hijau)	hanya hijau, biru, ungu
Kalsium	2,9 eV	±430 nm (ungu-biru)	hanya ungu
Seng	4,3 eV	±290 nm (UV)	tidak; perlu UV
Tembaga	4,7 eV	±260 nm (UV)	tidak; perlu UV



Gratik V_0 terhadap f : garis lurus untuk setiap logam, semuanya sejajar dengan kemiringan h/e . Titik potong dengan sumbu f adalah frekuensi ambang; perpanjangannya memotong sumbu V_0 di $-\phi/e$. Dari grafik inilah Millikan mengukur tetapan Planck.



AWAS JEBAKAN

Intensitas $\neq$ energi foton. Cahaya yang lebih terang memberi lebih banyak foton, sehingga **arus** lebih besar. Tetapi tegangan henti dan energi kinetik maksimum **tidak berubah**, karena energi setiap foton tetap. Yang mengubah energi tiap foton hanyalah frekuensi (warna) cahaya.

KERJAKAN BERSAMA

Natrium disinari cahaya ungu

Cahaya ungu 400 nm menyinari natrium ($\phi = 2,3 \text{ eV}$). Tentukan energi kinetik maksimum fotoelektron, tegangan hentinya, dan kecepatan elektron tercepat.

- 1 Energi foton: $hf = 1240/400 = 3,10 \text{ eV}$.
- 2 $E_{k,\text{maks}} = 3,10 - 2,3 = 0,80 \text{ eV}$, sehingga $V_0 = 0,80 \text{ V}$.
- 3 Dalam joule: $0,80 \times 1,60 \times 10^{-19} = 1,28 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- 4 $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2(1,28 \times 10^{-19})}{9,11 \times 10^{-31}}} \approx 5,3 \times 10^5 \text{ m/s}$.

$E_{k,\text{maks}} = 0,80 \text{ eV}$, $V_0 = 0,80 \text{ V}$, dan $v_{\text{maks}} \approx 530 \text{ km/s}$, cepat sekali, tetapi masih jauh di bawah kecepatan cahaya.



TAMU DARI MASA LALU

Einstein menerima Hadiah Nobel Fisika 1921 bukan untuk teori relativitas, melainkan untuk menjelaskan efek fotolistrik. Robert Millikan di Amerika sebenarnya ingin membuktikan bahwa Einstein keliru. Selama sekitar sepuluh tahun ia mengukur tegangan henti dengan sangat teliti. Hasilnya justru membenarkan persamaan Einstein dan menghasilkan nilai h yang akurat.

MITOS

"Cahaya yang lebih terang berarti setiap butir cahayanya lebih bertenaga."

MITOS

"Kalau ditunggu cukup lama, cahaya redup pasti bisa melepaskan elektron."

FAKTA

Lebih terang berarti

lebih banyak

foton. Energi tiap foton hanya ditentukan frekuensinya:

$$E = hf$$

. Lampu sorot merah raksasa tetap kalah oleh lampu UV kecil dalam urusan melepaskan elektron dari seng.

FAKTA

Satu elektron tidak bisa menabung energi dari banyak foton. Jika satu foton tidak cukup, menunggu tidak membantu. Sebaliknya, jika satu foton cukup, elektron lepas seketika walaupun cahayanya sangat redup.

28.4 Foton juga punya momentum

Foton tidak bermassa, tetapi membawa **momentum**. Itulah sebabnya cahaya bisa memberi tekanan, seperti layar surya di Bab 27. Momentum foton:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Rumus ini bercerita: momentum p (kg·m/s) makin besar jika panjang gelombang λ makin pendek. Satu foton hijau 530 nm hanya membawa $p = 6,63 \times 10^{-34} / 5,3 \times 10^{-7} \approx 1,3 \times 10^{-27}$ kg·m/s. Sangat kecil, tetapi foton sinar X ribuan kali lebih "berat dorongannya".

**EFEK COMPTON: FOTON BERTABRAKAN SEPERTI BOLA BILIAR**

Pada 1923, Arthur Compton menembakkan sinar X ke grafit. Sinar X yang terhambur ternyata memiliki panjang gelombang **lebih panjang** daripada sinar datang. Teori gelombang tidak bisa menjelaskannya. Model foton bisa: foton menumbuk elektron, menyerahkan sebagian energi dan momentumnya, seperti bola biliar. Dengan kekekalan energi dan momentum (memakai relativitas), diperoleh

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos \theta),$$

dengan $h/(m_e c) = 2,43$ pm disebut panjang gelombang Compton. Pada sudut hambur 90° , sinar X 50,0 pm menjadi 52,4 pm. Compton menerima Nobel 1927. Sejak itu, foton diterima sebagai partikel sungguhan.

28.5 Gelombang materi: elektron pun bergelombang

Jika gelombang cahaya bisa berperilaku seperti partikel, apakah partikel bisa berperilaku seperti gelombang? Pada 1924, Louis de Broglie, mahasiswa doktoral di Prancis, menjawab "ya". Setiap benda bermomentum $p = mv$ memiliki panjang gelombang:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Rumus ini bercerita: λ adalah panjang gelombang dari **gelombang materi**, disebut juga panjang gelombang de Broglie (meter), m massa (kg), dan v kecepatan (m/s). Karena h sangat kecil, hanya benda yang sangat ringan, seperti elektron, yang gelombangnya cukup panjang untuk teramati. Elektron yang dipercepat 100 V memiliki $\lambda \approx 0,12$ nm, seukuran jarak antaratom dalam kristal.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Setiap benda yang bergerak punya panjang gelombang. Makin ringan dan makin lambat bendanya, makin panjang gelombangnya.

 m

Massa kg

 v

Kecepatan m/s

 λ

Panjang gelombang m

PANJANG GELOMBANG

 $1,653 \times 10^{-10}$

m

Benda $9,11 \times 10^{-31}$ kg yang melaju $4,4 \times 10^6$ m/s memiliki panjang gelombang **$1,653 \times 10^{-10}$** m. Ukuran atom sekitar 10^{-10} m. Jika λ jauh lebih kecil dari itu, sifat gelombangnya mustahil teramati.

$$\text{Cek satuan: } \frac{\text{J s}}{\text{kg} \cdot \text{m/s}} = \frac{\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}}{\text{kg m s}^{-1}} = \text{m}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-KUANTUM-DEBROGLIE



Tebak Dulu!

Elektron ditembakkan satu per satu ke dinding bercelah dua. Setiap elektron meninggalkan satu titik di layar. Setelah ribuan elektron, pola apa yang tampak di layar?

Dua pita terang tepat di belakang kedua celah, seperti peluru yang lewat celah.

Satu bercak di tengah, karena elektron saling bertabrakan.

Banyak pita terang-gelap berselang-seling, seperti pola interferensi cahaya.

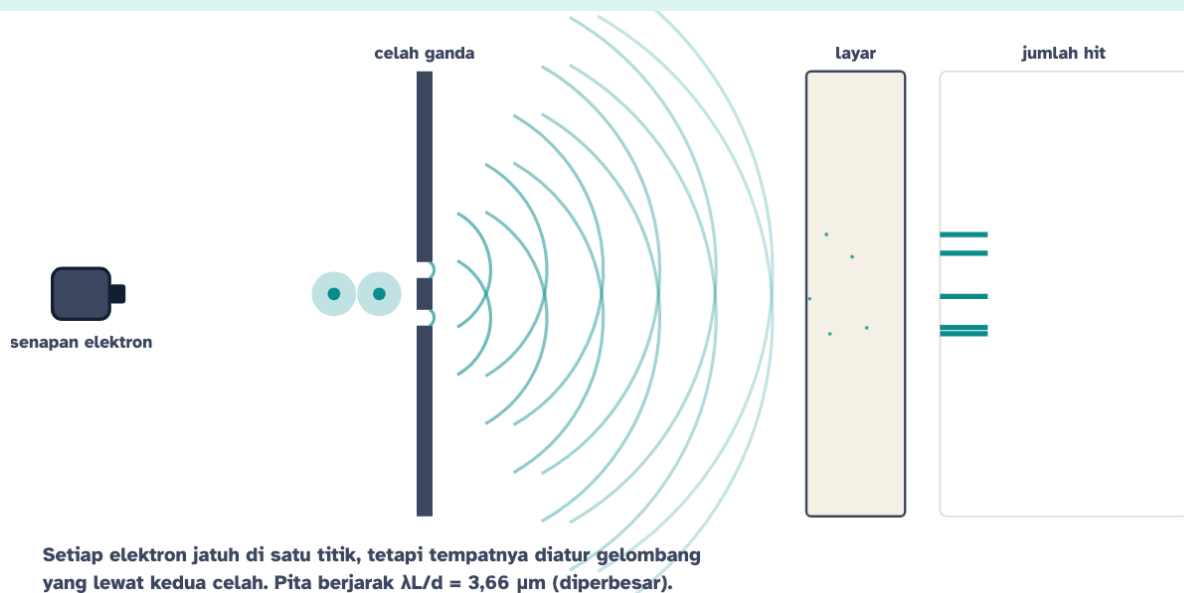
Titik-titik acak tanpa pola apa pun.

Pola interferensi! Setiap elektron tiba sebagai satu titik, seperti partikel. Tetapi tempat jatuhnya diatur oleh gelombang yang melewati **kedua** celah sekaligus lalu berinterferensi. Elektron tidak pernah jatuh di garis gelap. Percobaan ini pernah dilakukan secara nyata dengan elektron satu per satu, dan para fisikawan menyebutnya salah satu percobaan terindah dalam sejarah fisika.

LAB MINI

Partikel atau gelombang? Elektron satu per satu

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-28



Setiap elektron jatuh di satu titik, tetapi tempatnya diatur gelombang yang lewat kedua celah. Pita berjarak $\lambda L/d = 3,66 \mu\text{m}$ (diperbesar).

λ elektron (non-relativistik)

5,48 pm

Jarak antarpita ($L = 1 \text{ m}$)

3,66 μm

Jumlah hit

5

Pola

masih tampak acak...

Tekan **Jalankan** dan perhatikan titik-titik muncul satu per satu. Setelah beberapa ratus elektron, polanya mulai terlihat. Ubah tegangan pemercepat dan jarak celah: kapan pitanya merapat? Lalu pasang **detektor di celah** (mengintip celah mana yang dilewati elektron). Apa yang terjadi pada polanya? Bandingkan juga dengan **kelereng**.



JADI ELEKTRON ITU PARTIKEL ATAU GELOMBANG?

Keduanya, dan juga bukan keduanya. Elektron selalu **terdeteksi** di satu titik (sifat partikel), tetapi **peluang** di mana ia terdeteksi mengikuti pola gelombang. Gelombang materi adalah gelombang peluang. Cahaya pun begitu: foton tiba satu per satu, tetapi pola tempat jatuhnya mengikuti interferensi gelombang. Inilah **dualisme gelombang-partikel**.



TAMU DARI MASA LALU

Ide de Broglie terdengar begitu nekat sehingga penguji disertasinya meminta pendapat Einstein dulu. Einstein mendukungnya. Tiga tahun kemudian, pada 1927, Clinton Davisson dan Lester Germer di Amerika menembakkan elektron ke kristal nikel dan menemukan pola difraksi, persis seperti sinar X. De Broglie menerima Nobel 1929. Pada 1989, tim Akira Tonomura di Jepang merekam elektron yang tiba satu per satu dan perlahan membentuk pola interferensi, seperti Lab Mini di atas.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERCOBAAN DAVISSON–GERMER DAN KETIDAKPASTIAN HEISENBERG

Elektron yang dipercepat beda potensial V memiliki $p = \sqrt{2m_e eV}$, sehingga $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eV}} \approx \frac{1,23}{\sqrt{V}}$ nm. Davisson dan Germer memakai $V = 54$ V, jadi $\lambda = 1,23/\sqrt{54} \approx 0,167$ nm. Baris atom di permukaan nikel berjarak $D = 0,215$ nm dan bertindak sebagai kisi difraksi: puncak pertama terjadi pada $D \sin \theta = \lambda$, sehingga $\sin \theta = 0,167/0,215$ dan $\theta \approx 51^\circ$. Mereka mengukur 50° . Cocok! Sifat gelombang juga berarti posisi dan momentum tidak bisa diketahui tepat bersamaan: $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ (prinsip ketidakpastian Heisenberg). Itulah sebabnya "mengintip" celah mana yang dilewati elektron selalu mengganggu momentumnya cukup banyak untuk menghapus pola interferensi.

28.6

Mikroskop elektron: melihat yang tak terlihat

Mikroskop cahaya tidak bisa membedakan dua titik yang jaraknya lebih kecil dari sekitar setengah panjang gelombang cahaya, kira-kira 200 nm, karena gelombang cahaya mengalami difraksi (Bab 21). Bakteri masih terlihat, tetapi kebanyakan virus tidak. Solusinya: gunakan "cahaya" yang gelombangnya jauh lebih pendek, yaitu **elektron**.

Dalam **mikroskop elektron**, elektron dipercepat oleh tegangan puluhan sampai ratusan kilovolt sehingga panjang gelombangnya hanya beberapa pikometer. Berkas elektron difokuskan oleh "lensa" berupa kumparan magnet (Bab 24). Mikroskop elektron transmisi (TEM) menembakkan elektron menembus sampel yang sangat tipis, sedangkan mikroskop elektron pemindai (SEM) menyapu permukaan sampel dan menghasilkan gambar tiga dimensi yang menakjubkan.

Elektron dalam mikroskop dipercepat beda potensial 50 kV. Hitung panjang gelombang de Broglie-nya (abaikan efek relativitas), lalu bandingkan dengan cahaya hijau 530 nm. Bandingkan pula dengan bola tenis 0,058 kg yang melaju 50 m/s.

1 Energi kinetik: $E_k = eV = (1,60 \times 10^{-19})(5,0 \times 10^4) = 8,0 \times 10^{-15} \text{ J}$.

2 Momentum: $p = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{2(9,11 \times 10^{-31})(8,0 \times 10^{-15})} \approx 1,21 \times 10^{-22} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$.

3 $\lambda = h/p = 6,63 \times 10^{-34} / 1,21 \times 10^{-22} \approx 5,5 \times 10^{-12} \text{ m} = 5,5 \text{ pm}$.

4 Perbandingan: $530 \text{ nm} / 5,5 \text{ pm} \approx 10^5$. Gelombang elektron sekitar seratus ribu kali lebih pendek.

5 Bola tenis: $\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{0,058 \times 50} \approx 2,3 \times 10^{-34} \text{ m}$, jauh lebih kecil daripada inti atom.

$\lambda_{\text{elektron}} \approx 5,5 \text{ pm}$ (dengan koreksi relativitas sedikit lebih kecil, $\pm 5,4 \text{ pm}$). Dalam praktik, ketajaman mikroskop elektron dibatasi oleh cacat lensa magnetnya, sekitar 0,1 nm, cukup untuk melihat deretan atom. Bola tenis? Gelombangnya mustahil teramati, jadi bola tetap berperilaku seperti bola.



FISIKA INDONESIA

Laboratorium di **BRIN** dan sejumlah perguruan tinggi di Indonesia memiliki mikroskop elektron (SEM dan TEM). Peneliti memakainya untuk mengamati virus dan bakteri, struktur material baterai dan katalis, pori-pori batuan untuk eksplorasi panas bumi, hingga pola mikro pada sisik ikan dan sayap kupu-kupu Nusantara.

28.7 Panel surya dan sensor kamera: foton bekerja untukmu

Panel surya terbuat dari kristal **silikon**. Di dalam silikon, elektron juga terikat, tetapi "ongkos lepasnya" (celah pita energi) hanya sekitar 1,1 eV. Foton dengan energi lebih dari 1,1 eV, yaitu panjang gelombang kurang dari sekitar 1.100 nm, dapat membebaskan elektron di dalam kristal. Sambungan p-n pada panel surya lalu mendorong elektron bebas itu ke satu arah, sehingga terbentuk arus listrik. Peristiwa ini disebut **efek fotovoltaiik**, saudara dekat efek fotolistrik.

Perhatikan bedanya dengan pelat seng: silikon cukup "murah ongkosnya" sehingga **cahaya merah pun bisa** menghasilkan listrik. Foton inframerah jauh (energi di bawah 1,1 eV) lewat tanpa guna, sedangkan kelebihan energi foton biru dan UV terbuang sebagai panas. Inilah salah satu alasan efisiensi panel surya silikon biasa hanya sekitar 20%.

Sinar matahari siang berintensitas 1.000 W/m^2 . Anggap panjang gelombang rata-rata fotonnya 600 nm . (a) Berapa foton yang menimpa 1 m^2 setiap detik? (b) Panel surya $1,7 \text{ m}^2$ berefisiensi 20% . Berapa daya listriknya?

1 Energi satu foton: $E = 1240/600 \approx 2,07 \text{ eV} = 3,31 \times 10^{-19} \text{ J}$.

2 Jumlah foton: $N = \frac{1000}{3,31 \times 10^{-19}} \approx 3,0 \times 10^{21} \text{ foton per detik per m}^2$.

3 Daya listrik panel: $P = 0,20 \times 1000 \times 1,7 = 340 \text{ W}$.

Sekitar tiga ribu miliar miliar foton menghujani setiap meter persegi atap setiap detik! Satu panel $1,7 \text{ m}^2$ menghasilkan sekitar 340 W saat siang cerah, cukup untuk menyalakan beberapa lampu, kipas, dan mengisi baterai HP.



FISIKA INDONESIA: PLTS TERAPUNG CIRATA

Di Waduk Cirata, Jawa Barat, ratusan ribu panel surya mengapung di atas air. **PLTS Terapung Cirata** diresmikan pada November 2023 dengan kapasitas sekitar 192 MWp , salah satu yang terbesar di Asia Tenggara. Air waduk membantu mendinginkan panel, karena efisiensi panel turun jika terlalu panas. Di banyak desa dan ruas jalan, **lampu jalan tenaga surya** mengisi baterainya pada siang hari lalu menyala otomatis saat gelap, sangat berguna untuk daerah yang belum terjangkau jaringan listrik.

Sensor kamera HP bekerja dengan prinsip serupa. Sensornya berisi jutaan **piksel**, masing-masing berupa fotodioda silikon kecil. Setiap foton yang tertangkap bisa membebaskan satu elektron, lalu jumlah elektron itu dihitung untuk menentukan terang-gelapnya piksel. Filter merah, hijau, dan biru di atas piksel memberi informasi warna. Saat memotret di ruangan sangat gelap, hanya sedikit foton yang tiba di setiap piksel, dan jumlahnya acak. Bintik-bintik derau (*noise*) pada foto gelap itu sebagian berasal dari sifat cahaya yang berbutir!

MITOS

"Panel surya tidak menghasilkan listrik sama sekali saat mendung."

MITOS

"Mikroskop cahaya yang sangat canggih pasti bisa melihat atom."

FAKTA

Cahaya yang dihamburkan awan tetap berisi foton dengan energi di atas 1,1 eV. Listriknya berkurang, sering menjadi kurang dari separuh, tetapi tidak nol.

FAKTA

Ketajaman mikroskop cahaya dibatasi difraksi, sekitar setengah panjang gelombang cahaya (± 200 nm). Atom berukuran sekitar 0,1 nm, dua ribu kali lebih kecil. Untuk itu dibutuhkan elektron atau teknik lain.



PLTS atap

Panel silikon di atap rumah dan sekolah mengubah foton menjadi arus listrik DC, lalu inverter mengubahnya menjadi AC 220 V (Bab 26).



Lampu jalan tenaga surya

Panel mengisi baterai di siang hari. Sensor cahaya menyalakan lampu otomatis saat foton yang datang berkurang.



Kamera HP

Jutaan fotodioda menghitung foton yang datang. Sensornya bahkan "melihat" inframerah dari remote TV.



Kalkulator tenaga surya

Sel surya kecil di atasnya cukup untuk menjalankan kalkulator walau hanya diterangi lampu kelas.



Mikroskop elektron

Memakai gelombang elektron yang sangat pendek untuk memotret virus dan susunan atom.



Cek Cepat

Menurut persamaan Einstein, energi kinetik maksimum fotoelektron bergantung pada...

intensitas cahaya

lamanya penyinaran

frekuensi cahaya dan jenis logam

luas pelat logam

Foton manakah yang energinya paling besar?

ultraviolet

inframerah

cahaya merah

gelombang radio

Mikroskop elektron dapat melihat benda yang jauh lebih kecil daripada mikroskop cahaya karena...

elektron lebih terang daripada cahaya

elektron bermuatan negatif

lensa kacanya lebih besar

panjang gelombang elektron jauh lebih pendek

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D

Tantangan Rumah: mata-mata inframerah

Bahan: remote TV atau AC, HP berkamera (coba kamera depan dan kamera belakang), ruangan agak gelap

1. Lihat ujung remote dengan mata telanjang sambil menekan sebuah tombol. Apakah ada cahaya?
2. Sekarang arahkan ujung remote ke kamera HP (mode foto atau video) dan tekan tombol yang sama. Amati layar HP.
3. Ulangi dengan kamera yang lain (depan/belakang). Apakah cahayanya sama terang?

Pertanyaan: LED remote memancarkan inframerah sekitar 940 nm. Hitung energi fotonnya dengan angka sakti 1240. Mengapa mata tidak bisa melihatnya, tetapi sensor silikon kamera (yang "ongkos lepasnya" 1,1 eV) bisa? Mengapa sebagian kamera menampilkan cahayanya lebih redup? (Petunjuk: banyak kamera memakai filter penahan inframerah agar warna foto tetap alami.)

RINGKASAN KILAT Bab 28 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan krisis **radiasi benda hitam** dan ide **kuanta** Planck, $E = hf$
- menjelaskan **efek fotolistrik**: frekuensi ambang, fungsi kerja, tegangan henti, dan $E_{k,\text{maks}} = hf - \phi$
- menghitung energi dan momentum **foton** dalam joule dan elektronvolt
- menghitung **panjang gelombang de Broglie** dan menjelaskan dualisme gelombang-partikel lewat celah ganda elektron
- menjelaskan cara kerja **panel surya**, **sensor kamera**, dan **mikroskop elektron**

Istilah kunci

benda hitam bencana ultraviolet kuantum tetapan Planck elektronvolt efek fotolistrik
fungsi kerja tegangan henti gelombang materi dualisme gelombang-partikel
mikroskop elektron efek fotovoltaiik

Rumus penting

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Energi satu foton. Energi satu butir cahaya ditentukan warnanya: makin pendek gelombangnya (makin ke arah biru dan ungu), makin besar energinya.

$$E_{k,\text{maks}} = hf - \phi$$

Persamaan fotolistrik Einstein. Energi gerak elektron tercepat = energi satu foton dikurangi ongkos keluar dari logam.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Panjang gelombang de Broglie. Setiap benda yang bergerak punya panjang gelombang. Makin ringan dan makin lambat bendanya, makin panjang gelombangnya.

⚠ **Jangan sampai terjebak**

- Intensitas $\neq$ energi foton.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=28

🧩 Teka-teki untuk Bab 29

Elektron ternyata bergelombang. Lalu bagaimana gelombang elektron bisa "tinggal" di sekitar inti atom tanpa jatuh ke dalamnya? Dan mengapa lampu jalan natrium selalu berwarna kuning-oranye, sedangkan kembang api tembaga berwarna hijau kebiruan, tidak pernah sebaliknya?

▼ **Intip petunjuk**

Gelombang yang terkurung, seperti senar gitar yang kedua ujungnya terikat, hanya boleh bergetar dengan "nada" tertentu. Mungkin elektron dalam atom juga hanya boleh memiliki energi tertentu, dan setiap lompatan antartingkat energi memancarkan satu foton dengan warna khas. Jawabannya ada di Bab 29: Model Atom dan Spektrum.

29 Membongkar Atom: dari Roti Kismis ke Tangga Cahaya

Kenapa lampu jalan sodium berwarna kuning, sedangkan kembang api bisa merah, hijau, dan biru? Jawabannya tersembunyi di dalam atom, benda super kecil yang ternyata hampir seluruhnya ruang kosong.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menceritakan perkembangan **model atom** dari Thomson, Rutherford, Bohr, sampai model kuantum, beserta bukti percobaannya;
- menafsirkan **percobaan hamburan alfa**: mengapa atom hampir kosong dan punya inti kecil yang padat;
- menghitung **tingkat energi** atom hidrogen $E_n = -13,6/n^2$ eV serta panjang gelombang foton yang dipancarkan atau diserap;
- membedakan **spektrum emisi dan serapan**, deret Lyman, Balmer, Paschen, dan memakai spektrum sebagai "sidik jari" unsur;
- menjelaskan cara kerja **laser** dan kegunaannya di sekitarmu.

WARNA-WARNI MALAM TAHUN BARU

KOMIK • 4 PANEL

Malam tahun baru, alun-alun kota

RAKA

Wuih, merah, hijau, biru! Pasti tiap kembang api dicat pakai warna beda, ya?

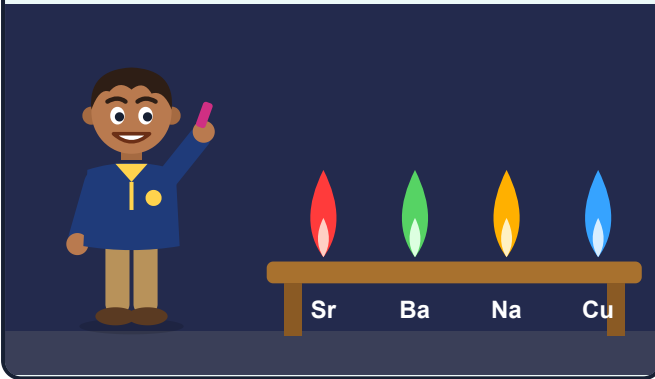
**SARI**

Dicat? Catnya kan ikut terbakar, Rak. Terus, kenapa lampu jalan di sana kuning semua, ya?



KAK NARA

Warnanya datang dari **atom**! Stronsium memancarkan merah, barium hijau, natrium kuning. Setiap unsur punya "sidik jari" cahaya sendiri.



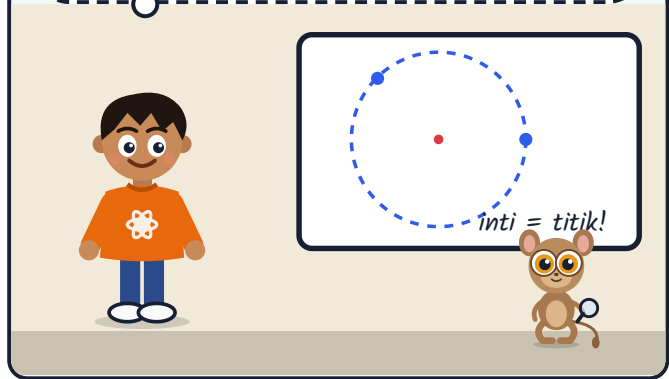
Esoknya, di kelas

TARSI

Fakta unik: atom itu hampir seluruhnya **ruang kosong**!

RAKA

Kosong? Terus kenapa tanganku nggak tembus meja?



Tebak Dulu!

Sejumput garam dapur (natrium klorida) ditaburkan ke nyala api kompor gas yang biru. Warna apinya akan berubah menjadi...

tetap biru, karena garam tidak bisa terbakar.

putih terang, karena garam berwarna putih.

kuning-oranye, seperti lampu jalan sodium.

hijau, karena garam berasal dari laut.

Jawabannya: kuning-oranye. Panas api "menendang" elektron di atom natrium ke tingkat energi yang lebih tinggi. Saat elektron kembali turun, atom natrium memancarkan cahaya dengan panjang gelombang hampir tepat 589 nm, yaitu kuning-oranye. Lampu jalan sodium memakai atom yang sama, sehingga warnanya pun sama. Warna itu bukan berasal dari warna garamnya, melainkan dari atomnya!

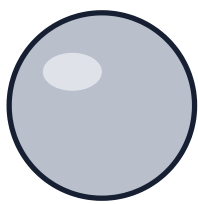
29.1 Thomson: atom seperti roti kismis

Sekitar 2.400 tahun lalu, filsuf Yunani Demokritos membayangkan bahwa benda yang terus dipotong akhirnya akan sampai pada butiran yang tidak bisa dibagi lagi. Ia menamainya *atomos*, artinya "tak terbagi". Tahun 1803,

John Dalton menghidupkan lagi gagasan itu: atom adalah **bola pejal kecil** yang tidak bisa dibagi, dan setiap unsur punya atom yang berbeda.

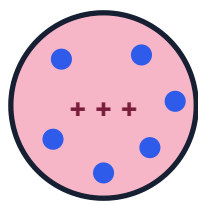
Lalu tahun 1897, J.J. Thomson menemukan partikel yang jauh lebih ringan dari atom terkecil sekalipun: **elektron**, yang bermuatan negatif. Berarti atom **bisa** dibagi! Karena atom secara keseluruhan netral, pasti ada muatan positif yang mengimbangi elektron. Thomson mengusulkan model **roti kismis**: atom adalah bola bermuatan positif yang tersebar rata, dengan elektron-elektron menempel di dalamnya seperti kismis di roti.

Bahasa sederhana • Gampangnya begini: menurut Thomson, atom itu seperti **roti kismis**. Rotinya bermuatan positif, kismisnya adalah elektron yang bermuatan negatif. Jumlah muatan positif dan negatifnya sama, jadi atom tidak bermuatan.



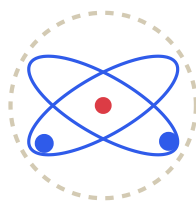
Dalton

1803 · bola pejal



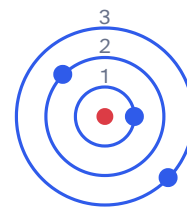
Thomson

1904 · roti kismis



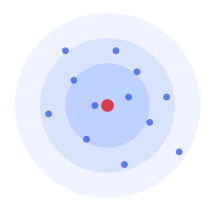
Rutherford

1911 · inti kecil



Bohr

1913 · tangga energi



Kuantum

1926 · awan elektron

setiap model diganti karena ada percobaan yang tidak bisa dijelaskannya

Model atom dari masa ke masa. Model yang lama tidak "salah total": masing-masing benar sampai batas tertentu, lalu diperbaiki oleh bukti baru.



TAMU DARI MASA LALU

J.J. Thomson menemukan elektron tahun 1897 dengan **tabung sinar katode**, kerabat jauh tabung layar televisi zaman dulu. Ia mengukur bahwa partikel itu jauh lebih ringan daripada atom hidrogen. Sekarang kita tahu massa elektron kira-kira $1/1836$ massa proton. Thomson menerima Hadiah Nobel Fisika tahun 1906. Uniknya, beberapa muridnya kelak juga meraih Nobel, termasuk Ernest Rutherford, tokoh kita di subbab berikut.

29.2 Rutherford: menembak atom dengan peluru alfa

Bagaimana cara "melihat" isi atom yang terlalu kecil untuk mikroskop mana pun? Ernest Rutherford punya ide nekat: **tembaki saja** atom itu, lalu amati ke mana pelurunya terpental. Pelurunya adalah **partikel alfa** (α), yaitu partikel bermuatan positif yang dipancarkan zat radioaktif seperti radium dan polonium. Kamu akan berkenalan lebih dekat dengannya di Bab 31.

Tahun 1909, dua anggota timnya, Hans Geiger dan mahasiswa berusia 20 tahun bernama Ernest Marsden, menembakkan partikel alfa ke **lembaran emas yang sangat tipis**, setebal ratusan sampai ribuan lapis atom saja. Di sekelilingnya dipasang layar berlapis seng sulfida. Setiap kali partikel alfa menabrak layar, muncul kilatan cahaya kecil yang mereka hitung satu per satu dengan mikroskop di ruang gelap.



Tebak Dulu!

Jika atom benar-benar seperti roti kismis Thomson, muatan positifnya tersebar tipis sehingga gaya listriknya lemah. Apa yang sebenarnya diamati Geiger dan Marsden?

Semua partikel alfa menembus lurus tanpa dibelokkan sedikit pun.

Sebagian besar partikel alfa memantul balik ke arah sumber.

Sebagian besar menembus lurus, tetapi ada sangat sedikit yang dibelokkan tajam, bahkan memantul balik.

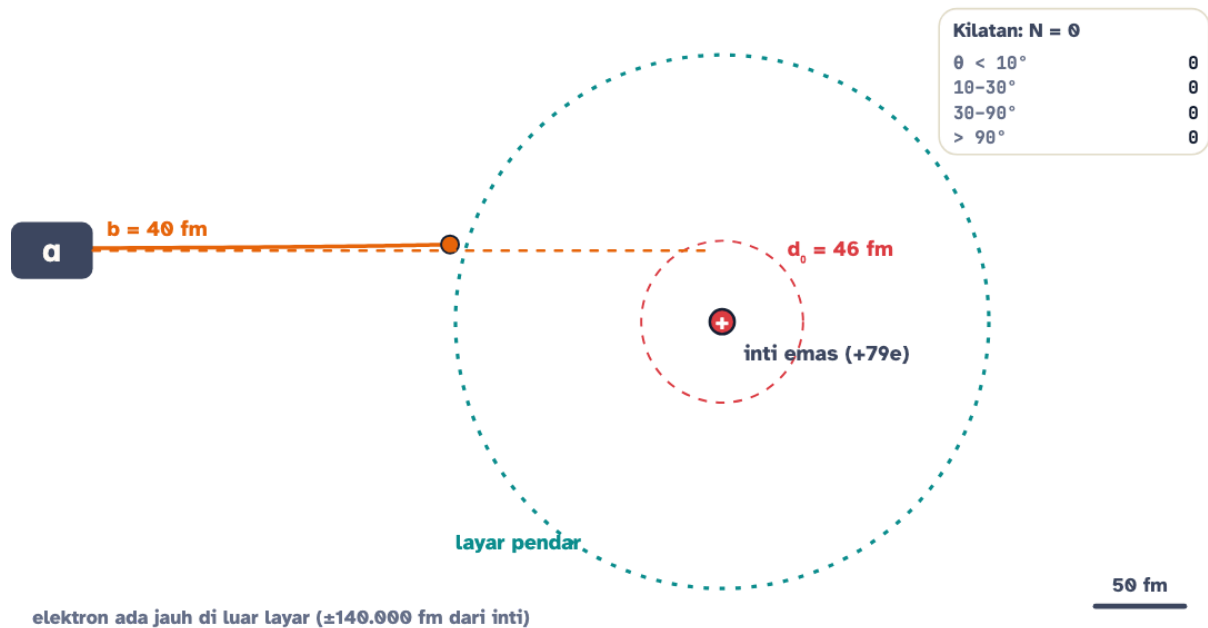
Semua partikel alfa tertahan di dalam lembar emas.

Jawabannya: hampir semua lurus, tetapi sedikit memantul balik. Pada lembar logam berat seperti platina dan emas, kira-kira 1 dari setiap 8.000 partikel alfa dipantulkan ke belakang. Rutherford kemudian mengibaratkannya seperti menembakkan peluru meriam ke selembur kertas tisu, lalu pelurnya berbalik dan mengenai si penembak! Model roti kismis tidak mungkin menghasilkan pantulan seperti itu.

Tahun 1911, Rutherford menarik tiga kesimpulan dari hasil itu:

1. **Sebagian besar partikel menembus lurus**, jadi atom hampir seluruhnya ruang kosong.
2. **Sedikit partikel dibelokkan tajam**, jadi ada sesuatu yang kecil, bermuatan positif, dan sangat kuat menolak partikel alfa. Rutherford menamainya **inti atom**.
3. **Partikel yang memantul balik sangat jarang**, jadi intinya sangat kecil sehingga jarang "terkena", tetapi di situlah hampir seluruh massa atom berada.

Seberapa kecil? Jari-jari atom emas sekitar $1,4 \times 10^{-10}$ m, sedangkan jari-jari intinya hanya sekitar 7×10^{-15} m, kira-kira 20.000 kali lebih kecil. Jika atom emas dibesarkan seukuran **stadion sepak bola besar**, intinya hanya sebesar **kelereng** di titik tengah lapangan. Elektron-elektronnya beterbangan di tribun, dan di antaranya... kosong! Namun kelereng itu memuat lebih dari 99,9% massa seluruh atom.



Jarak bidik b
40 fm

Sudut belok θ
 $59,3^\circ$

Jarak terdekat ke inti
69 fm

Memantul ($\theta > 90^\circ$)
0 dari 0

Seret (atau klik) di kanvas untuk membidik, lalu lepaskan untuk menembak satu partikel alfa. Bandingkan bidikan yang jauh dan yang dekat dengan inti. Lalu tekan **Berondong 400**: partikel ditembakkan acak ke jalur selebar ± 2.000 fm, jauh lebih lebar dari layar. Yang lewat jauh dari inti tidak tergambar, tetapi tetap tercatat di kotak hitungan. Berapa yang memantul? Ubah energi partikel, lalu ganti model atom menjadi **roti kismis**. Apa bedanya? (Pada atom emas sungguhan, jalurnya puluhan kali lebih lebar lagi, sehingga pantulan jauh lebih langka.)



AWAS JEBAKAN: "KOSONG" BUKAN BERARTI BISA DITEMBUS

Atom memang hampir kosong dari *massa*, tetapi ruang itu dipenuhi **medan listrik** elektron. Saat tanganmu menekan meja, awan elektron di kulitmu dan awan elektron di meja saling tolak dengan sangat kuat. Ditambah aturan kuantum yang melarang dua elektron menempati keadaan yang sama, itulah yang membuat tanganmu tidak tembus meja. Rasa "menyentuh" sebenarnya adalah rasa **ditolak gaya listrik!**

**JARAK TERDEKAT DAN RUMUS HAMBURAN**

Partikel alfa (muatan $2e$) yang ditembakkan lurus ke inti (muatan Ze) berhenti sesaat ketika seluruh energi kinetiknya berubah menjadi energi potensial listrik:

$$E_k = \frac{k(2e)(Ze)}{d_0} \Rightarrow d_0 = \frac{2Zke^2}{E_k}.$$

Trik hitung cepat: $ke^2 = 1,44 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Untuk alfa 5 MeV dan emas ($Z = 79$): $d_0 = 2 \times 79 \times 1,44/5 \approx 46 \text{ fm}$, lebih besar dari jari-jari inti emas ($\pm 7 \text{ fm}$). Jadi alfa berbalik *sebelum* menyentuh inti. Untuk partikel yang lewat sejauh b dari garis pusat (*parameter dampak*), sudut hamburnya memenuhi $\tan(\theta/2) = d_0/(2b)$. Rutherford juga menurunkan bahwa jumlah partikel yang terhambur ke sudut θ sebanding dengan $1/\sin^4(\theta/2)$. Ramalan inilah yang dicocokkan Geiger dan Marsden dengan data kilatan mereka, dan hasilnya cocok sekali.

Namun model Rutherford punya masalah besar. Menurut teori listrik-magnet klasik (Bab 27), muatan yang bergerak melingkar terus memancarkan gelombang elektromagnetik sehingga kehilangan energi. Elektron seharusnya berputar makin dekat lalu **jatuh ke inti** dalam waktu kurang dari sepersemiliar detik. Kenyataannya, atom stabil selama miliaran tahun. Ada yang belum beres!

29.3 Bohr: elektron menaiki tangga energi

Tahun 1913, fisikawan Denmark Niels Bohr menambal model Rutherford dengan ide berani yang meminjam konsep kuantum dari Planck dan Einstein (Bab 28). Untuk atom hidrogen, Bohr mengajukan tiga **postulat**:

1. Elektron hanya boleh beredar pada **orbit-orbit tertentu**. Selama berada di orbit itu, elektron **tidak memancarkan energi**. Orbit ini disebut *keadaan stasioner*.
2. Orbit yang diizinkan adalah orbit yang momentum sudutnya kelipatan bulat dari $h/2\pi$: $mvr = n\frac{h}{2\pi}$, dengan $n = 1, 2, 3, \dots$ yang disebut **bilangan kuantum utama**.
3. Elektron dapat **melompat** dari satu orbit ke orbit lain. Saat turun, ia memancarkan satu **foton**. Saat naik, ia menyerap satu foton. Energi foton tepat sama dengan selisih energi kedua orbit: $hf = E_{\text{atas}} - E_{\text{bawah}}$.

Bayangkan **tangga rumah panggung**. Kamu bisa berdiri di anak tangga pertama, kedua, atau ketiga, tetapi tidak bisa melayang di antara dua anak tangga. Elektron pun begitu: energinya hanya boleh bernilai tertentu. Inilah arti kata **terkuantisasi**. Bedanya, tangga atom makin ke atas makin rapat.

Bahasa sederhana • Versi singkatnya: elektron di atom seperti anak yang naik-turun **tangga**. Untuk naik, ia perlu "makan" energi. Saat turun, ia "melepaskan" energi dalam bentuk cahaya. Besar lompatannya menentukan **warna** cahaya itu.

$$E_n = - \frac{13,6 \text{ eV} \cdot Z^2}{n^2}$$

Makin tinggi anak tangga n , makin mendekati nol energinya. Tanda minus berarti elektron masih 'terikat' pada inti.

 n

Tingkat (bilangan kuantum utama)

 Z

Nomor atom (ion berelektron tunggal)

 E_n

Energi elektron eV

ENERGI ELEKTRON

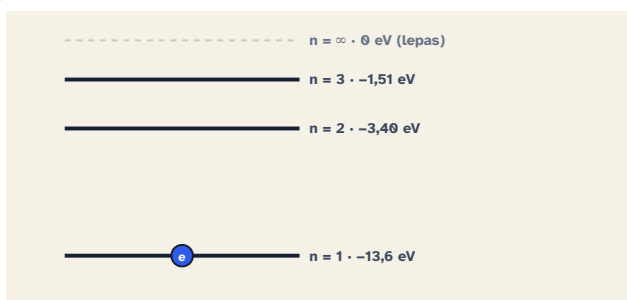
-3,4

eV

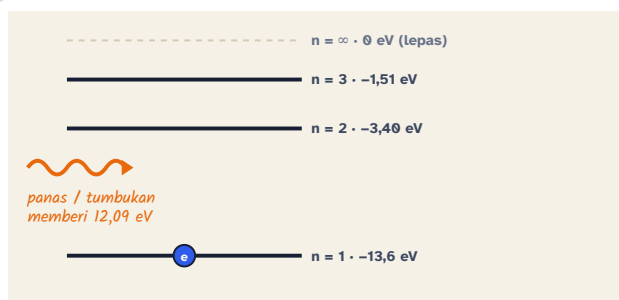
Elektron di tingkat $n = 2$ ($Z = 1$) memiliki energi **-3,4 eV**. Untuk melepaskannya dari atom (ionisasi) diperlukan energi sebesar nilai itu tanpa tanda minus.

Cek satuan: $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, yaitu energi yang diperoleh satu elektron saat dipercepat beda potensial 1 volt.

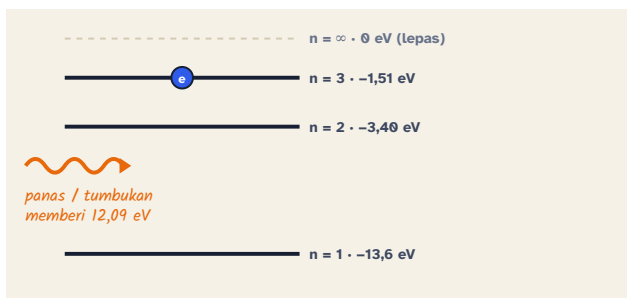
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-BOHR-ENERGI](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-bohr-energi)



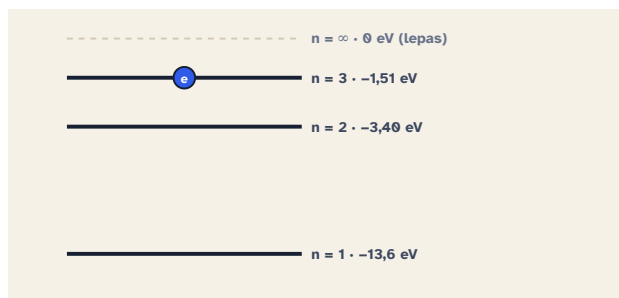
Langkah 1. Atom hidrogen dalam **keadaan dasar**: elektron di tingkat $n = 1$, energinya $-13,6$ eV. Ia senang di sini dan tidak memancarkan apa-apa.



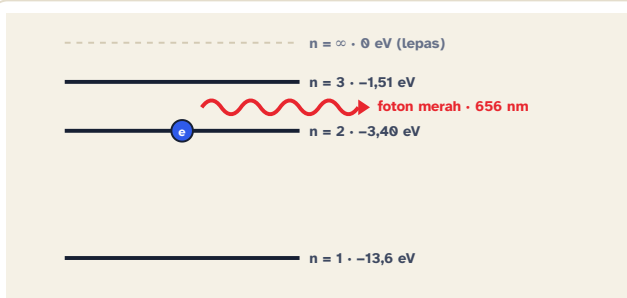
Langkah 2. Atom dipanaskan atau ditabrak atom lain. Datang "paket energi" sebesar $-1,51 - (-13,6) = 12,09$ eV.



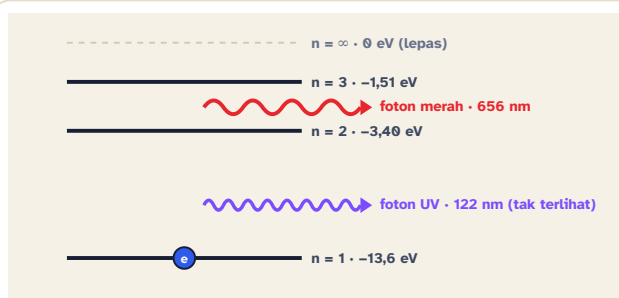
Langkah 3. Elektron menyerap energi itu dan **melompat** ke tingkat $n = 3$. Atom kini dalam **keadaan tereksitasi**.



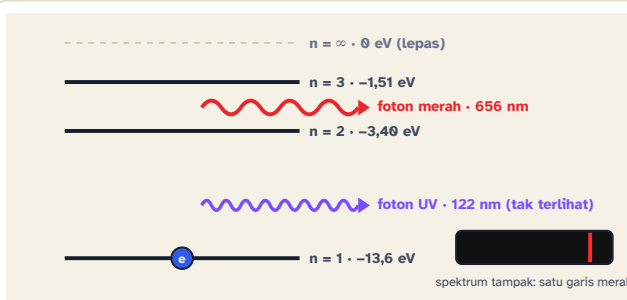
Langkah 4. Keadaan tereksitasi tidak betah lama. Biasanya dalam sekitar seperseratus juta detik, elektron akan turun lagi.



Langkah 5. Elektron turun dari $n = 3$ ke $n = 2$ dan memancarkan foton berenergi $1,89$ eV, yaitu cahaya **merah** 656 nm.



Langkah 6. Lalu dari $n = 2$ ke $n = 1$: foton berenergi $10,2$ eV, yaitu **ultraviolet** 122 nm yang tak terlihat mata.



Langkah 7. Lewat prisma atau kisi, cahaya hidrogen tampak sebagai **garis-garis berwarna terpisah**, bukan pelangi utuh. Garis merah ini terlihat jelas di foto nebula yang kemerahan.



TRIK KAK NARA: ANGKA SAKTI 1240

Energi foton dan panjang gelombangnya berhubungan lewat $E = hf = hc/\lambda$. Karena $hc \approx 1240$ eV·nm, kamu cukup menghafal satu angka:

$$\lambda \text{ (nm)} = \frac{1240}{E \text{ (eV)}}.$$

Foton 2 eV $\rightarrow$ 620 nm (oranye-merah). Foton 3 eV $\rightarrow$ 413 nm (ungu). Foton 10 eV $\rightarrow$ 124 nm (ultraviolet).

CONTOH Energi elektron di tingkat kedua

Berapa energi elektron atom hidrogen di tingkat $n = 2$, dan berapa energi minimum untuk melepaskannya dari atom?

1 $E_2 = -\frac{13,6}{2^2} = -\frac{13,6}{4} = -3,4 \text{ eV}.$

2 Elektron lepas (terionisasi) jika energinya mencapai 0 eV. Energi yang perlu ditambahkan: $0 - (-3,4) = 3,4 \text{ eV}.$

$E_2 = -3,4 \text{ eV}$. Energi ionisasi dari tingkat ini 3,4 eV, jauh lebih kecil daripada dari keadaan dasar (13,6 eV). Elektron di tangga atas lebih mudah lepas.

KERJAKAN BERSAMA Warna lompatan $3 \rightarrow 2$

Elektron atom hidrogen turun dari $n = 3$ ke $n = 2$. Hitung energi dan panjang gelombang foton yang dipancarkan. Apa warnanya?

1 $E_3 = -13,6/9 = -1,51 \text{ eV}$ dan $E_2 = -3,40 \text{ eV}.$

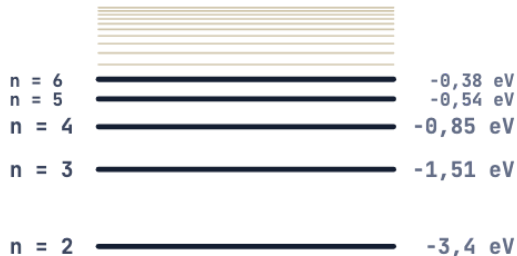
2 Energi foton: $\Delta E = E_3 - E_2 = -1,51 - (-3,40) = 1,89 \text{ eV}.$

3 Pakai angka sakti: $\lambda = 1240/1,89 \approx 656 \text{ nm}.$

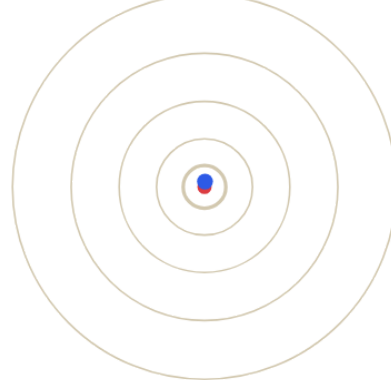
Foton 1,89 eV dengan $\lambda \approx 656 \text{ nm}$, berwarna merah. Inilah garis H-alfa yang terkenal, warna merah muda khas awan gas hidrogen di antariksa.

Tangga energi hidrogen

$n = \infty$ elektron lepas (ion) $\uparrow$ 0 eV



$n = 1$ (skala diregangkan agar tangga atas terlihat)

Orbit Bohr: r sebanding n^2 

Spektrum emisi (garis terang)



UV: —
Inframerah: —

garis tampak terkumpul: 0/4

Lompatan

 $n = 2 \rightarrow n = 1$

Energi foton

10,2 eV

Panjang gelombang

121,6 nm

Deret

Lyman (dipancarkan)

Warna

ultraviolet (tak terlihat)

Klik sebuah anak tangga untuk memindahkan elektron. Lompat **turun** = memancarkan foton (lihat warnanya!). Lompat **naik** = menyerap foton. Garis yang terbentuk dikumpulkan di layar spektrum. Coba nyalakan **gas panas** dan tunggu sampai keempat garis tampak Balmer muncul. Bisakah kamu membuat garis ungu 410 nm sendiri?

MITOS

"Elektron mengelilingi inti persis seperti planet mengelilingi Matahari."

MITOS

"Makin tinggi lompatan elektron, makin terang cahayanya."

FAKTA

Itu gambaran Bohr yang sangat berguna, tetapi tidak sepenuhnya benar. Elektron tidak punya lintasan tajam. Fisika kuantum menggambarkannya sebagai **awan peluang** (29.7). Yang tetap benar dari Bohr: energinya bertingkat-tingkat.

FAKTA

Besar lompatan menentukan **energi tiap foton**, jadi menentukan **warna** -nya. Terangnya cahaya ditentukan oleh **banyaknya foton**, yaitu berapa banyak atom yang melompat setiap detik.

29.4 Spektrum hidrogen: deret Lyman, Balmer, Paschen

Jauh sebelum Bohr, guru matematika Swiss Johann Balmer (1885) menemukan rumus yang cocok dengan empat garis tampak hidrogen. Johannes Rydberg lalu memperluasnya. Bohr akhirnya bisa *menurunkan* rumus itu dari modelnya, dan inilah kemenangan besar model Bohr:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}, \quad n_2 > n_1.$$

Di sini n_1 adalah tingkat tujuan (bawah) dan n_2 tingkat asal (atas). Semua lompatan yang berakhir di tingkat yang sama membentuk satu **deret** (keluarga garis):

Deret	Turun ke n_1	Rentang panjang gelombang	Wilayah	Ditemukan
Lyman	1	91–122 nm	ultraviolet	1906
Balmer	2	365–656 nm	cahaya tampak (sebagian UV dekat)	1885
Paschen	3	820–1875 nm	inframerah	1908
Brackett	4	1458–4051 nm	inframerah	1922
Pfund	5	2279–7458 nm	inframerah jauh	1924



TRIK KAK NARA: URUTAN DERET

Hafalkan kalimat "**L**ihat **B**intang **P**agi, **B**ulan **P**ergi" untuk Lyman (ke $n = 1$), Balmer (ke 2), Paschen (ke 3), Brackett (ke 4), Pfund (ke 5). Hanya deret Balmer yang punya garis berwarna yang bisa dilihat mata.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{(n_1 + k)^2} \right)$$

Pilih tingkat tujuan n_1 dan seberapa jauh elektron jatuh (k anak tangga). Jatuh makin jauh, foton makin berenergi, panjang gelombangnya makin pendek.

n_1 Tingkat tujuan (bawah)

k Jumlah anak tangga yang dilompati ($n_2 - n_1$)

λ Panjang gelombang foton nm

PANJANG GELOMBANG FOTON

656,3

nm

Elektron jatuh sejauh **1** anak tangga hingga mendarat di tingkat **2**. Foton yang lahir punya panjang gelombang **656,3** nm. Cahaya tampak berada di antara ± 380 nm dan ± 750 nm.

Cek satuan: R bersatuan m^{-1} , sehingga $1/R$ bersatuan meter. Hasilnya dikali 10^9 supaya menjadi nanometer.

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

COBA SENDIRI Berapa garis dari tingkat 4?

Segumpal gas hidrogen dibuat sehingga elektron-elektronnya tereksitasi sampai tingkat $n = 4$. (a) Berapa macam garis spektrum yang mungkin muncul saat elektron-elektron itu turun? (b) Hitung panjang gelombang terpendek di antaranya.

1 Pasangan tingkat yang mungkin: $4 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 2$, $4 \rightarrow 1$, $3 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 1$, $2 \rightarrow 1$. Jadi ada **6** garis. Rumus umumnya $n(n-1)/2 = 4 \times 3/2 = 6$.

2 Panjang gelombang terpendek = energi terbesar = lompatan terjauh, yaitu $4 \rightarrow 1$.

3 $\Delta E = 13,6 \left(1 - \frac{1}{16}\right) = 13,6 \times \frac{15}{16} = 12,75 \text{ eV}$.

4 $\lambda = 1240/12,75 \approx 97,3 \text{ nm}$.

(a) **6** garis. (b) $\lambda_{\min} \approx 97 \text{ nm}$, di wilayah ultraviolet (deret Lyman). Hanya dua dari enam garis itu yang tampak oleh mata: $4 \rightarrow 2$ (486 nm, biru kehijauan) dan $3 \rightarrow 2$ (656 nm, merah).



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MENURUNKAN MODEL BOHR DALAM EMPAT BARIS

Gaya Coulomb menjadi gaya sentripetal: $\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$. Postulat Bohr: $mvr = n\hbar$. Eliminasi v menghasilkan

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{mke^2} = n^2 a_0, \quad a_0 \approx 0,0529 \text{ nm},$$

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{ke^2}{r_n} = -\frac{ke^2}{2r_n} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}.$$

Kecepatan elektron di orbit pertama $v_1 = \alpha c \approx 2,19 \times 10^6 \text{ m/s}$, dengan $\alpha \approx 1/137$ disebut *konstanta struktur halus*. Untuk ion berelektron tunggal (He^+ , Li^{2+}) ganti ke^2 dengan Zke^2 : $r_n \propto n^2/Z$ dan $E_n \propto -Z^2/n^2$. Koreksi kecil karena inti ikut bergoyang (massa tereduksi) membuat garis deuterium sedikit bergeser dari garis hidrogen biasa. Pergeseran mungil inilah yang dipakai Harold Urey untuk menemukan deuterium pada tahun 1931.

29.5 Spektrum emisi & serapan: sidik jari unsur dan bintang

Setiap unsur punya susunan tangga energi yang berbeda, jadi setiap unsur memancarkan kumpulan garis yang berbeda pula. Kumpulan garis ini unik seperti **sidik jari**. Ada tiga jenis spektrum yang perlu kamu kenali:

Kontinu

benda padat panas



Emisi H

gas tipis berpijar



Serapan H

cahaya lewat gas dingin



400

500

600

700 nm

garis terang emisi = garis gelap serapan, di posisi yang persis sama!

Gas hidrogen memancarkan dan menyerap pada panjang gelombang yang sama: 656, 486, 434, dan 410 nm.
(Skala warna disederhanakan.)

- **Spektrum kontinu:** pelangi utuh tanpa celah, dipancarkan benda padat, cair, atau gas rapat yang panas, misalnya filamen lampu pijar atau besi membara.
- **Spektrum emisi (garis terang):** garis-garis berwarna di atas latar gelap, dipancarkan gas tipis yang panas atau dialiri listrik, misalnya lampu sodium dan lampu reklame neon.
- **Spektrum serapan (garis gelap):** pelangi dengan garis-garis hitam. Muncul saat cahaya kontinu melewati gas yang lebih dingin. Atom gas menyerap foton yang energinya pas untuk lompatan naik, sehingga warna itu "hilang".

Cahaya Matahari ternyata penuh garis gelap. Atmosfer Matahari yang lebih dingin menyerap warna-warna tertentu. Dengan mencocokkan garis gelap itu dengan spektrum unsur di laboratorium, para astronom bisa mengetahui **bintang terbuat dari apa** tanpa perlu ke sana!



TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1814, pembuat lensa Jerman Joseph von Fraunhofer mencatat ratusan garis gelap misterius di spektrum Matahari. Sekitar tahun 1860, Gustav Kirchhoff dan Robert Bunsen (penemu pembakar Bunsen) membuktikan bahwa garis-garis itu adalah sidik jari unsur. Mereka bahkan menemukan dua unsur baru, sesium dan rubidium, hanya dari garis spektrumnya. Tahun 1868, saat gerhana Matahari, para astronom melihat garis kuning baru di 587,6 nm yang tidak cocok dengan unsur apa pun di Bumi. Unsur itu dinamai **helium** (dari *helios*, Matahari). Helium baru ditemukan di Bumi 27 tahun kemudian!

Kembang api bekerja dengan prinsip yang sama: garam logam yang berbeda memancarkan garis-garis yang berbeda. Hal ini juga dipakai di laboratorium kimia dalam **uji nyala**:

Unsur (logam)	Warna nyala	Dipakai untuk
Natrium (Na)	kuning-oranye (589 nm)	lampu jalan sodium, kembang api kuning
Stronsium (Sr)	merah terang	kembang api merah, suar darurat kapal

Litium (Li)	merah tua (merah karmin)	kembang api merah tua
Kalsium (Ca)	merah-oranye bata	kembang api oranye
Barium (Ba)	hijau muda	kembang api hijau
Tembaga (Cu)	biru kehijauan	kembang api biru (paling sulit dibuat!)
Kalium (K)	ungu muda (lila)	uji nyala di laboratorium

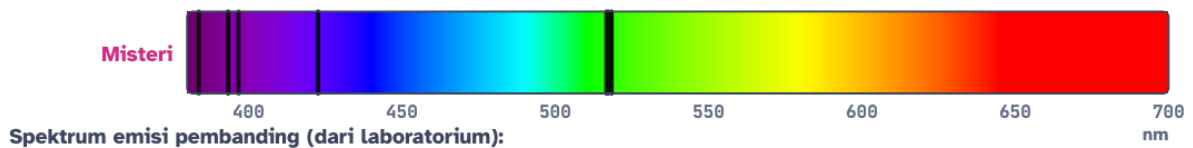


FISIKA INDONESIA

Banyak jalan raya dan jalan tol di Indonesia dulu diterangi **lampu natrium (sodium)** berwarna kuning-oranye. Lampu ini hemat karena sebagian besar cahayanya dipancarkan atom natrium di sekitar 589 nm, warna yang mudah ditangkap mata. Kelemahannya, warna benda di bawahnya sulit dibedakan: baju merah bisa tampak coklat kusam! Kini banyak yang diganti lampu LED putih. Di Lembang, para astronom **Observatorium Bosscha** memakai spektrograf untuk membaca sidik jari cahaya bintang, persis seperti Lab Mini di bawah ini.

Bintang misteri #1

petunjuk: cari garis GELAP



Kasus

Bintang misteri #1

Hasil pemeriksaan

Centang unsur yang garisnya cocok

Benar beruntun

0

Layar atas menampilkan spektrum **misteri**. Centang unsur-unsur pembanding di bawah, cocokkan garisnya, lalu tekan **Periksa**. Untuk bintang, cari garis *gelap*. Untuk lampu, cari garis *terang*. Bisakah kamu memecahkan lima misteri berturut-turut?

MITOS

"Warna kembang api berasal dari cat atau pewarna."

MITOS

"Garis gelap pada spektrum Matahari berarti ada bagian Matahari yang tidak bersinar."

FAKTA

Pewarna akan hangus terbakar. Warnanya berasal dari

atom logam

(stronsium, barium, tembaga, natrium) yang dipanaskan, sehingga elektronnya melompat turun dan memancarkan foton dengan energi khas.

FAKTA

Matahari bersinar di semua warna, tetapi gas di atmosfernya

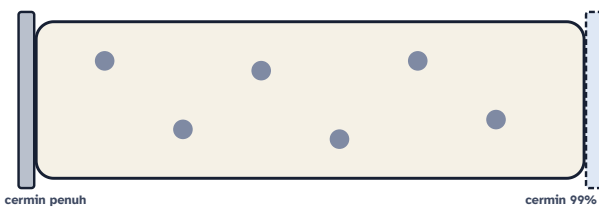
menyerap

warna-warna tertentu sebelum cahayanya sampai ke Bumi. Garis gelap adalah jejak atom penyerap itu.

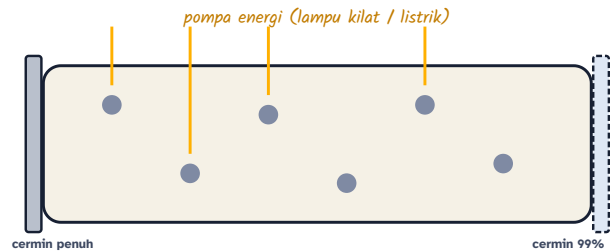
29.6 Laser: pasukan foton kembar

Biasanya atom memancarkan foton secara **spontan**: kapan saja, ke arah mana saja, dan tidak kompak. Tahun 1917, Einstein meramalkan cara lain. Jika foton yang energinya pas lewat di dekat atom yang sedang tereksitasi, foton itu bisa "memancing" atom melepaskan foton **kembar identik**: warnanya sama, arahnya sama, dan iramanya (fasenya) sama. Peristiwa ini disebut **emisi terstimulasi**.

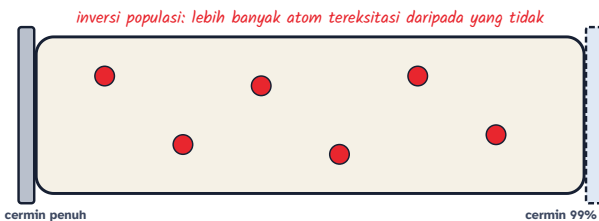
LASER adalah singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, artinya penguatan cahaya lewat emisi terstimulasi. Laser pertama dibuat Theodore Maiman pada tahun 1960 dari kristal batu delima (rubi) dan memancarkan cahaya merah 694 nm.



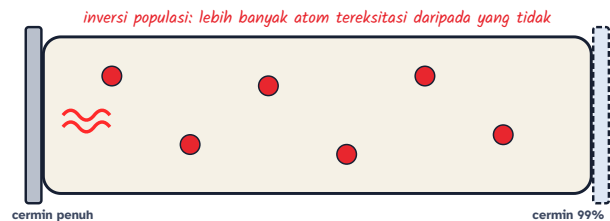
Langkah 1. Di dalam tabung laser ada banyak atom (abu-abu = keadaan dasar). Kedua ujung tabung dipasang cermin. Cermin kanan sedikit tembus cahaya.



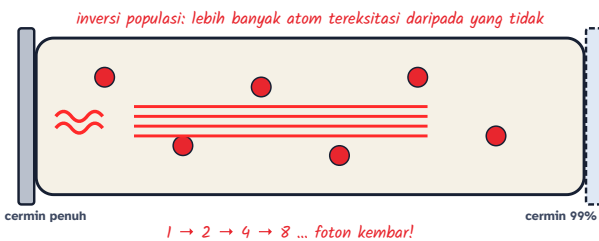
Langkah 2. Atom-atom **dipompa** dengan energi dari lampu kilat atau arus listrik.



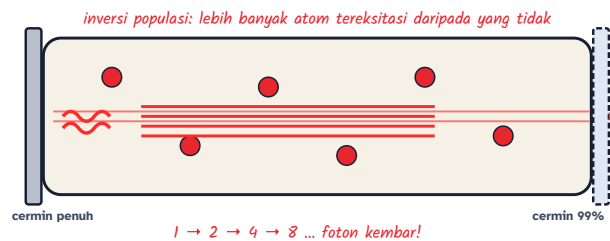
Langkah 3. Atom tertahan di tingkat tereksitasi yang agak "awet" (tingkat *metastabil*). Kini atom yang tereksitasi lebih banyak daripada yang tidak. Keadaan langka ini disebut **inversi populasi**.



Langkah 4. Satu foton spontan yang energinya pas mulai berjalan menyusuri tabung.



Langkah 5. Setiap kali melewati atom tereksitasi, foton itu memancing foton kembar. Jumlahnya berlipat ganda seperti longsor: 1, 2, 4, 8, ...



Langkah 6. Cermin memantulkan foton bolak-balik sehingga longsor makin kuat. Sebagian kecil lolos dari cermin kanan menjadi **berkas Laser**: satu warna, searah, dan seirama.

Tiga sifat istimewa cahaya laser adalah **monokromatis** (satu warna), **koheren** (semua gelombang seirama), dan **terarah** (berkasnya hampir tidak melebar). Pointer laser biasanya hanya memancarkan beberapa miliwatt, jauh

lebih kecil daripada daya cahaya senter. Namun seluruh cahayanya terkumpul dalam berkas sempit, sehingga lensa mata bisa memfokuskannya menjadi titik yang sangat panas di retina.



AWAS: LASER BUKAN MAINAN UNTUK MATA

Jangan pernah mengarahkan pointer laser ke mata siapa pun, termasuk hewan, dan jangan pernah ke pesawat terbang. Kilatan laser bisa membuat pilot silau tepat saat mendarat. Kerusakan retina bisa terjadi dalam sekejap dan tanpa rasa sakit.



Pemindai kasir minimarket

Berkas laser merah (± 650 nm) menyapu kode batang (*barcode*). Garis hitam menyerap cahaya, garis putih memantulkannya. Sensor membaca pola pantulan itu sebagai angka harga.



Operasi mata LASIK

Laser ultraviolet 193 nm mengikis lapisan kornea setipis mikrometer untuk membentuk ulang kelengkungan kornea, sehingga penderita rabun bisa lepas dari kacamata.



Internet serat optik

Laser inframerah berkedip miliaran kali per detik di dalam serat kaca jaringan Palapa Ring, membawa pesan dan video ke seluruh Nusantara.



Pertunjukan kembang api

Garam stronsium, barium, tembaga, dan natrium dicampur ke dalam selongsong. Saat meledak, setiap jenis atom memancarkan warna khasnya.



Lampu TL di rumah

Uap merkuri di dalam tabung memancarkan garis ultraviolet. Lapisan fosfor di dinding tabung menyerapnya lalu memancarkan cahaya putih.



Membaca isi bintang

Dari garis spektrum, astronom tahu bintang mengandung hidrogen, helium, kalsium, atau besi, serta seberapa panas dan seberapa cepat bintang itu bergerak.

29.7

Atom kuantum modern: elektron sebagai awan

Model Bohr luar biasa untuk hidrogen, tetapi gagal untuk atom berelektron banyak seperti helium. Bohr juga tidak bisa menjelaskan *mengapa* orbit tertentu saja yang diizinkan. Jawabannya datang dari gelombang materi de Broglie (Bab 28): elektron juga bersifat gelombang. Orbit yang diizinkan adalah orbit yang kelilingnya pas memuat bilangan bulat panjang gelombang elektron, seperti senar gitar yang hanya bergetar pada nada-nada tertentu.

Tahun 1926, Erwin Schrödinger menulis persamaan gelombang untuk elektron. Hasilnya: elektron tidak punya lintasan tajam. Kita hanya bisa tahu **peluang** menemukannya di suatu tempat. Daerah dengan peluang besar disebut **orbital**, yang digambarkan sebagai **awan elektron**. Makin pekat awannya, makin besar peluang elektron

ditemukan di situ. Werner Heisenberg menambahkan bahwa posisi dan momentum elektron tidak bisa diketahui sekaligus dengan tepat (*prinsip ketidakpastian*).

Bahasa sederhana • Bayangkan memotret kipas angin yang berputar cepat dengan waktu pencahayaan lama. Bilahnya tampak sebagai **bayangan kabur** yang memenuhi lingkaran. Awan elektron mirip seperti itu: kita tidak bisa menunjuk "di sini elektronnya", tetapi kita tahu di mana ia sering berada.

RUMUS HIDUP Ukuran orbit Bohr (perkiraan ukuran atom)

$$r_n = 0,0529 \text{ nm} \times \frac{n^2}{Z}$$

Jari-jari orbit tumbuh sebanding n kuadrat: tangga ke-2 empat kali lebih jauh, tangga ke-3 sembilan kali lebih jauh dari tangga pertama.

n Tingkat (bilangan kuantum utama)

Z Nomor atom (ion berelektron tunggal)

r_n Jari-jari orbit nm

JARI-JARI ORBIT

0,0529

nm

Di tingkat $n = 1$ ($Z = 1$), elektron berada sekitar **0,0529 nm** dari inti. Bandingkan dengan jari-jari proton yang hanya $\pm 0,00000084$ nm!

Cek satuan: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$. Atom hidrogen dalam keadaan dasar berdiameter sekitar 0,1 nm, kira-kira sejuta kali lebih kecil daripada ketebalan rambutmu.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-BOHR-JARI](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-bohr-jari)

Model	Gambaran	Bisa menjelaskan	Gagal menjelaskan
Dalton (1803)	bola pejal tak terbagi	hukum perbandingan massa dalam reaksi kimia	adanya elektron
Thomson (1904)	roti kismis	atom netral yang berisi elektron	pantulan balik partikel alfa

Rutherford (1911)	inti kecil padat, elektron di sekitarnya	hasil hamburan alfa	kestabilan atom, spektrum garis
Bohr (1913)	orbit bertingkat energi	spektrum hidrogen dengan tepat	atom berelektron banyak, alasan kuantisasi
Kuantum (1926)	awan peluang (orbital)	semua atom, ikatan kimia, tabel periodik	masih menjadi model terbaik hingga kini



TAMU DARI MASA LALU

Rutherford menerima Hadiah Nobel tahun 1908, tetapi di bidang **Kimia** (untuk penelitiannya tentang radioaktivitas), bukan Fisika, dan ia sempat bercanda soal itu. Niels Bohr menerima Nobel Fisika tahun 1922. Laboratorium Bohr di Kopenhagen menjadi tempat berkumpul fisikawan muda yang kelak membangun fisika kuantum.

Cek Cepat

Dalam percobaan hamburan Rutherford, kenyataan bahwa sebagian besar partikel alfa menembus lurus menunjukkan bahwa...

partikel alfa bermuatan negatif

atom sebagian besar berupa ruang kosong

inti atom bermuatan negatif

elektron sangat berat

Elektron atom hidrogen melompat dari $n = 4$ ke $n = 2$. Atom itu...

menyerap foton cahaya tampak

memancarkan foton ultraviolet (deret Lyman)

tidak memancarkan apa-apa

memancarkan foton cahaya tampak (deret Balmer)

Spektrum cahaya Matahari menunjukkan garis-garis gelap. Garis-garis itu terbentuk karena...

atom-atom di atmosfer Matahari menyerap panjang gelombang tertentu

Matahari tidak memancarkan warna-warna itu sama sekali

debu di Bumi menghalangi cahaya

prisma yang dipakai rusak

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. D • 3. A



Tantangan Rumah: spektroskop dari CD bekas

Bahan: CD atau DVD bekas, kotak kardus kecil (misalnya kotak pasta gigi), gunting, selotip hitam, karton hitam

1. Di satu ujung kotak, buat celah sempit (± 1 mm) dari dua potong karton yang hampir bersentuhan.
2. Di ujung lain, buat lubang intip dan tempelkan potongan CD dengan sisi mengkilap menghadap ke dalam, miring kira-kira 45° .
3. Arahkan celah ke lampu pijar atau lampu LED putih, lalu ke lampu TL (neon), lampu jalan kuning, atau lampu reklame. Intip pelanginya.
4. Gambar pola warna yang kamu lihat untuk setiap lampu.

Pertanyaan: Lampu mana yang memberi pelangi utuh (spektrum kontinu), dan lampu mana yang memberi garis-garis terpisah? Unsur apa yang mungkin ada di lampu TL? **Jangan pernah mengarahkan spektroskop ke Matahari!**



RINGKASAN KILAT

Bab 29 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menceritakan perkembangan **model atom** dari Thomson, Rutherford, Bohr, sampai model kuantum, beserta bukti percobaannya
- menafsirkan **percobaan hamburan alfa**: mengapa atom hampir kosong dan punya inti kecil yang padat
- menghitung **tingkat energi** atom hidrogen $E_n = -13,6/n^2$ eV serta panjang gelombang foton yang dipancarkan atau diserap
- membedakan **spektrum emisi dan serapan**, deret Lyman, Balmer, Paschen, dan memakai spektrum sebagai "sidik jari" unsur
- menjelaskan cara kerja **laser** dan kegunaannya di sekitarmu

Istilah kunci

elektron

roti kismis

partikel alfa

inti atom

postulat

bilangan kuantum utama

terkuantisasi

deret

uji nyala

emisi terstimulasi

orbital

Rumus penting

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV} \cdot Z^2}{n^2}$$

Tingkat energi atom hidrogen (model Bohr).

Makin tinggi anak tangga n , makin mendekati nol energinya. Tanda minus berarti elektron masih 'terikat' pada inti.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{(n_1 + k)^2} \right)$$

Panjang gelombang garis spektrum hidrogen.

Pilih tingkat tujuan n_1 dan seberapa jauh elektron jatuh (k anak tangga). Jatuh makin jauh, foton makin berenergi, panjang gelombangnya makin pendek.

$$r_n = 0,0529 \text{ nm} \times \frac{n^2}{Z}$$

Ukuran orbit Bohr (perkiraan ukuran atom).

Jari-jari orbit tumbuh sebanding n kuadrat: tangga ke-2 empat kali lebih jauh, tangga ke-3 sembilan kali lebih jauh dari tangga pertama.

Jangan sampai terjebak

- Atom memang hampir kosong dari massa, tetapi ruang itu dipenuhi medan listrik elektron.
- Jangan pernah mengarahkan pointer laser ke mata siapa pun, termasuk hewan, dan jangan pernah ke pesawat terbang.

 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=29

Teka-teki untuk Bab 30

Sebuah bintang melesat **mendekati** Bumi dengan kecepatan 100.000 km/s sambil memancarkan cahaya merah H-alfa. Cahaya bergerak 300.000 km/s. Apakah cahaya bintang itu tiba di Bumi dengan kecepatan $300.000 + 100.000 = 400.000$ km/s?

▼ Intip petunjuk

Warna cahayanya memang bergeser ke arah biru (efek Doppler, seperti sirene ambulans di Bab 19). Tetapi kelajuannya? Para fisikawan mengukurnya berulang kali dan selalu mendapat angka yang sama. Albert Einstein berani menjadikan fakta aneh ini sebagai aturan dasar alam, dan akibatnya waktu pun bisa melar. Kita bongkar di Bab 30!

30 Relativitas Khusus: Saat Waktu Bisa Melar

Dua anak kembar berpisah. Yang satu terbang ke bintang dengan roket super cepat, yang lain tetap di Bumi. Saat bertemu lagi, usia mereka berbeda! Ini bukan cerita fiksi ilmiah, melainkan akibat langsung dari satu fakta aneh tentang cahaya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **kerangka acuan**, relativitas Galileo, dan dua **postulat Einstein**;
- menurunkan **dilatasi waktu** dari jam cahaya dan menghitung faktor Lorentz γ ;
- menghitung **kontraksi panjang** dan **penjumlahan kecepatan** relativistik;
- memakai $E = mc^2$ serta energi total dan energi kinetik relativistik;
- menjelaskan bukti nyata relativitas: **muon** dari sinar kosmik dan koreksi jam satelit **GPS**.

KEMBAR BEDA USIA

KOMIK • 4 PANEL

Tahun 2040, bandar antariksa Biak

RIKA

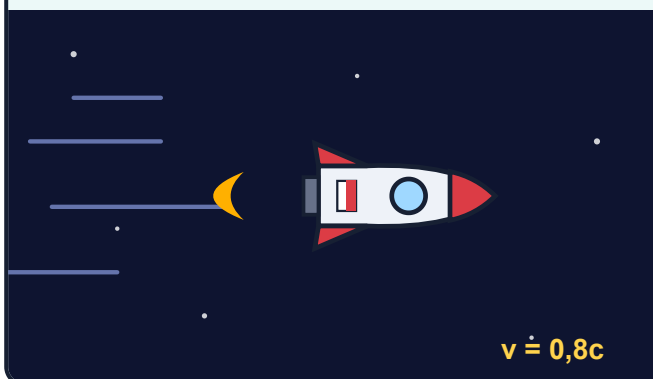
Dah, Raka! Aku cuma pergi ke bintang Proxima, kok. Pulang nanti kita tetap kembar!

RAKA

Hati-hati, Rik! Jangan lupa oleh-oleh!

**WUSSS!****RIKA**

Jam tanganku berdetak biasa saja. Enam tahun lagi aku sampai di rumah!

 $v = 0,8c$

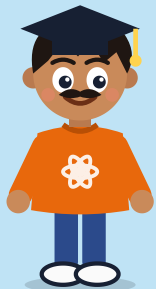
Tahun 2050, Biak

RAKA

RIKA?! Kok kamu masih kayak anak SMA? Aku sudah sarjana, lho!

RIKA

Kamu kok berkumis?! Aku cuma pergi enam tahun!



22 tahun



18 tahun

KAK NARA

Bukan sulap! Waktu memang **melar** bagi yang bergerak sangat cepat. Einstein menghitungnya tahun 1905.

TARSI

Fakta unik: jam satelit GPS di HP-mu juga harus dikoreksi efek ini setiap hari!



30.1

Diam atau bergerak? Tergantung siapa yang melihat

Raka duduk di kereta cepat Whoosh yang melaju mulus 350 km/jam. Ia menjatuhkan bola dari tangannya. Menurut Raka, bola jatuh **lurus ke bawah**, tepat di dekat kakinya. Menurut Sari yang berdiri di dekat rel, bola itu bergerak **melengkung** (parabola), karena selain jatuh, bola juga ikut melaju ke depan bersama kereta. Siapa yang benar? **Keduanya!** Mereka hanya mengamati dari **kerangka acuan** yang berbeda.

Kerangka acuan adalah "tempat berdiri" pengamat beserta penggaris dan jamnya. Kerangka yang diam atau bergerak lurus dengan kecepatan tetap disebut **kerangka inersia**. Di semua kerangka inersia, hukum Newton berlaku sama persis.



TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1632, Galileo Galilei mengajak pembacanya membayangkan kabin tertutup di dalam kapal yang berlayar sangat mulus. Kupu-kupu tetap terbang ke segala arah dengan santai, tetesan air tetap jatuh lurus ke dalam botol, dan bola yang dilempar ke teman terasa sama saja. Tanpa melihat keluar, **tidak ada percobaan** yang bisa memberi tahu apakah kapal sedang diam atau berlayar. Inilah **prinsip relativitas Galileo**.

Bahasa sederhana • Pernahkah kamu duduk di kereta yang diam, lalu kereta di sebelahmu berjalan pelan, dan kamu merasa keretamu sendiri yang bergerak? Itu karena gerak selalu **relatif**: kamu hanya bisa bilang "aku bergerak" jika membandingkannya dengan sesuatu yang lain.

Dalam fisika Galileo dan Newton, kecepatan tinggal dijumlahkan. Jika Raka melempar bola ke depan dengan kecepatan 10 m/s di dalam kereta yang melaju 97 m/s, Sari mengukur bola itu bergerak $97 + 10 = 107$ m/s. Rumusnya $u = u' + v$. Sederhana, masuk akal, dan... ternyata **tidak berlaku untuk cahaya!**



Tebak Dulu!

Raka di atas Whoosh (350 km/jam) menyalakan senter ke arah depan. Sari di samping rel mengukur kecepatan cahaya senter itu dengan alat super teliti. Hasilnya...

sedikit lebih besar dari c , yaitu $c + 350$ km/jam.

sedikit lebih kecil dari c , karena udara menghambat cahaya.

tepat c , sama seperti yang diukur Raka di dalam kereta.

tergantung seberapa terang senternya.

Jawabannya: tepat c . Kecepatan cahaya dalam ruang hampa selalu terukur sama, yaitu sekitar 300.000 km/s, tidak peduli seberapa cepat sumbernya atau pengamatnya bergerak. Fakta ini sudah diuji ribuan kali, dari cahaya bintang ganda sampai partikel di akselerator. (Di udara, cahaya memang sedikit lebih lambat, tetapi tetap sama untuk Raka maupun Sari.)

30.2 Dua postulat Einstein

Pada akhir abad ke-19, persamaan Maxwell (Bab 27) meramalkan cahaya merambat dengan kelajuan $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \approx 3 \times 10^8$ m/s. Tetapi relatif terhadap apa? Banyak fisikawan menduga ada zat tak terlihat bernama *eter* yang memenuhi alam semesta, tempat cahaya merambat seperti bunyi di udara. Bumi yang mengorbit Matahari seharusnya merasakan "angin eter".

Tahun 1887, Albert Michelson dan Edward Morley membangun alat interferometer super peka untuk mendeteksi angin eter itu. Hasilnya: **nihil**. Cahaya selalu merambat sama cepat ke segala arah. Tahun 1905, Albert Einstein mengambil langkah berani: lupakan eter, dan jadikan fakta itu sebagai hukum dasar.

Postulat	Isi	Artinya bagi kita
1. Prinsip relativitas	Hukum-hukum fisika berbentuk sama di semua kerangka inersia.	Tidak ada kerangka yang "benar-benar diam". Tidak ada percobaan yang bisa menunjukkan gerak mutlak.
2. Kecepatan cahaya tetap	Cahaya dalam ruang hampa merambat dengan kelajuan $c = 299.792.458$ m/s menurut semua pengamat inersia, apa pun gerak sumbernya.	Kalau c harus sama untuk semua orang, maka yang harus "mengalah" adalah waktu dan panjang .



TAMU DARI MASA LALU

Waktu berusia 16 tahun, Einstein melamun: "Bagaimana rasanya mengejar secepat cahaya dengan kecepatan cahaya?" Sepuluh tahun kemudian, saat bekerja sebagai pemeriksa paten di Bern, Swiss, ia menerbitkan empat makalah yang mengubah fisika dalam satu tahun saja (1905): efek fotolistrik (Bab 28), gerak Brown, relativitas khusus, dan $E = mc^2$. Tahun itu dijuluki *annus mirabilis*, tahun keajaiban.



AWAS JEBAKAN: "RELATIVITAS" BUKAN BERARTI "SEMUA RELATIF"

Justru sebaliknya! Teori Einstein dibangun di atas hal-hal yang **mutlak**: kelajuan cahaya c dan bentuk hukum fisika sama bagi semua pengamat. Yang relatif adalah ukuran waktu dan panjang. Einstein sendiri sempat lebih suka menyebutnya "teori invarian".

30.3

Dilatasi waktu: jam cahaya di kereta super cepat

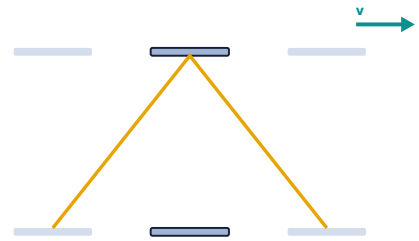
Bayangkan jam paling sederhana di dunia: dua cermin sejajar berjarak L , dengan sebutir foton yang memantul naik-turun di antaranya. Setiap kali foton kembali ke cermin bawah, jam berbunyi "tik". Inilah **jam cahaya**. Bagi Raka yang membawa jam ini di dalam kereta, satu detak memakan waktu $\Delta t_0 = 2L/c$.

Sekarang Sari melihat kereta itu melaju dengan kecepatan v . Ikuti animasinya untuk melihat apa yang dilihat Sari.

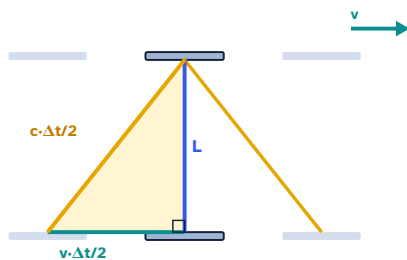


Raka: jam diam, satu detak $\Delta t_0 = 2L/c$

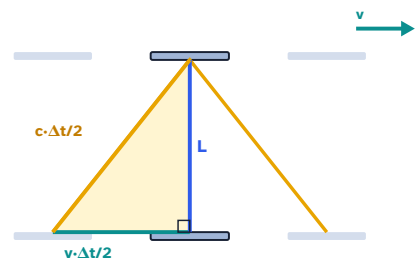
Langkah 1. Di kereta, Raka melihat foton naik-turun lurus sejauh L . Satu detak: $\Delta t_0 = 2L/c$. Waktu yang diukur oleh jam yang diam terhadap pengamatnya disebut **waktu diri** (*proper time*).



Langkah 2. Sari di peron melihat kereta bergerak. Selama foton naik dan turun, cermin sudah bergeser ke kanan. Jadi menurut Sari, foton menempuh lintasan **miring** berbentuk zigzag.

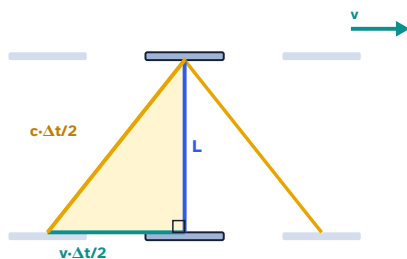


Langkah 3. Ambil setengah detak (menurut Sari lamanya $\Delta t/2$). Terbentuk segitiga siku-siku: alasnya jarak geser kereta $v \Delta t/2$, tingginya L , dan sisi miringnya jarak tempuh foton $c \Delta t/2$. Ingat: menurut Sari pun, foton tetap melaju c !



$$(c \cdot \Delta t/2)^2 = L^2 + (v \cdot \Delta t/2)^2$$

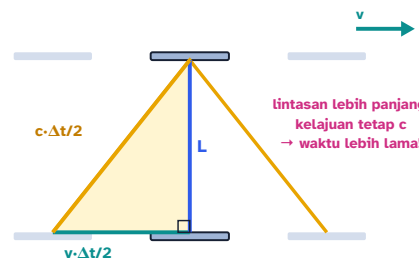
Langkah 4. Pakai teorema Pythagoras pada segitiga itu.



$$(c \cdot \Delta t/2)^2 = L^2 + (v \cdot \Delta t/2)^2$$

$$\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = \gamma \cdot \Delta t_0$$

Langkah 5. Selesaikan untuk Δt , lalu ganti $2L/c$ dengan Δt_0 . Hasilnya $\Delta t = \gamma \Delta t_0$, dengan $\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ yang selalu ≥ 1 .



$$(c \cdot \Delta t/2)^2 = L^2 + (v \cdot \Delta t/2)^2$$

$$\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = \gamma \cdot \Delta t_0$$

Langkah 6. Kesimpulan: menurut Sari, jam Raka berdetak **lebih lambat**. Ini bukan karena jamnya rusak. Waktu itu sendiri yang berjalan lebih lambat untuk benda yang bergerak relatif terhadap pengamat. Inilah **dilatasi waktu**.

Bilangan γ disebut **faktor Lorentz**. Pada kecepatan sehari-hari, γ sangat dekat dengan 1, sehingga efeknya tidak terasa. Baru ketika v mendekati c , nilainya meroket.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

Gamma adalah 'faktor peregang' waktu. Pada v kecil hampir tepat 1, lalu melonjak tanpa batas saat v mendekati c .

 β Kecepatan sebagai pecahan c (v/c) γ

Faktor Lorentz

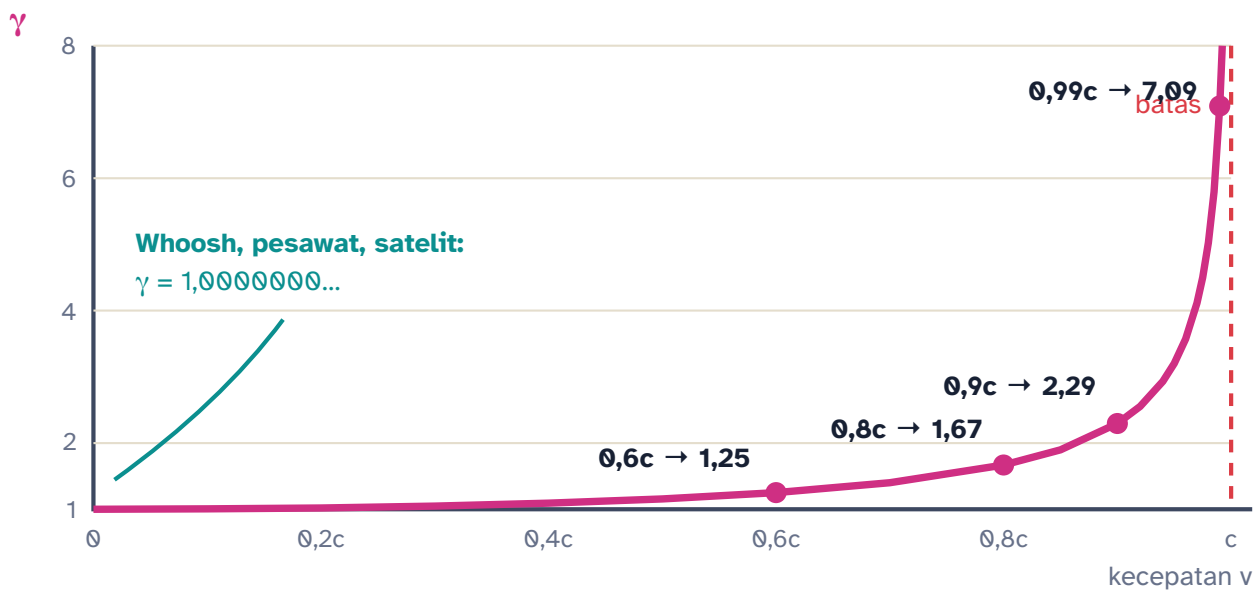
FAKTOR LORENTZ

1,667

Pada $v = 0,8c$, $\gamma = 1,667$. Satu detik di benda itu terukur **1,667** detik oleh pengamat yang diam.

Cek satuan: γ tidak bersatuan, karena v/c adalah perbandingan dua kecepatan.

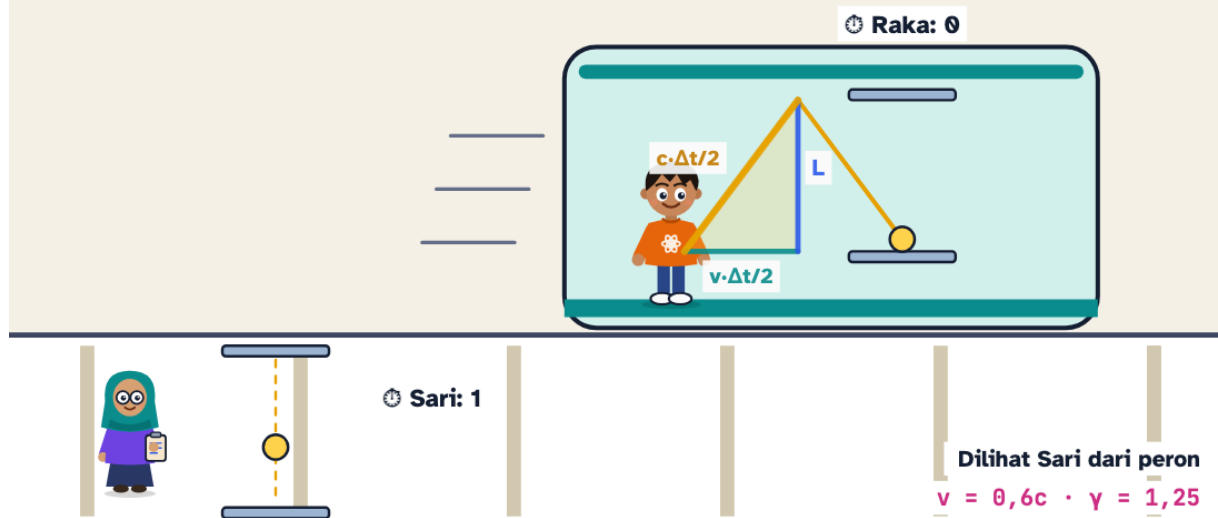
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-GAMMA



Faktor Lorentz γ hampir datar di angka 1 sampai sekitar separuh kecepatan cahaya, lalu melesat ke tak hingga saat $v \rightarrow c$.

LAB MINI Jam cahaya di kereta super cepat

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-30



Dilihat Sari dari peron
 $v = 0,6c \cdot \gamma = 1,25$

Faktor γ
1,25

Detak jam Sari
1 detak

Detak jam Raka
0 detak (jamnya bergerak)

Periode jam yang bergerak
1,25 s

Atur kecepatan kereta, lalu jalankan. Bandingkan jumlah detak jam Sari dan jam Raka. Lalu ganti **sudut pandang** ke dalam kereta. Siapa yang sekarang jamnya terlambat? Nyalakan **segitiga** untuk melihat asal rumusnya.



TRIK KAK NARA: SIAPA YANG MEMAKAI Δt_0 ?

Δt_0 selalu milik jam yang **ikut bergerak bersama kejadian** (jam di roket, umur muon, jam tangan Rika). Nilainya selalu yang **paling kecil**. Pengamat lain selalu mengukur waktu yang lebih panjang: $\Delta t = \gamma \Delta t_0$. Kalau hasil hitunganmu terbalik (waktu pengamat diam lebih kecil), berarti kamu tertukar!

CONTOH Gamma di 0,6c

Sebuah pesawat antariksa melaju dengan $v = 0,6c$. Berapa faktor Lorentz γ -nya?

1 $\beta^2 = 0,6^2 = 0,36$, sehingga $1 - \beta^2 = 0,64$.

2 $\sqrt{0,64} = 0,8$, jadi $\gamma = 1/0,8 = 1,25$.

$\gamma = 1,25$. Setiap 4 jam di pesawat terukur 5 jam oleh pengamat di Bumi. Angka 0,6 dan 0,8 adalah pasangan favorit pembuat soal, mirip segitiga 3-4-5!



Tebak Dulu!

Rika terbang ke bintang lalu pulang dengan roket berkecepatan $0,8c$, sedangkan Raka tetap di Bumi. Menurut Rika, Raka-lah yang bergerak menjauh lalu mendekat. Saat bertemu lagi...

usia mereka tetap sama, karena gerak itu relatif.

Rika lebih tua, karena ia mengalami percepatan.

Rika lebih muda daripada Raka.

tidak bisa ditentukan, tergantung siapa yang menghitung.

Rika lebih muda. Situasinya *tidak* simetris. Raka diam di satu kerangka inersia sepanjang waktu. Rika harus berbalik arah di bintang tujuan, artinya ia berpindah dari kerangka "pergi" ke kerangka "pulang". Perpindahan kerangka inilah yang membuat perhitungan Rika berbeda. Semua cara perhitungan yang benar sepakat: Rika yang lebih muda. Teka-teki ini terkenal dengan nama **paradoks kembar**.

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Waktu yang dialami penumpang roket (Δt_0) terukur lebih lama oleh pengamat di Bumi (Δt).

Δt_0 Waktu di roket (waktu diri) tahun

v Kecepatan roket km/s

Δt Waktu menurut pengamat di Bumi tahun

WAKTU MENURUT PENGAMAT DI
BUMI

10,0123

tahun

Rika mengalami **6** tahun di roket berkecepatan **240.000** km/s. Di Bumi, Rika mengalami **10,0123** tahun.

Cek satuan: v dan c harus bersatuan sama (di sini km/s), sehingga v/c tidak bersatuan dan Δt bersatuan sama dengan Δt_0 .

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-DILATASI](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-dilatasi)



Raka (tinggal di Bumi)

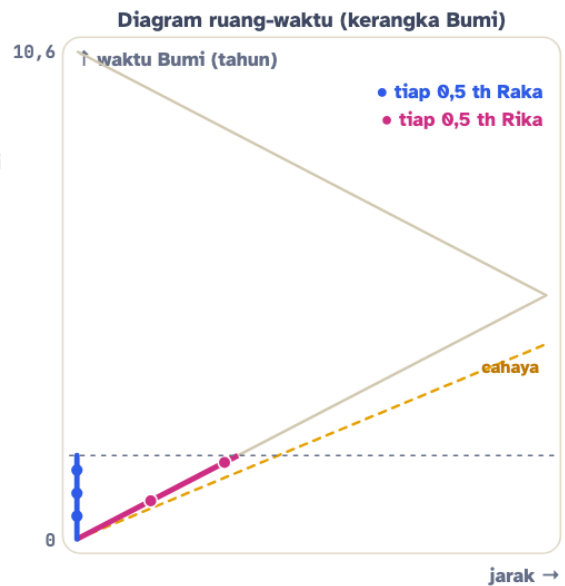
13,8
tahun

+1,82 th berlalu

Rika (di roket)

13,1
tahun

+1,09 th berlalu



Lama perjalanan menurut Bumi

10,6 tahun

Menurut jam Rika

6,36 tahun

Usia Raka saat bertemu

22,6 tahun

Usia Rika saat bertemu

18,4 tahun

Pilih bintang tujuan dan kecepatan roket, lalu jalankan. Perhatikan **diagram ruang-waktu** di kanan: setiap titik adalah ulang tahun. Titik-titik Rika makin renggang saat roket makin cepat. Bisakah kamu membuat Rika pulang ke Bumi saat usianya baru 13 tahun?

Rika (12 tahun) terbang ke Proxima Centauri yang berjarak 4,24 tahun cahaya, lalu langsung pulang, dengan kecepatan tetap 0,8c. Abaikan waktu mempercepat dan berbalik. Berapa usia Raka dan Rika saat bertemu lagi?

- 1 Menurut Bumi, jarak pulang-pergi $2 \times 4,24 = 8,48$ tahun cahaya. Waktu tempuh: $\Delta t = 8,48/0,8 = 10,6$ tahun.
- 2 Untuk $v = 0,8c$: $\gamma = 1/\sqrt{1 - 0,64} = 1/0,6 = 1,667$.
- 3 Waktu diri Rika: $\Delta t_0 = \Delta t/\gamma = 10,6 \times 0,6 = 6,36$ tahun.
- 4 Usia Raka: $12 + 10,6 = 22,6$ tahun. Usia Rika: $12 + 6,36 \approx 18,4$ tahun.

Raka $\pm 22,6$ tahun, Rika $\pm 18,4$ tahun. Selisih lebih dari 4 tahun, persis seperti di komik pembuka!

MITOS

"Waktu di roket melambat karena mesin jamnya terguncang."

MITOS

"Dilatasi waktu hanya ada di teori, tidak pernah dibuktikan."

FAKTA

Semua proses ikut melambat bersama-sama: jam atom, detak jantung, pertumbuhan rambut, peluruhan partikel. Bagi Rika sendiri, semuanya terasa normal. Waktu itu sendiri yang berbeda, bukan alat ukurnya yang rusak.

FAKTA

Sudah dibuktikan berkali-kali: jam atom yang diterbangkan dengan pesawat keliling dunia (1971), umur partikel di akselerator, muon dari sinar kosmik, dan satelit GPS yang kamu pakai setiap hari (30.7).

30.4 Kontraksi panjang: benda cepat tampak memendek

Jika waktu bisa melar, panjang pun bisa menyusut. Benda yang bergerak relatif terhadap pengamat terukur **lebih pendek** searah geraknya:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

L_0 adalah **panjang diri**, yaitu panjang benda menurut pengamat yang diam terhadap benda itu. Penyusutan hanya terjadi pada arah gerak. Tinggi dan lebar kereta super cepat tidak berubah, hanya panjangnya yang "terpencet".

$$L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

Panjang benda yang bergerak terukur lebih pendek, dengan faktor $1/\gamma$, hanya pada arah geraknya.

L_0 Panjang diri (diukur saat diam) m

β Kecepatan sebagai pecahan c

L Panjang terukur saat bergerak m

PANJANG TERUKUR SAAT
BERGERAK

160

m

Kereta sepanjang **200** m yang melaju **0,6c** terukur hanya **160** m oleh pengamat di peron.

Satuan Nusantara: $\approx 1,2 \times$ tinggi Monas $\cdot \approx 1,5 \times$ panjang lapangan sepak bola $\cdot \approx 3\%$ dari tinggi Puncak Jaya

Cek satuan: Faktor $\sqrt{1 - \beta^2}$ tidak bersatuan, jadi L bersatuan sama dengan L_0 .

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

Rangkaian kereta super cepat panjangnya **200** m saat diam. Berapa panjangnya menurut pengamat di peron jika kereta melaju **0,6c**?

1 $\sqrt{1 - 0,6^2} = \sqrt{0,64} = 0,8.$

2 $L = 200 \times 0,8 = 160 \text{ m}.$

160 m. Penumpang di dalam kereta tetap mengukur keretanya 200 m. Justru merekalah yang melihat peron memendek!

**TRANSFORMASI LORENTZ DAN RELATIVITAS KESERENTAKAN**

Dilatasi waktu dan kontraksi panjang adalah dua wajah dari satu aturan, yaitu **transformasi Lorentz**. Untuk kerangka S' yang bergerak dengan kecepatan v sepanjang sumbu x:

$$x' = \gamma(x - vt), \quad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right).$$

Suku vx/c^2 berarti dua kejadian yang **serentak** di S (sama t , beda x) **tidak serentak** di S'.

Keserentakan itu relatif! Besaran yang sama bagi semua pengamat adalah *interval ruang-waktu* $s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$. Dari s^2 kita langsung mendapat $\Delta t_0 = \Delta t/\gamma$, sebab pada kerangka diam jam berlaku $\Delta x = 0$. Paradoks kembar pun selesai dengan elegan: waktu diri sepanjang lintasan lurus (Raka) selalu **lebih panjang** daripada sepanjang lintasan yang berbelok (Rika).

30.5 Penjumlahan kecepatan: $0,5c + 0,5c \neq c$

Roket A melaju $0,5c$ relatif terhadap Bumi dan menembakkan proyektil ke depan dengan kecepatan $0,5c$ relatif terhadap roket. Menurut Galileo, proyektil itu bergerak $1,0c$ relatif terhadap Bumi. Menurut Einstein, tidak demikian. Karena waktu dan panjang ikut berubah, rumus penjumlahan kecepatan juga berubah:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}.$$

Di sini v adalah kecepatan roket terhadap Bumi, u' kecepatan benda terhadap roket, dan u kecepatan benda terhadap Bumi. Untuk contoh tadi: $u = (0,5 + 0,5)c/(1 + 0,25) = 0,8c$. Lebih kecil dari c !

v (roket)	u' (terhadap roket)	Galileo: $u' + v$	Einstein: u
97 m/s (Whoosh)	10 m/s	107 m/s	107 m/s (kurang $\pm 10^{-12}$ m/s saja)
$0,5c$	$0,5c$	$1,0c$	$0,8c$
$0,9c$	$0,9c$	$1,8c$	$0,994c$
$0,9c$	c (cahaya)	$1,9c$	c tepat!

Perhatikan baris terakhir: jika $u' = c$, rumus Einstein selalu menghasilkan $u = c$, berapa pun v . Postulat kedua terpenuhi dengan sendirinya. Untuk kecepatan sehari-hari, penyebut $1 + u'v/c^2$ praktis bernilai 1, sehingga rumus Galileo tetap bisa dipakai dengan aman.

Pesawat A bergerak $0,6c$ ke kanan relatif terhadap Bumi. Dari pesawat A, sebuah wahana kecil diluncurkan ke kanan dengan kecepatan $0,8c$ relatif terhadap A. Berapa kecepatan wahana menurut pengamat di Bumi?

1 $v = 0,6c$ (A terhadap Bumi), $u' = 0,8c$ (wahana terhadap A).

2 Pembilang: $u' + v = 1,4c$. Penyebut: $1 + (0,8)(0,6) = 1,48$.

3 $u = 1,4c/1,48 \approx 0,946c$.

$u \approx 0,946c$, bukan $1,4c$. Seberapa pun kamu "menumpuk" kecepatan, hasilnya tidak pernah melewati c .

30.6 $E = mc^2$: massa adalah energi yang "tersimpan"

Makalah kedua Einstein tentang relativitas pada tahun 1905, yang hanya tiga halaman, berisi rumus paling terkenal di dunia. Benda bermassa m yang diam pun menyimpan **energi diam**:

$$E_0 = mc^2.$$

Karena c^2 sangat besar ($9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$), massa sedikit saja setara dengan energi raksasa. Satu gram massa setara $9 \times 10^{13} \text{ J}$, kira-kira 25 juta kWh. Itu cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik belasan ribu rumah selama setahun!

$$E = mc^2$$

Massa dan energi adalah dua wujud dari hal yang sama. Kurs tukarnya c^2 — sangat mahal!

 m

Massa yang diubah menjadi energi kg

 E

Energi setara J

ENERGI SETARA

$$8,99 \times 10^{10}$$

J

Massa 1×10^{-6} kg setara dengan energi $8,99 \times 10^{10}$ J.

Satuan Nusantara: $\approx 21 \times 1$ ton TNT $\cdot \approx 2.643 \times 1$ liter bensin

Cek satuan: $\text{kg} \cdot (\text{m/s})^2 = \text{kg m}^2/\text{s}^2 = \text{J}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-EMC2](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-EMC2)

Untuk benda yang bergerak, energi totalnya $E = \gamma mc^2$, dan **energi kinetiknya** adalah selisih energi total dan energi diam:

$$E_k = (\gamma - 1) mc^2.$$

Saat $v \rightarrow c$, $\gamma \rightarrow \infty$, sehingga energi yang dibutuhkan untuk mempercepat benda bermassa sampai kecepatan cahaya juga tak terhingga. Itulah sebabnya **tidak ada benda bermassa yang bisa mencapai c** . Proton di akselerator LHC dipacu hingga 99,999999% kecepatan cahaya, dengan γ sekitar 7.000, tetapi tetap tidak pernah mencapai c .

Hitung energi yang setara dengan massa 1 gram, dalam joule dan dalam kWh ($1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$).

1 $m = 1 \text{ g} = 1 \times 10^{-3} \text{ kg}$.

2 $E = mc^2 = 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13} \text{ J}$.

3 $E = 9 \times 10^{13} / 3,6 \times 10^6 = 2,5 \times 10^7 \text{ kWh}$.

$9 \times 10^{13} \text{ J}$ atau 25 juta kWh. Dalam reaksi kimia biasa (misalnya membakar bensin), massa yang "hilang" kurang dari sepersemiliar massa bahan bakarnya. Itu terlalu kecil untuk ditimbang, tetapi tetap nyata!



LANJUT • IB & OLIMPIADE

ENERGI, MOMENTUM, DAN FOTON

Momentum relativistik $p = \gamma mv$. Energi dan momentum terhubung lewat

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2.$$

Untuk foton ($m = 0$): $E = pc$, sesuai dengan momentum foton $p = h/\lambda$ di Bab 28. Untuk $v \ll c$, deret binomial $\gamma \approx 1 + \frac{1}{2}\beta^2$ memberi $E_k = (\gamma - 1)mc^2 \approx \frac{1}{2}mv^2$. Rumus Newton muncul kembali sebagai pendekatan! Fisikawan partikel suka memakai satuan MeV: energi diam elektron 0,511 MeV dan proton 938 MeV.

MITOS

"

$$E = mc^2$$

hanya berlaku untuk bom dan reaktor nuklir."

MITOS

"Kalau terus didorong, roket akhirnya bisa melewati kecepatan cahaya."

FAKTA

Rumus ini berlaku untuk

semua

perubahan energi. Teh panas sedikit lebih berat daripada teh dingin, dan baterai penuh sedikit lebih berat daripada baterai kosong. Selisihnya saja yang terlalu kecil untuk ditimbang. Di reaksi inti, selisihnya cukup besar untuk diukur (Bab 31).

FAKTA

Makin mendekati

c

, makin besar energi yang diperlukan untuk menambah kecepatan sedikit saja. Untuk mencapai

c

tepat dibutuhkan energi tak terhingga. Hanya partikel tanpa massa, seperti foton, yang selalu melaju dengan kecepatan

c

.

30.7 Bukti nyata: muon dari langit dan GPS di HP-mu

Setiap detik, Bumi dihujani **sinar kosmik**, yaitu partikel berenergi sangat tinggi dari luar angkasa. Saat menabrak atom udara di ketinggian sekitar 15 km, terbentuklah partikel bernama **muon**, "saudara" elektron yang ± 207 kali lebih berat. Muon tidak stabil: umur rata-ratanya hanya 2,2 mikrodetik (diukur saat muon diam di laboratorium), lalu ia meluruh menjadi elektron dan neutrino.

Teka-tekinya: bahkan dengan kecepatan $0,998c$, muon hanya bisa menempuh sekitar $0,998 \times 3 \times 10^8 \times 2,2 \times 10^{-6} \approx 660$ m dalam 2,2 mikrodetik. Jauh dari cukup untuk turun 15 km! Kenyataannya, alat deteksi di permukaan laut menangkap banyak sekali muon. Kira-kira satu muon menembus telapak tanganmu setiap detik.

- **Menurut kita di Bumi:** jam muon berjalan lambat. Dengan $\gamma \approx 15,8$, umur rata-ratanya menjadi ± 35 mikrodetik, cukup untuk menempuh sekitar 10 km. Banyak yang selamat sampai tanah.
- **Menurut muon sendiri:** umurnya tetap 2,2 mikrodetik, tetapi atmosfer yang melesat ke arahnya **menyusut** dari 15 km menjadi $15/15,8 \approx 0,95$ km. Jaraknya jadi pendek!

Kedua cerita memberi ramalan yang **sama persis** tentang jumlah muon yang sampai ke tanah. Inilah keindahan relativitas.

LAB MINI Hujan muon: siapa yang sampai ke tanah?

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-30



Peluang muon sampai tanah

Fisika Newton
(tanpa dilatasi waktu):

$1,23 \times 10^{-8} \%$

Relativitas Einstein:

23,6 %

Umur rata-rata muon

diam: 2,2 μ s

di mata kita: 34,8 μ s

jam muon melambat $\times \gamma$

Faktor γ
15,82

Jarak rata-rata sebelum meluruh
10,4 km

Ramalan sampai tanah
23,6 %

Hasil simulasi
0 dari 9 (0 %)

Jalankan, lalu matikan **dilatasi waktu** untuk melihat ramalan fisika Newton. Apa yang terjadi pada muon-muon itu? Ubah juga ketinggian lahirnya dan kecepatannya.

Bukti kedua ada di sakumu. Satelit navigasi GPS mengorbit pada ketinggian ± 20.200 km dengan kecepatan $\pm 3,9$ km/s, dan membawa jam atom. HP-mu menentukan posisi dengan mengukur selisih waktu tiba sinyal dari minimal empat satelit. Karena sinyal merambat dengan kelajuan cahaya, kesalahan 1 mikrodetik saja berarti salah posisi sekitar 300 m.

Efek pada jam satelit GPS	Penyebab	Per hari
Relativitas khusus (bab ini)	satelit bergerak cepat → jamnya melambat	±7 mikrodetik lebih lambat
Relativitas umum (gravitasi)	gravitasi di orbit lebih lemah → jamnya lebih cepat	±45 mikrodetik lebih cepat
Total		±38 mikrodetik lebih cepat

Tanpa koreksi, 38 mikrodetik per hari akan menumpuk menjadi salah posisi sekitar **11 km setiap hari**. Karena itu, frekuensi jam atom satelit sengaja disetel sedikit lebih lambat sebelum diluncurkan, dan penerima di HP juga menerapkan koreksi tambahan.



FISIKA INDONESIA

Setiap kali pengemudi ojek online menjemputmu tepat di depan pagar, ada Einstein yang ikut bekerja! Aplikasi peta di HP memakai sinyal dari satelit navigasi (GPS dan sistem sejenis) yang jamnya sudah dikoreksi efek relativitas. Untuk pemetaan yang jauh lebih teliti, Badan Informasi Geospasial mengoperasikan jaringan stasiun penerima GNSS tetap di berbagai daerah Indonesia, yang dipakai untuk pemetaan, survei tanah, dan pemantauan gerakan lempeng bumi.



Ojek online & peta digital

Posisi dari satelit navigasi hanya akurat beberapa meter karena jam satelit sudah dikoreksi efek relativitas khusus dan umum.



PET scan di rumah sakit

Positron bertemu elektron lalu musnah menjadi dua sinar gamma 511 keV, persis $E = mc^2$ massa elektron. Detektor menangkap pasangan sinar itu untuk memetakan tubuh.



Memindai piramida dengan muon

Muon kosmik yang menembus batu dipakai seperti sinar X raksasa. Tahun 2017, cara ini menemukan rongga besar tersembunyi di Piramida Agung Giza.



Matahari kehilangan massa

Matahari mengubah ± 4 juta ton massanya menjadi energi setiap detik. Sinarnya yang menghangatkan sawah di Jawa berasal dari $E = mc^2$.



Akselerator partikel

Siklotron penghasil radioisotop untuk kedokteran harus dirancang dengan memperhitungkan massa dan energi relativistik partikel yang dipercepat.



Masinis Whoosh

Berkereta 350 km/jam tanpa henti setahun penuh membuat jam masinis "tertinggal" sekitar 1,7 mikrodetik dari jam di stasiun. Ada, tetapi sangat kecil!

Cek Cepat

Postulat kedua Einstein menyatakan bahwa kelajuan cahaya dalam ruang hampa...

bergantung pada kecepatan sumber cahaya

lebih besar jika pengamat bergerak mendekati sumber

sama besar menurut semua pengamat inersia

berubah-ubah menurut arah angin eter

Sebuah wahana melaju $0,6c$. Jam di wahana menunjukkan 8 jam telah berlalu. Menurut pengamat di Bumi, waktu yang berlalu adalah...

10 jam

6,4 jam

8 jam

12,5 jam

Muon dari sinar kosmik bisa mencapai permukaan Bumi walaupun umurnya sangat singkat. Menurut kerangka muon, hal ini terjadi karena...

umur muon bertambah panjang

muon bergerak lebih cepat dari cahaya

gravitasi Bumi menarik muon lebih cepat

tebal atmosfer menyusut (kontraksi panjang)

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D

Tantangan Rumah: lurus dari dalam, zigzag dari luar

Bahan: bola bekel atau bola pingpong, HP untuk merekam video, seorang teman, ruang lapang yang aman

1. Berjalanlah lurus dengan langkah tetap sambil memantul-mantulkan bola tegak lurus ke lantai (dribel pelan).
2. Minta temanmu merekam dari samping, dari tempat yang diam. Lalu rekam juga dengan HP yang kamu bawa sendiri, diarahkan ke bola.
3. Putar kedua video dengan gerak lambat dan gambar lintasan bola dari masing-masing video.

Pertanyaan: Lintasan mana yang lebih panjang? Untuk bola, kecepatannya pun berbeda menurut kedua perekam, sehingga waktunya tetap sama. Seandainya bola itu foton yang kelajuannya **harus** sama menurut semua pengamat, apa yang harus berubah? Hati-hati memilih tempat: jangan dekat jalan raya atau tangga.

RINGKASAN KILAT **Bab 30 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **kerangka acuan**, relativitas Galileo, dan dua **postulat Einstein**
- menurunkan **dilatasi waktu** dari jam cahaya dan menghitung faktor Lorentz γ
- menghitung **kontraksi panjang** dan **penjumlahan kecepatan** relativistik
- memakai $E = mc^2$ serta energi total dan energi kinetik relativistik
- menjelaskan bukti nyata relativitas: **muon** dari sinar kosmik dan koreksi jam satelit **GPS**

Istilah kunci

kerangka acuan

kerangka inersia

prinsip relativitas Galileo

jam cahaya

faktor Lorentz

panjang diri

energi diam

muon

Rumus penting

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

Faktor Lorentz. Gamma adalah 'faktor peregang' waktu. Pada v kecil hampir tepat 1, lalu melonjak tanpa batas saat v mendekati c .

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Dilatasi waktu. Waktu yang dialami penumpang roket (Δt_0) terukur lebih lama oleh pengamat di Bumi (Δt).

$$L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

Kontraksi panjang. Panjang benda yang bergerak terukur lebih pendek, dengan faktor $1/\gamma$, hanya pada arah geraknya.

$$E = mc^2$$

Kesetaraan massa dan energi. Massa dan energi adalah dua wujud dari hal yang sama. Kursukarnya c^2 — sangat mahal!

Jangan sampai terjebak

- Justru sebaliknya! Teori Einstein dibangun di atas hal-hal yang mutlak: kelajuan cahaya c dan bentuk hukum fisika sama bagi semua pengamat.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=30

Teka-teki untuk Bab 31

Matahari mengubah sekitar 4 juta ton massanya menjadi energi setiap detik, dan sudah bersinar selama 4,6 miliar tahun. Dari mana massa itu "hilang", dan mengapa Matahari belum juga habis?

▼ Intip petunjuk

Di inti Matahari, empat inti hidrogen bergabung menjadi satu inti helium. Timbang dengan teliti: satu inti helium ternyata sekitar 0,7% **lebih ringan** daripada empat inti hidrogen penyusunnya. Selisih massa itulah yang berubah menjadi cahaya lewat $E = mc^2$. Lalu seberapa besar massa Matahari dibanding 4 juta ton per detik? Jawabannya di Bab 31: Inti Atom & Radioaktivitas.

31 Inti Atom & Radioaktivitas: Jam Alam di Dalam Batu

Bagaimana para ahli tahu bahwa fosil manusia purba di Sangiran berumur lebih dari satu juta tahun? Jawabannya ada di inti atom yang meluruh dengan irama sangat teratur: jam alam yang tidak bisa dipercepat atau diperlambat.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menuliskan susunan inti dengan notasi A_ZX dan membedakan **isotop**, **isobar**, dan **isoton**;
- menghitung **defek massa** dan **energi ikat** inti dengan $E = \Delta m c^2$;
- membandingkan sinar **alfa**, **beta**, dan **gamma** (muatan, daya ionisasi, daya tembus) dan menuliskan persamaan peluruhannya;
- memakai **waktu paruh** dan hukum peluruhan untuk penanggalan radiometrik dan dosis obat nuklir;
- menjelaskan **fisi**, **reaktor nuklir**, **fusi** di Matahari, serta cara hidup aman bersama radiasi.

BERAPA UMUR TENGGORAK INI?

KOMIK • 4 PANEL

Museum Manusia Purba Sangiran

RAKA

Wow, tengkorak *Homo erectus*! Umurnya pasti ditebak dari warnanya, ya?



SARI

Ditebak dari warna? Masa, sih. Di sini tertulis "lebih dari satu juta tahun". Mengukurnya pakai apa, ya?



KAK NARA

Pakai **jam alam**! Atom radioaktif di lapisan abu gunung api meluruh dengan irama tetap. Panas, dingin, tekanan, tidak ada yang bisa mengubah iramanya.

**TARSI**

Fakta unik: tubuhmu sendiri sedikit radioaktif, lho! Ada kalium-40 dan karbon-14 alami.

RAKA

HAH?! Aku radioaktif?!

**TENANG, RAKA!**

Tubuh orang dewasa memang mengandung sedikit kalium-40 dan karbon-14 alami, sehingga di dalam tubuhmu terjadi beberapa ribu peluruhan setiap detik. Ini normal, alami, dan sudah dialami manusia sejak dulu. Yang menentukan aman atau tidaknya radiasi adalah **besar dosisnya**, dan dosis dari tubuhmu sendiri sangat kecil. Kita bahas di 31.8.

31.1 Isi inti: proton, neutron, dan isotop

Di Bab 29 kamu bertemu inti atom: titik super kecil di tengah atom yang memuat hampir seluruh massanya. Inti tersusun dari dua jenis partikel yang disebut **nukleon**: **proton** (bermuatan +1) dan **neutron** (tidak bermuatan, ditemukan James Chadwick tahun 1932). Massa keduanya hampir sama, sekitar 1.836 kali massa elektron.

Inti ditulis dengan notasi ${}^A_Z\text{X}$:

- Z = **nomor atom** = jumlah proton. Nilai ini menentukan jenis unsur.
- A = **nomor massa** = jumlah proton + neutron.
- Jumlah neutron $N = A - Z$.

Contoh: ${}^{238}_{92}\text{U}$ punya 92 proton dan $238 - 92 = 146$ neutron. Atom-atom dengan jumlah proton sama tetapi jumlah neutron berbeda disebut **isotop**. Karbon-12 (6p, 6n), karbon-13 (6p, 7n), dan karbon-14 (6p, 8n) adalah isotop karbon. Sifat kimianya sama, tetapi massa dan kestabilan intinya berbeda.

Istilah	Yang sama	Contoh
Isotop	jumlah proton Z	${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$
Isobar	nomor massa A	${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$

Isoton

jumlah neutron N

${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$ (keduanya 7 neutron)



TRIK KAK NARA: P-B-N

Isotop → proton sama (huruf **p**). **Isobar** → nomor **massa** sama (bayangkan "barbel" yang berat).

Isoton → neutron sama (huruf **n**).

Jari-jari inti kira-kira $R \approx 1,2 \text{ fm} \times A^{1/3}$. Artinya volume inti sebanding dengan jumlah nukleonnya: nukleon tersusun rapat seperti kelereng dalam kantong. Akibatnya, kerapatan semua inti hampir sama, yaitu sekitar $2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$. Satu sendok teh materi inti beratnya lebih dari satu **miliar ton**!

Bahasa sederhana • Gampangnya: inti atom berisi dua macam "bola": **proton** (bermuatan positif) dan **neutron** (netral). Banyaknya proton menentukan unsurnya. Banyaknya neutron boleh sedikit berbeda, dan atom "saudara" seperti itu disebut **isotop**.

31.2 Gaya inti kuat dan energi ikat

Ada yang aneh. Proton-proton di dalam inti bermuatan positif dan berdesakan sangat rapat, jadi seharusnya saling tolak dengan gaya listrik yang dahsyat. Mengapa inti tidak meledak? Karena ada **gaya inti kuat**: gaya tarik antara nukleon (proton-proton, proton-neutron, neutron-neutron) yang **jauh lebih kuat** daripada gaya listrik, tetapi **jangkauannya sangat pendek**, hanya sekitar 2–3 fm. Neutron berperan seperti "lem" tambahan yang menambah tarikan tanpa menambah tolakan.

Timbanglah inti helium-4 dengan sangat teliti. Massanya **lebih kecil** daripada jumlah massa 2 proton dan 2 neutron penyusunnya! Selisihnya disebut **defek massa** Δm . Massa itu tidak hilang. Ia berubah menjadi energi yang dilepaskan saat nukleon bergabung, sesuai $E = \Delta m c^2$ dari Bab 30. Energi ini disebut **energi ikat**, yaitu energi yang harus diberikan untuk membongkar inti menjadi nukleon-nukleon lepas.

KERJAKAN BERSAMA

Energi ikat helium-4

Massa proton 1,007276 u, neutron 1,008665 u, dan inti helium-4 4,001506 u. Hitung defek massa, energi ikat, dan energi ikat per nukleon inti helium-4. (1 u setara 931,5 MeV)

1 Massa penyusun: $2(1,007276) + 2(1,008665) = 4,031882 \text{ u}$.

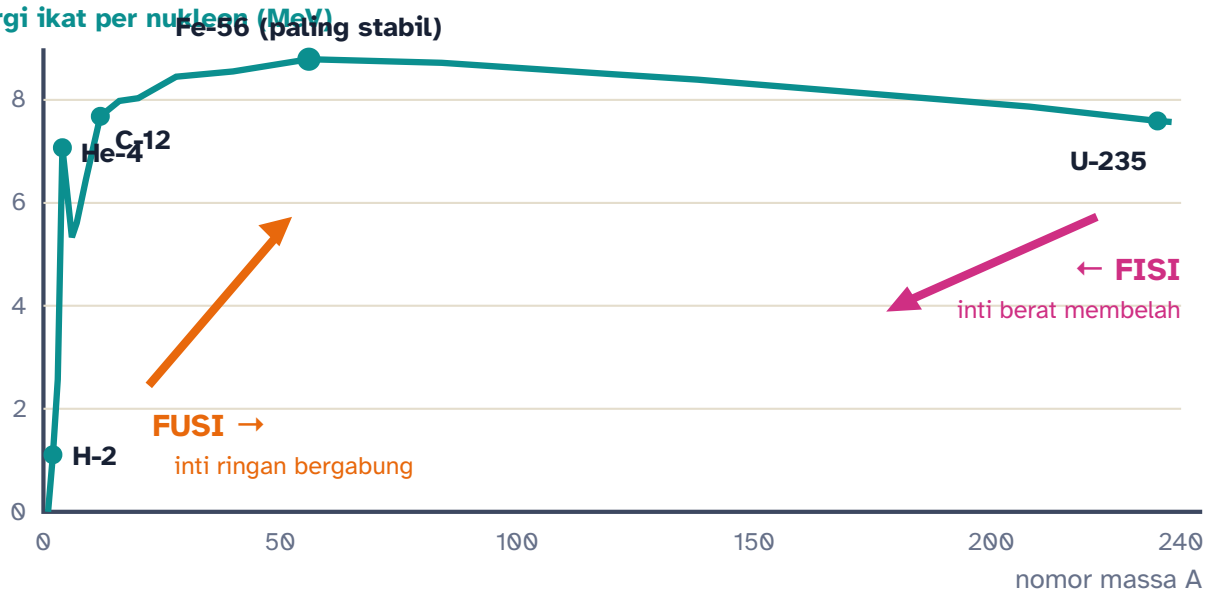
2 Defek massa: $\Delta m = 4,031882 - 4,001506 = 0,030376 \text{ u}$.

3 Energi ikat: $E = 0,030376 \times 931,5 \approx 28,3 \text{ MeV}$.

4 Per nukleon: $28,3/4 \approx 7,07 \text{ MeV}$.

$\Delta m = 0,0304 \text{ u}$, energi ikat 28,3 MeV, atau 7,07 MeV per nukleon. Sebagai pembandingan, memutus ikatan kimia hanya butuh beberapa eV. Energi inti jutaan kali lebih besar!

energi ikat per nukleon (MeV)



Makin tinggi titik pada grafik, makin erat nukleon terikat. Inti besi dan nikel berada di puncak. Inti ringan melepaskan energi jika **bergabung** (fusi), sedangkan inti berat melepaskan energi jika **membelah** (fisi). Keduanya "mendaki" menuju puncak.

RUMUS HIDUP Energi dari massa yang hilang

$$E = N \cdot \Delta m c^2$$

Setiap reaksi inti 'menghilangkan' sedikit massa Δm . Kalikan dengan c^2 dan dengan banyaknya reaksi N , dan kamu mendapat energi totalnya.

Δm Defek massa per reaksi u

N Banyaknya reaksi

E Energi yang dilepaskan J

ENERGI YANG DILEPASKAN

$$4,28 \times 10^8 \text{ J}$$

1×10^{20} reaksi, masing-masing kehilangan **0,029 u**, melepaskan energi **$4,28 \times 10^8 \text{ J}$** .

Satuan Nusantara: $\approx 10\%$ dari 1 ton TNT $\cdot \approx 13 \times 1$ liter bensin $\cdot \approx 119 \times 1$ kWh token listrik

Cek satuan: $1 \text{ u} \times c^2 = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8)^2 \approx 1,49 \times 10^{-10} \text{ J} \approx 931,5 \text{ MeV}$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-DEFEK-MASSA



TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1932, James Chadwick membuktikan adanya neutron. Sebelumnya, para fisikawan bingung mengapa massa inti kira-kira dua kali jumlah protonnya. Penemuan neutron menyelesaikan teka-teki itu, dan kelak neutron pula yang menjadi "pemicu" reaksi fisi (31.6).

31.3 Radioaktivitas: sinar alfa, beta, dan gamma

Tidak semua inti stabil. Inti yang punya terlalu banyak neutron, terlalu banyak proton, atau terlalu besar akan berubah sendiri menjadi inti lain sambil memancarkan partikel atau energi. Peristiwa ini disebut **peluruhan radioaktif**, dan pancarannya disebut **radiasi**.



TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1896, Henri Becquerel menyimpan garam uranium di laci bersama pelat foto yang terbungkus kertas hitam. Ternyata pelat itu menghitam sendiri! Marie Curie dan Pierre Curie lalu menemukan dua unsur yang jauh lebih aktif, yaitu **polonium** dan **radium** (1898), dan memperkenalkan istilah *radioaktivitas*. Marie Curie menjadi orang pertama yang meraih dua Hadiah Nobel di dua bidang sains berbeda: Fisika (1903) dan Kimia (1911).

Sinar	Sebenarnya	Muatan	Daya ionisasi	Daya tembus	Dihentikan oleh
Alfa α	inti helium ${}^4_2\text{He}$	+2	sangat kuat	sangat lemah: ± 4 cm di udara	selembar kertas, kulit luar
Beta β^-	elektron cepat ${}^0_{-1}\text{e}$	-1	sedang	sedang: beberapa meter di udara	aluminium beberapa mm
Gamma γ	gelombang EM berenergi tinggi (foton)	0	lemah	sangat kuat	timbal tebal atau beton (hanya dilemahkan)

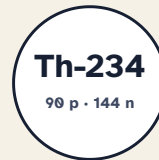
Persamaan peluruhan harus **seimbang**: jumlah nomor massa (atas) dan jumlah nomor atom (bawah) di kiri dan kanan sama.

- **Peluruhan alfa:** ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\alpha$. Contoh: ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\alpha$.
- **Peluruhan beta minus:** sebuah neutron berubah menjadi proton dan elektron (plus antineutrino yang nyaris tak terdeteksi): ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\text{e} + \bar{\nu}$. Contoh: ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_{-1}^0\text{e} + \bar{\nu}$.
- **Peluruhan gamma:** inti yang "kelebihan energi" melepaskan foton tanpa berubah jenis: ${}_Z^AX^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$.



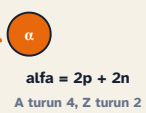
rantai peluruhan uranium-238

Langkah 1. Uranium-238 adalah inti besar yang tidak stabil. Waktu paruhnya 4,5 miliar tahun, kira-kira seumur Bumi.



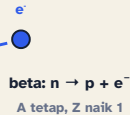
rantai peluruhan uranium-238

Langkah 2. Peluruhan alfa: U-238 melepaskan partikel alfa (2 proton + 2 neutron). Nomor massa turun 4 dan nomor atom turun 2, sehingga inti berubah menjadi torium-234.



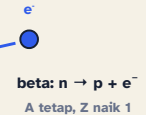
rantai peluruhan uranium-238

Langkah 3. Peluruhan beta: di dalam Th-234, sebuah neutron berubah menjadi proton dan elektron. Elektronnya terlempar keluar. Z naik 1, A tetap. Terbentuk protaktinium-234.



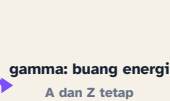
rantai peluruhan uranium-238

Langkah 4. Satu peluruhan beta lagi: Pa-234 menjadi uranium-234. Uranium lagi, tetapi isotop yang berbeda!



rantai peluruhan uranium-238

Langkah 5. Setelah peluruhan, inti sering masih "bergetar" kelebihan energi. Ia melepaskannya sebagai **sinar gamma** tanpa berubah jenis.



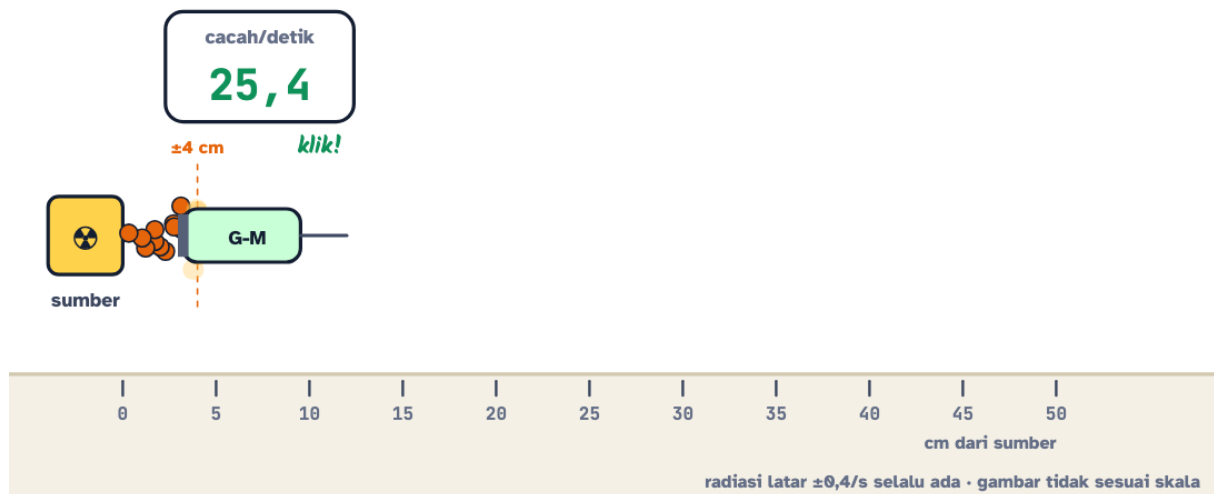
rantai peluruhan uranium-238

Langkah 6. Rantai berlanjut sampai akhirnya menjadi **timbal-206 yang stabil**. Dari 238 ke 206, nomor massa turun 32, berarti 8 kali alfa. Nomor atom turun dari 92 ke 82: 8 alfa menurunkan 16, jadi perlu 6 beta yang menaikannya kembali.

total 14 peluruhan:
8 alfa
6 beta

LAB MINI Detektor Geiger & perisai radiasi

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



Cacahan terukur

25,4 per detik

Harapan rata-rata

30,4 per detik

Pengamatan

α sampai ke detektor

Pilih sumber radiasi dan perisai, lalu jalankan dan amati angka cacahan detektor. Sinar mana yang tertahan kertas? Mana yang masih lolos dari timbal 1 cm? Geser detektor menjauh: apa yang terjadi pada alfa setelah ± 4 cm? Nyalakan **bunyi klik** untuk mendengar detektornya.



AWAS JEBAKAN: "DAYA TEMBUS KECIL = TIDAK BERBAHAYA"?

Alfa memang tertahan kertas dan lapisan kulit mati, jadi sumber alfa di **luar** tubuh hampir tidak berbahaya. Tetapi jika zat pemancar alfa **terhirup** atau **tertelan**, seluruh energinya dilepaskan pada jaringan di sekitarnya, dan karena daya ionisasinya sangat kuat, kerusakannya bisa besar. Karena itu bahan radioaktif di laboratorium tidak boleh disentuh langsung, dimakan, atau dihirup.

31.4 Waktu paruh: irama peluruhan yang tak bisa diganggu

Kapan sebuah inti radioaktif akan meluruh? **Tidak ada yang tahu!** Peluruhan itu acak, seperti melempar koin. Tetapi jika intinya sangat banyak, polanya sangat teratur: dalam selang waktu tertentu, **separuh** dari inti yang tersisa akan meluruh. Selang waktu itu disebut **waktu paruh** $T_{1/2}$.



Tebak Dulu!

Kamu punya 1.000 inti radioaktif dengan waktu paruh 1 jam. Berapa inti yang belum meluruh setelah 2 jam?

0, karena dua kali waktu paruh berarti habis.

500.

250.

125.

Jawabannya: 250. Setelah 1 jam tersisa separuh, yaitu 500. Setelah 1 jam lagi, separuh dari 500, yaitu 250. Peluruhan bukan seperti lilin yang memendek dengan laju tetap sampai habis, melainkan selalu "separuh dari yang tersisa".

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

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

Setiap satu waktu paruh berlalu, sisa zat radioaktif tinggal separuhnya.

 N_0

Massa awal zat radioaktif mg

 t

Waktu yang berlalu hari

 $T_{1/2}$

Waktu paruh hari

 N

Sisa yang belum meluruh mg

SISA YANG BELUM MELURUH

10

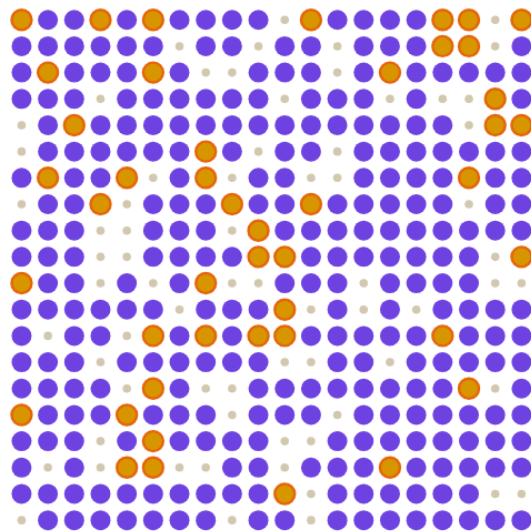
mg

Dari **80** mg, setelah **24** hari dengan waktu paruh **8** hari, tersisa **10** mg.

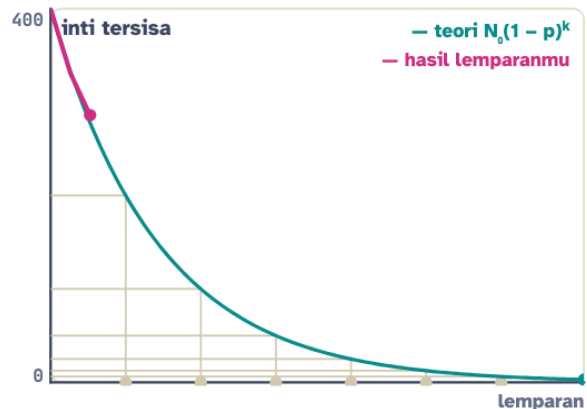
Cek satuan: $t/T_{1/2}$ tidak bersatuan (asal satuannya sama), sehingga N bersatuan sama dengan N_0 .

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-PARUH-INTI

400 inti • tiap inti melempar dadu



● induk (belum meluruh) ● baru meluruh ● anak

Peluang meluruh tiap lemparan: keluar mata 6 = $1/6$ Waktu paruh teori $\approx 3,8$ lemparan

Sisa: 286 dari 400 (71,5%)

Lemparan ke-
2Inti induk tersisa
286Meluruh di lemparan ini
45Inti yang kamu tandai
klik satu kotak

Setiap kotak adalah satu inti. Pada setiap lemparan, setiap inti "melempar" koin atau dadunya sendiri. Jika keluar angka sial, inti itu meluruh. Klik satu inti untuk menandainya: kapan ia akan meluruh? Bandingkan titik-titik hasil lemparan dengan kurva teori. Mengapa kurva makin mulus jika jumlah intinya makin banyak?

**TRIK KAK NARA: TANGGA SEPARUH**

Buat tangga: 100% $\rightarrow$ 50% $\rightarrow$ 25% $\rightarrow$ 12,5% $\rightarrow$ 6,25% $\rightarrow$... Setiap anak tangga adalah satu waktu paruh. Dan ingat: setelah **10 waktu paruh**, sisanya $1/2^{10} = 1/1024$, kira-kira **seperseribu**.

Banyaknya peluruhan per detik disebut **aktivitas** A , satuannya **becquerel** (Bq): 1 Bq = 1 peluruhan per detik. Aktivitas sebanding dengan jumlah inti: $A = \lambda N$, dengan **konstanta peluruhan** $\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \approx 0,693 / T_{1/2}$. Karena N menyusut separuh setiap waktu paruh, aktivitasnya pun ikut menyusut separuh.

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N$$

Makin banyak inti dan makin pendek waktu paruhnya, makin 'ramai' peluruhannya setiap detik.

N Jumlah inti radioaktif

$T_{1/2}$ Waktu paruh jam

A Aktivitas Bq

AKTIVITAS

$3,21 \times 10^8$

Bq

1×10^{13} inti dengan waktu paruh 6 jam meluruh sebanyak $3,21 \times 10^8$ kali setiap detik.

Cek satuan: λ bersatuan s^{-1} (karena $T_{1/2}$ diubah ke detik), sehingga A bersatuan $s^{-1} = \text{Bq}$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AKTIVITAS-INTI

CONTOH Obat iodin-131

Seorang pasien kelenjar tiroid menerima iodin-131 dengan aktivitas 800 MBq (waktu paruh 8 hari). Akibat peluruhan saja, berapa aktivitas yang tersisa setelah 24 hari?

1 Banyaknya waktu paruh: $24/8 = 3$.

2 $800 \rightarrow 400 \rightarrow 200 \rightarrow 100 \text{ MBq}$.

Tersisa 100 MBq (seperdelapannya). Karena waktu paruhnya pendek, obat ini cepat "padam" di dalam tubuh. Itulah salah satu alasan isotop berwaktu paruh pendek dipilih untuk pengobatan.

MITOS

"Setelah dua kali waktu paruh, zat radioaktif habis."

MITOS

"Memanaskan atau mendinginkan zat radioaktif bisa mempercepat peluruhannya."

FAKTA

Setelah satu waktu paruh tersisa $\frac{1}{2}$, setelah dua tersisa $\frac{1}{4}$, setelah tiga $\frac{1}{8}$, dan seterusnya. Secara teori zat itu tidak pernah benar-benar habis, hanya makin sedikit.

FAKTA

Waktu paruh ditentukan oleh inti, yang jauh terlindung di dalam atom. Suhu, tekanan, dan reaksi kimia biasa praktis tidak berpengaruh. Itulah mengapa peluruhan bisa dipakai sebagai jam yang sangat andal.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

KALKULUS PELURUHAN

Laju peluruhan sebanding dengan jumlah inti: $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$. Integralkan:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}.$$

τ adalah *umur rata-rata* sebuah inti, sekitar 1,44 kali waktu paruh. Grafik $\ln N$ terhadap t berupa garis lurus dengan kemiringan $-\lambda$. Cara ini dipakai di laboratorium untuk mengukur waktu paruh dari data cacahan yang "berisik". Untuk deret induk $\rightarrow$ anak $\rightarrow$ cucu, berlaku persamaan Bateman. Jika waktu paruh induk jauh lebih panjang, aktivitas anak lama-lama menyamai aktivitas induk. Keadaan ini disebut *kesetimbangan sekuler*.

31.5

Penanggalan radiometrik dan manfaat radioisotop

Di atmosfer, sinar kosmik terus-menerus mengubah sebagian nitrogen-14 menjadi **karbon-14** yang radioaktif (waktu paruh ± 5.730 tahun). Tumbuhan menyerap karbon-14 bersama CO_2 , hewan memakan tumbuhan, sehingga semua makhluk hidup mengandung karbon-14 dengan kadar hampir sama. Saat makhluk itu mati, ia berhenti menyerap karbon baru, dan karbon-14 di tubuhnya mulai berkurang separuh setiap 5.730 tahun. Dengan mengukur sisanya, ilmuwan bisa menghitung kapan makhluk itu mati.

Arang kayu dari sebuah situs gua hanya mengandung 25% karbon-14 dibandingkan kayu yang masih hidup. Berapa umur arang itu?

1 $100\% \rightarrow 50\% \rightarrow 25\%$: sudah dua kali waktu paruh.

2 $\text{Umur} = 2 \times 5.730 = 11.460$ tahun.

Sekitar 11.500 tahun. Ingat, di setiap pengukuran ada ketidakpastian, jadi hasilnya ditulis seperti " 11.460 ± 80 tahun".



Tebak Dulu!

Arkeolog ingin mengetahui umur lapisan tanah tempat ditemukannya fosil *Homo erectus* di Sangiran, yang diperkirakan berumur lebih dari satu juta tahun. Metode mana yang paling cocok?

Penanggalan karbon-14 pada tulang fosilnya.

Penanggalan radiometrik isotop berumur panjang (misalnya argon-argon atau uranium-timbal) pada lapisan abu vulkanik di sekitar fosil.

Mengukur seberapa keras tulang fosil itu.

Menghitung warna tanah di sekitar fosil.

Jawabannya: isotop berumur panjang pada abu vulkanik. Setelah ± 10 waktu paruh (± 57.000 tahun), karbon-14 yang tersisa tinggal seperseribu, terlalu sedikit untuk diukur dengan andal. Batas praktis penanggalan karbon sekitar 50.000 tahun. Untuk jutaan tahun, ilmuwan memakai isotop dengan waktu paruh sangat panjang, misalnya kalium-40 ($\pm 1,25$ miliar tahun) yang meluruh menjadi argon-40, atau uranium yang meluruh menjadi timbal di kristal zirkon. Yang ditanggapi adalah **lapisan abu gunung api** di atas dan di bawah fosil, sehingga umur fosil "dijepit" di antaranya.



FISIKA INDONESIA: JAM ARGON DI SANGIRAN

Situs Manusia Purba Sangiran di perbatasan Sragen dan Karanganyar, Jawa Tengah, menjadi Warisan Dunia UNESCO sejak 1996. Lapisan tanahnya berselang-seling dengan abu letusan gunung api purba. Saat abu panas mengendap, gas argon di dalam mineralnya lepas, sehingga "jam argon" mulai berdetak dari nol. Dengan metode argon-argon, serta uranium-timbal dan jejak fisi pada kristal zirkon, para peneliti memperkirakan lapisan tertua yang berisi fosil *Homo erectus* di Sangiran berumur lebih dari satu juta tahun. Angka pastinya masih diteliti dan diperdebatkan; berbagai penelitian mendapat kisaran sekitar 1,3 hingga 1,6 juta tahun.

Radioisotop juga punya banyak kegunaan lain:



Radioterapi kanker

Berkas sinar gamma atau sinar-X berenergi tinggi diarahkan tepat ke tumor dari berbagai sudut, sehingga sel kanker menerima dosis besar sementara jaringan sehat di sekitarnya terlindungi.



Kedokteran nuklir

Teknesium-99m (waktu paruh 6 jam) disuntikkan dalam jumlah sangat kecil. Kamera gamma memotret ke mana zat itu mengalir untuk melihat kerja tulang, jantung, atau ginjal.



Sterilisasi & pengawetan

Alat suntik, sarung tangan bedah, dan rempah-rempah disinari gamma untuk membunuh kuman. Bahan itu **tidak** menjadi radioaktif.



Padi unggul hasil mutasi

Peneliti nuklir Indonesia (dulu BATAN, kini BRIN) menyinari benih padi untuk memperoleh varietas baru, misalnya Sidenuk, yang dikembangkan agar lebih produktif.



Detektor asap

Sedikit amerisium-241 memancarkan alfa yang mengionkan udara sehingga arus kecil mengalir. Asap mengganggu arus itu, lalu alarm berbunyi.



Perunut & radiografi

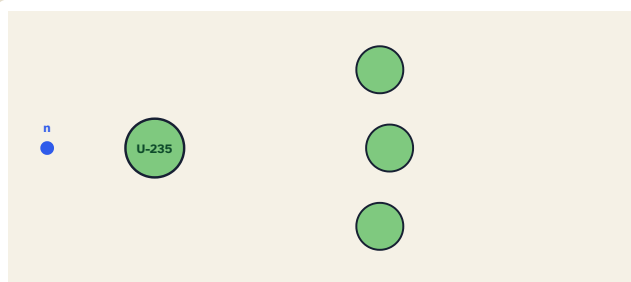
Perunut radioaktif dapat melacak kebocoran pipa bawah tanah, dan sinar gamma dipakai untuk "memotret" sambungan las pipa minyak dan gas.

31.6 Fisi dan reaktor nuklir

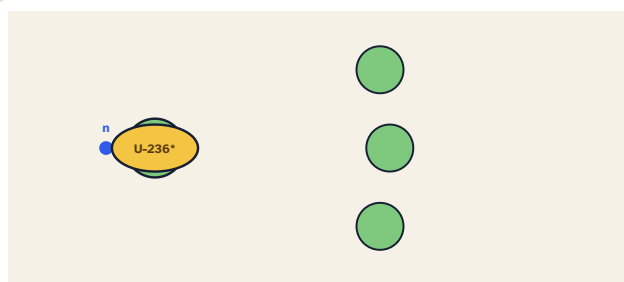
Tahun 1938, Otto Hahn dan Fritz Strassmann menembaki uranium dengan neutron dan menemukan barium, unsur yang jauh lebih ringan. Lise Meitner dan Otto Frisch menjelaskan apa yang terjadi: inti uranium **terbelah** menjadi dua. Peristiwa ini disebut **fisi**. Contoh salah satu reaksinya:



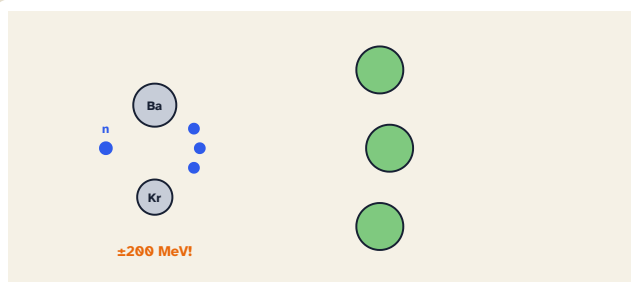
Kuncinya ada pada neutron-neutron baru yang lahir dari setiap fisi. Mereka bisa membelah inti uranium lain, yang menghasilkan neutron lagi, dan seterusnya: **reaksi berantai**.



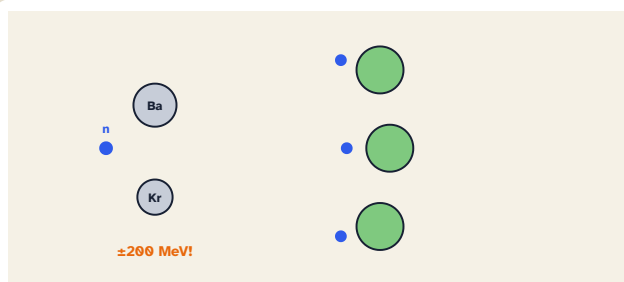
Langkah 1. Sebuah neutron lambat mendekati inti uranium-235. Neutron tidak bermuatan, jadi tidak ditolak oleh inti.



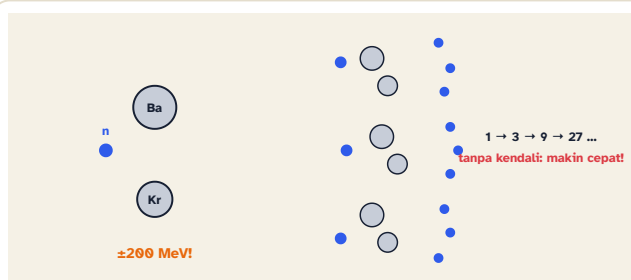
Langkah 2. Inti menyerap neutron dan menjadi uranium-236 yang sangat tidak stabil. Inti itu bergoyang dan memanjang seperti tetesan air.



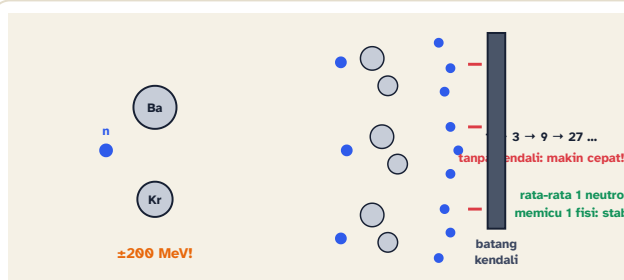
Langkah 3. Inti terbelah menjadi dua inti sedang (misalnya barium dan krypton), sambil melepaskan 2-3 neutron baru dan energi sekitar 200 MeV. Massa hasil fisi sedikit lebih kecil daripada massa awal; selisihnya menjadi energi.



Langkah 4. Neutron-neutron baru melesat ke inti-inti uranium lain.



Langkah 5. Setiap fisi memicu beberapa fisi lagi: 1, 3, 9, 27, ... Tanpa kendali, jumlah reaksi bertambah dengan sangat cepat.



Langkah 6. Di reaktor, **batang kendali** (dari bahan penyerap neutron seperti boron atau kadmium) menyerap kelebihan neutron. Reaksi diatur agar rata-rata tepat **satu** neutron dari setiap fisi memicu fisi berikutnya. Keadaan ini disebut **kritis**, dan menghasilkan panas yang stabil.

Bagian utama reaktor: **bahan bakar** (uranium yang kadar U-235-nya dinaikkan), **moderator** (misalnya air) untuk memperlambat neutron agar mudah ditangkap U-235, **batang kendali** untuk mengatur jumlah neutron, **pendingin** untuk mengangkut panas, dan **perisai** beton tebal. Di pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), panas itu menguapkan air untuk memutar turbin, sama seperti PLTU batu bara.

Setiap fisi U-235 melepaskan sekitar 200 MeV. Berapa energi (dalam joule dan kWh) jika seluruh inti dalam 1 gram U-235 membelah? Bandingkan dengan batu bara (± 29 MJ per kg). ($N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, $1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$)

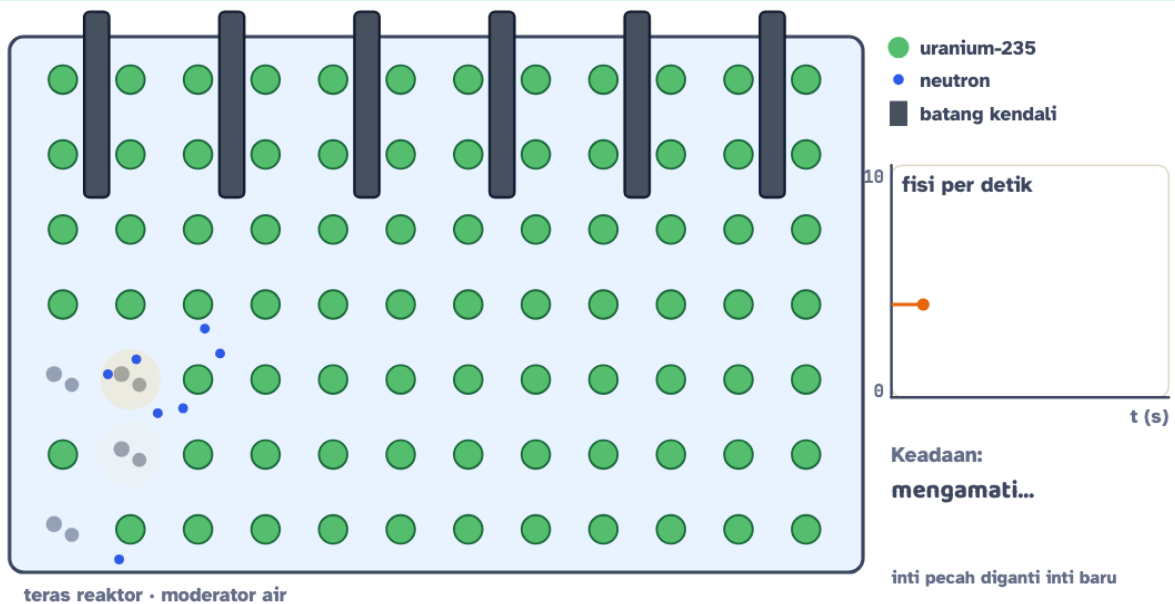
- 1 Jumlah inti: $N = \frac{1}{235} \times 6,02 \times 10^{23} \approx 2,56 \times 10^{21}$.
- 2 Energi: $2,56 \times 10^{21} \times 200 \text{ MeV} = 5,12 \times 10^{23} \text{ MeV} \approx 8,2 \times 10^{10} \text{ J}$.
- 3 Dalam kWh: $8,2 \times 10^{10} / 3,6 \times 10^6 \approx 2,3 \times 10^4 \text{ kWh}$.
- 4 Setara batu bara: $8,2 \times 10^{10} / 2,9 \times 10^7 \approx 2.800 \text{ kg}$.

Sekitar $8,2 \times 10^{10} \text{ J}$ atau **23.000 kWh**, setara pembakaran $\pm 2,8$ ton batu bara, hanya dari satu gram! Inilah alasan bahan bakar nuklir sangat ringkas.

LAB MINI

Reaktor mini: kendalikan reaksi berantai

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



Neutron bebas
7

Fisi total
4

Energi dilepas
800 MeV

Keadaan reaktor
mengamati...

Tembakkan satu neutron, lalu atur kedalaman **batang kendali**. Cari posisi yang membuat reaksi tidak padam dan juga tidak melonjak: itulah keadaan **kritis**. Anggap bahan bakarnya sangat banyak, sehingga inti yang sudah membelah diganti inti baru.



FISIKA INDONESIA: TIGA REAKTOR RISET

Indonesia belum memiliki PLTN, tetapi sudah puluhan tahun mengoperasikan **reaktor riset**, yaitu reaktor untuk penelitian, pelatihan, dan pembuatan radioisotop, bukan untuk menghasilkan listrik:

- **Reaktor TRIGA di Bandung:** reaktor nuklir pertama Indonesia, diresmikan tahun 1965.
- **Reaktor Kartini di Yogyakarta** (± 100 kW): banyak dipakai untuk pendidikan dan pelatihan.
- **Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy di Serpong** (± 30 MW termal): reaktor riset terbesar Indonesia, beroperasi sejak 1987, antara lain untuk menghasilkan radioisotop bagi rumah sakit dan industri.

Nama reaktor Serpong diambil dari Prof. G.A. Siwabessy, dokter ahli radiologi asal Maluku, perintis tenaga atom Indonesia, yang juga pernah menjabat Menteri Kesehatan. Ketiganya kini dikelola BRIN.

MITOS

"Reaktor nuklir bisa meledak seperti bom atom."

MITOS

"Uranium mengeluarkan energi karena terbakar."

FAKTA

Tidak bisa. Bahan bakar reaktor daya hanya berisi $\pm 3\text{--}5\%$ U-235, terlalu encer untuk ledakan nuklir. Kecelakaan reaktor (Chernobyl 1986, Fukushima 2011) memang serius, berupa ledakan uap atau hidrogen dan kebocoran zat radioaktif, tetapi bukan ledakan nuklir.

FAKTA

Pembakaran adalah reaksi kimia (elektron atom). Fisi adalah reaksi inti. Satu kilogram U-235 yang membelah seluruhnya melepaskan energi setara pembakaran ± 3.000 ton batu bara.

31.7 Fusi: api abadi di jantung Matahari

Di inti Matahari, suhunya sekitar 15 juta kelvin dan tekanannya luar biasa. Inti-inti hidrogen (proton) bergerak sangat cepat sehingga mampu menembus tolakan listrik dan bergabung. Peristiwa ini disebut **fusi**. Melalui beberapa tahap (rantai proton-proton), hasil akhirnya:



Inti helium yang terbentuk sekitar 0,7% lebih ringan daripada empat proton penyusunnya. Setiap detik, Matahari mengubah ± 600 juta ton hidrogen menjadi helium, dan sekitar 4 juta ton massa berubah menjadi energi. Kedengarannya banyak, tetapi massa Matahari sangat besar: bahan bakarnya cukup untuk sekitar 5 miliar tahun lagi.

	Fisi	Fusi
Proses	inti berat membelah	inti ringan bergabung
Bahan bakar	uranium-235, plutonium-239	hidrogen dan isotopnya (deuterium, tritium)

Syarat	neutron lambat, massa bahan cukup	suhu jutaan derajat dan tekanan sangat tinggi
Energi per kg bahan	sangat besar	beberapa kali lebih besar lagi
Limbah	hasil fisi radioaktif berumur panjang	helium (tidak radioaktif), sedikit bahan teraktivasi
Di mana sekarang	PLTN di sekitar 30 negara	bintang; reaktor percobaan (tokamak), belum untuk listrik

Setelah hidrogen di intinya menipis, bintang bisa melanjutkan fusi: helium menjadi karbon dan oksigen. Pada bintang yang jauh lebih masif daripada Matahari, fusi berlanjut terus (karbon, oksigen, silikon, dan seterusnya) sampai besi. Karena besi berada di puncak grafik energi ikat, fusi berhenti di sana. Unsur yang lebih berat terbentuk dalam ledakan **supernova** dan tabrakan bintang neutron, lalu tersebar ke angkasa. Kalsium di tulangmu dan besi di darahmu pernah dimasak di dalam bintang! Kisah hidup dan mati bintang dibahas lengkap di Bab 35.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MENGAPA FUSI BUTUH SUHU JUTAAN DERAJAT?

Dua proton harus mendekat sampai ± 1 fm agar gaya inti kuat bekerja. Penghalang Coulomb-nya $U = ke^2/r \approx 1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm} / 1 \text{ fm} \approx 1,4 \text{ MeV}$. Energi termal rata-rata $\frac{3}{2}kT$ di inti Matahari (15 juta K) hanya sekitar 2 keV, ratusan kali lebih kecil! Fusi tetap terjadi karena dua hal: sebagian kecil proton punya energi jauh di atas rata-rata (ekor sebaran Maxwell), dan proton bisa **menerobos** penghalang secara kuantum (efek terowongan). Itulah sebabnya Matahari "membakar" hidrogennya sangat perlahan, dan bisa bersinar miliaran tahun.

31.8 Hidup aman bersama radiasi

Radiasi pengion ada di sekitar kita sejak Bumi terbentuk: dari batuan dan tanah, gas radon di udara, sinar kosmik, bahkan dari makanan dan tubuh kita sendiri. Ini disebut **radiasi latar**. Pengaruh radiasi pada tubuh diukur dengan **dosis ekuivalen** dalam satuan **sievert** (Sv), biasanya ditulis milisievert (mSv) atau mikrosievert (μSv).

Sumber	Dosis (perkiraan)
Makan sebuah pisang (kalium-40 alami)	$\pm 0,0001 \text{ mSv}$
Rontgen gigi	$\pm 0,005 \text{ mSv}$
Rontgen dada	$\pm 0,02 \text{ mSv}$
Terbang ± 9 jam (sinar kosmik di ketinggian)	$\pm 0,04 \text{ mSv}$

Radiasi latar alami rata-rata dunia, per tahun	±2,4 mSv
CT scan perut	±8–10 mSv
Batas tahunan pekerja radiasi (rata-rata)	20 mSv
Dosis sekaligus ke seluruh tubuh yang mulai menimbulkan gejala sakit radiasi	±1.000 mSv

Perhatikan perbandingannya: pemeriksaan medis biasa memberi dosis yang kecil dibanding radiasi latar setahun, dan manfaatnya untuk diagnosis jauh lebih besar. Dosis besar yang berbahaya hanya terjadi pada kecelakaan serius, bukan dalam kehidupan sehari-hari.

Pekerja radiasi di rumah sakit dan industri memakai tiga prinsip proteksi yang mudah diingat:

- **Waktu:** makin singkat berada di dekat sumber, makin kecil dosisnya.
- **Jarak:** intensitas radiasi gamma dari sumber titik turun sebanding $1/r^2$. Mundur dua kali lebih jauh, dosisnya tinggal seperempat.
- **Perisai:** gunakan bahan yang tepat, misalnya akrilik atau aluminium untuk beta, dan timbal atau beton untuk gamma.



FISIKA INDONESIA: SIAPA YANG MENGAWASI?

Di Indonesia, pemanfaatan tenaga nuklir dan sumber radiasi diawasi oleh **BAPETEN** (Badan Pengawas Tenaga Nuklir). Rumah sakit yang memakai alat rontgen, CT scan, atau radioterapi wajib memiliki izin, petugas proteksi radiasi, dan alat pemantau dosis. Pekerja radiasi memakai *dosimeter* kecil di bajunya untuk mencatat dosis yang mereka terima.

Bahasa sederhana • Intinya: radiasi itu seperti sinar Matahari. Sedikit adalah hal biasa dan ada di mana-mana. Yang berbahaya adalah jumlah yang sangat besar. Para ahli memakai **waktu, jarak, dan perisai** untuk menjaga dosis tetap kecil.

MITOS

"Makanan yang disinari gamma menjadi radioaktif."

MITOS

"Semua radiasi berasal dari buatan manusia dan selalu berbahaya."

FAKTA

Sinar gamma untuk sterilisasi membunuh kuman lalu menghilang, seperti cahaya senter yang dimatikan. Makanannya tidak menjadi radioaktif dan aman dimakan. Proses ini diatur ketat dan dipakai di banyak negara.

FAKTA

Sebagian besar dosis yang kita terima justru berasal dari alam: batuan, udara, sinar kosmik, dan makanan. Bahaya bergantung pada **dosis**, bukan sekadar ada atau tidaknya radiasi.

Cek Cepat

Inti ${}^{14}_6\text{C}$ memiliki...

14 proton dan 6 neutron

6 proton dan 14 neutron

8 proton dan 6 neutron

6 proton dan 8 neutron

Radiasi yang dapat dihentikan oleh selembar kertas adalah...

gamma

alfa

beta

sinar-X

Sebuah sampel radioaktif memiliki aktivitas 800 Bq dan waktu paruh 5 hari. Aktivitasnya setelah 15 hari adalah...

400 Bq

200 Bq

100 Bq

0 Bq

Kunci Cek Cepat: 1. D • 2. B • 3. C



Tantangan Rumah: peluruhan 100 tutup botol

Bahan: 100 tutup botol (atau kancing), spidol, kotak kardus bertutup, kertas grafik

1. Beri tanda titik pada satu sisi setiap tutup botol. Masukkan semuanya ke dalam kotak.
2. Tutup kotak, kocok, lalu tuang ke lantai. Tutup yang tandanya menghadap ke atas dianggap "meluruh". Singkirkan dan hitung yang tersisa.
3. Masukkan sisanya ke kotak dan ulangi sampai semua habis. Catat jumlah sisa setelah setiap lemparan.
4. Gambar grafik jumlah sisa terhadap nomor lemparan, lalu bandingkan dengan Lab Mini di atas.

Pertanyaan: Berapa "waktu paruh" tutup botolmu (dalam lemparan)? Mengapa hasilmu tidak persis 50, 25, 12,5, ...? Apa yang terjadi jika kamu memakai 1.000 tutup? Cuci tangan setelah bermain dengan barang bekas, ya.



RINGKASAN KILAT

Bab 31 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menuliskan susunan inti dengan notasi A_ZX dan membedakan **isotop, isobar, dan isoton**
- menghitung **defek massa** dan **energi ikat** inti dengan $E = \Delta m c^2$
- membandingkan sinar **alfa, beta, dan gamma** (muatan, daya ionisasi, daya tembus) dan menuliskan persamaan peluruhannya
- memakai **waktu paruh** dan hukum peluruhan untuk penanggalan radiometrik dan dosis obat nuklir
- menjelaskan **fisi, reaktor nuklir, fusi** di Matahari, serta cara hidup aman bersama radiasi



Istilah kunci

nukleon

isotop

gaya inti kuat

defek massa

energi ikat

peluruhan radioaktif

radiasi

waktu paruh

aktivitas

konstanta peluruhan

fisi

reaksi berantai

fusi

radiasi latar

dosis ekuivalen



Rumus penting

$$E = N \cdot \Delta m c^2$$

Energi dari massa yang hilang. Setiap reaksi inti 'menghilangkan' sedikit massa Δm . Kalikan dengan c^2 dan dengan banyaknya reaksi N , dan kamu mendapat energi totalnya.

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

Sisa zat radioaktif setelah waktu t . Setiap satu waktu paruh berlalu, sisa zat radioaktif tinggal separuhnya.

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N$$

Aktivitas sumber radioaktif. Makin banyak inti dan makin pendek waktu paruhnya, makin 'ramai' peluruhannya setiap detik.

⚠ **Jangan sampai terjebak**

- Alfa memang tertahan kertas dan lapisan kulit mati, jadi sumber alfa di luar tubuh hampir tidak berbahaya.

📄 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=31

🧩 **Teka-teki untuk Bab 32**

Detektor Geiger di Lab Mini mengubah setiap partikel radiasi menjadi satu pulsa listrik kecil, lalu menghitungnya, bahkan ribuan pulsa per detik, tanpa pernah salah hitung. "Otak" penghitungnya adalah keping silikon yang hanya mengenal dua kata: **0** dan **1**. Bagaimana mungkin benda yang hanya tahu 0 dan 1 bisa menghitung sampai ribuan?

▼ **Intip petunjuk**

Bayangkan deretan saklar lampu: mati = 0, nyala = 1. Delapan saklar bisa membentuk 256 pola berbeda. Saklar super kecil dari bahan *semikonduktor* bernama transistor, dirangkai menjadi **gerbang logika**, bisa menjumlahkan bilangan biner dengan kecepatan jutaan kali per detik. Kita rakit sendiri di Bab 32: Elektronika & Gerbang Logika!

32 Elektronika & Gerbang Logika: Saat Listrik Belajar "Berpikir"

Lampu taman yang menyala sendiri, charger HP, sampai kecerdasan artifisial: semuanya dibangun dari pasir (silikon) yang diatur dengan cerdas dan dua angka saja, 0 dan 1.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **konduktor**, **isolator**, dan **semikonduktor** memakai gambaran pita energi, lalu menjelaskan doping **tipe n** dan **tipe p**;
- menjelaskan cara kerja **dioda**, **penyearah**, **LED**, **sel surya**, dan **transistor** sebagai saklar dan penguat;
- mengubah bilangan **biner** ↔ **desimal** dan menjelaskan mengapa komputer memakai biner;
- membaca dan menyusun **gerbang logika** NOT, AND, OR, NAND, NOR, XOR beserta tabel kebenarannya;
- merancang **sistem otomatis** sederhana (sensor → logika → aktuator), jembatan menuju mapel **Koding & Kecerdasan Artifisial**.

LAMPU TAMAN PUNYA OTAK?

KOMIK • 4 PANEL

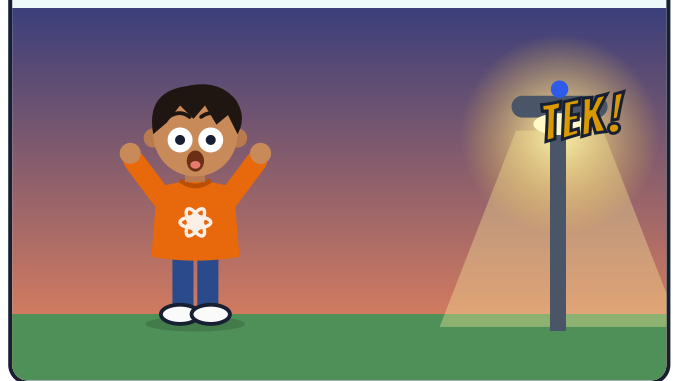
Pukul 17.45, taman kompleks

RAKA

Sar, lampu taman ini kok tahu kapan harus nyala? Nggak ada yang pencet saklarnya!

**RAKA**

WAAA! Nyala sendiri! Lampunya punya otak, ya?!





Tebak Dulu!

Lampu taman di komik menyala sendiri sekitar pukul 17.50, dan kemarin sekitar 17.47. Apa yang paling mungkin "memerintah" lampu itu?

Jam di dalam lampu yang disetel tepat pukul 17.50.

Petugas di kantor listrik yang menekan tombol dari jauh.

Sensor cahaya yang mengirim sinyal "gelap" ke rangkaian logika dan transistor.

Panas matahari yang mendinginkan kabel lampu.

Jawabannya: sensor cahaya + rangkaian logika. Kalau lampu dipasang jam, ia akan menyala pada menit yang sama setiap hari. Waktu nyala yang bergeser sedikit mengikuti terbenamnya matahari menunjukkan bahwa lampu "melihat" langit. Sensor mengubah cahaya menjadi sinyal listrik, rangkaian logika memutuskan (gelap → nyala), dan transistor menjadi saklar yang menyalakan lampu. Di akhir bab, kamu akan merakit sendiri "otak" lampu ini!

32.1 Konduktor, isolator, dan semikonduktor

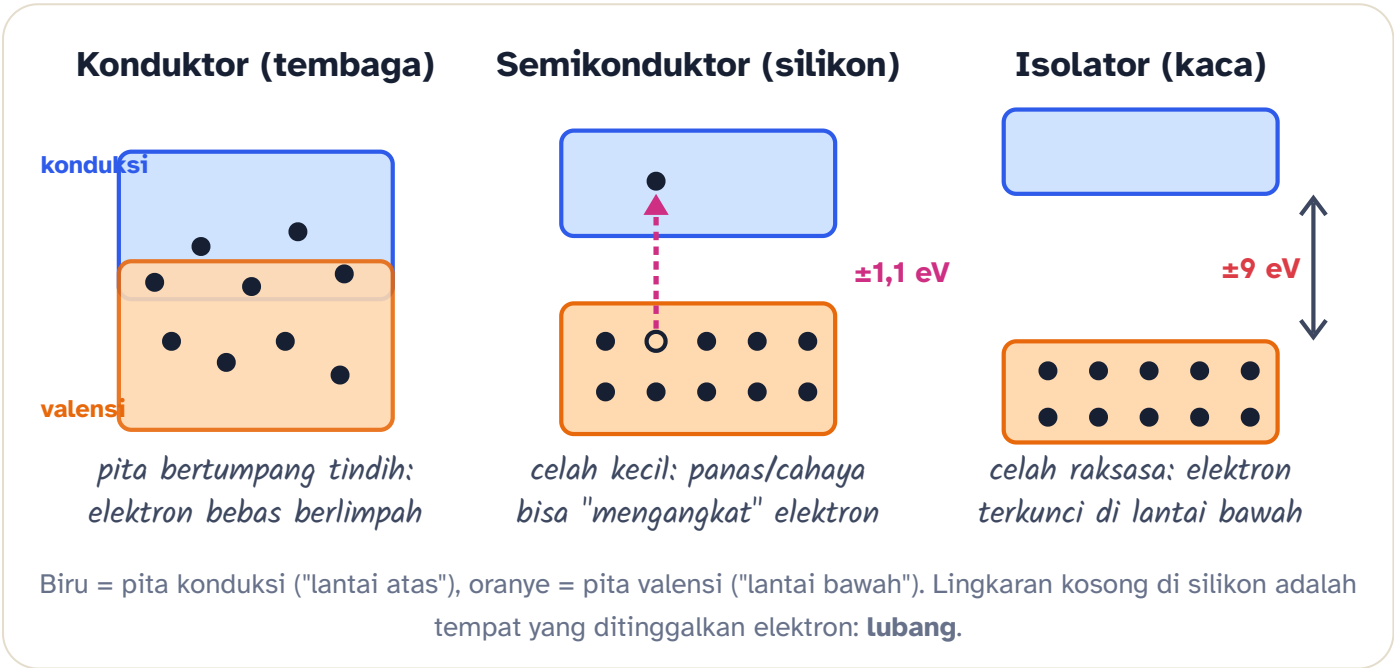
Kabel tembaga mengalirkan listrik dengan mudah. Plastik pembungkusnya hampir tidak mengalirkan listrik sama sekali. Di antara keduanya ada bahan "ajaib" bernama **semikonduktor**, misalnya **silikon** (dimurnikan dari pasir kuarsa, SiO_2) dan germanium. Kehebatannya: daya hantarnya bisa **diatur** dengan sangat tepat. Itulah sebabnya semua cip di HP, laptop, dan kalkulator dibuat dari semikonduktor.

Bahasa sederhana • Gampangnya: **konduktor** seperti jalan tol yang kosong (listrik lancar), **isolator** seperti tembok (listrik tertahan), dan **semikonduktor** seperti jalan berpalang yang bisa dibuka dan ditutup. Karena bisa diatur, semikonduktor dipakai untuk membuat "saklar pintar" di dalam HP.

Gedung parkir elektron: gambaran pita energi

Bayangkan elektron di dalam bahan seperti mobil di gedung parkir bertingkat. Lantai bawah, disebut **pita valensi**, sudah penuh sesak. Mobil di sana tidak bisa bergerak karena tidak ada tempat kosong. Lantai atas, disebut **pita konduksi**, masih lega. Mobil yang berhasil naik ke lantai atas bisa melaju bebas. Mobil yang melaju inilah arus listrik.

Jarak antara kedua lantai disebut **celah pita** (*band gap*), diukur dalam elektronvolt (eV). Celah inilah yang membedakan ketiga jenis bahan:



Saat sebuah elektron naik ke pita konduksi, ia meninggalkan tempat kosong di pita valensi. Tempat kosong ini disebut **lubang** (*hole*). Elektron tetangga bisa bergeser mengisi lubang itu, lalu tetangga berikutnya mengisi lubang yang baru, dan seterusnya. Hasilnya, lubang seolah-olah **bergerak** seperti muatan positif. Jadi semikonduktor punya **dua** pembawa muatan: elektron (–) dan lubang (+).

Bahan	Jenis	Celah pita ($\pm$)	Dipakai untuk
Tembaga, aluminium	konduktor	0 (pita bertumpang tindih)	kabel listrik
Germanium	semikonduktor	0,67 eV	dioda dan transistor generasi awal
Silikon	semikonduktor	1,12 eV	cip komputer, sel surya
Galium arsenida	semikonduktor	1,42 eV	LED inframerah, laser

Galium nitrida	semikonduktor	3,4 eV	LED biru dan putih, charger mungil
Kaca, kuarsa (SiO ₂)	isolator	±9 eV	pelindung, isolator tiang listrik



Tebak Dulu!

Sepotong kawat tembaga dan sekeping silikon murni sama-sama dipanaskan. Apa yang terjadi pada hambatan keduanya?

Keduanya naik, karena panas selalu menghambat listrik.

Keduanya turun, karena panas membuat semua bahan menghantar lebih baik.

Hambatan tembaga naik, tetapi hambatan silikon turun.

Tidak ada yang berubah, karena hambatan hanya bergantung pada panjang kawat.

Tembaga naik, silikon turun! Di tembaga, elektron bebas sudah berlimpah. Panas hanya membuat atom-atomnya bergetar lebih hebat sehingga elektron lebih sering "tersandung", jadi hambatannya naik. Di silikon, panas justru mengangkat lebih banyak elektron menyeberangi celah pita. Pembawa muatan bertambah banyak, jadi hambatannya turun. Sifat ini dipakai pada **termistor**, sensor suhu di rice cooker dan termometer digital.

MITOS

"Semikonduktor artinya setengah konduktor, jadi arusnya selalu setengah."

MITOS

"Cip komputer terbuat dari logam supaya bisa menghantarkan listrik."

FAKTA

"Semi" di sini berarti daya hantarnya **berada di antara** konduktor dan isolator, dan bisa diatur dari hampir nol sampai sangat besar. Arus pada transistor bisa diubah ribuan kali lipat hanya dengan sinyal kecil.

FAKTA

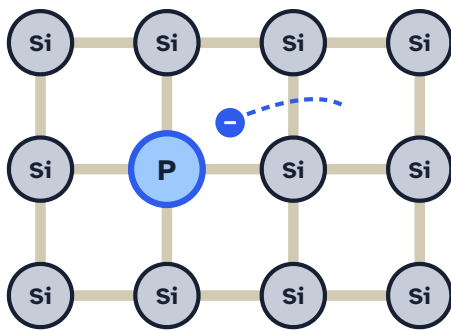
Otak cip adalah **silikon** yang dimurnikan sampai sangat tinggi, lalu "dibumbui" atom lain. Logam hanya dipakai sebagai kabel penghubung mungil di dalamnya.

32.2 Doping: membumbui silikon menjadi tipe n dan tipe p

Silikon murni adalah penghantar yang buruk. Pada suhu kamar, hanya sekitar satu dari beberapa triliun atomnya yang melepas elektron ke pita konduksi. Insinyur lalu menambahkan sedikit sekali atom lain ke dalam kristal silikon. Proses ini disebut **doping**, mirip menaburkan sejumput garam ke dalam sepanci sayur: sedikit sekali, tetapi rasanya berubah total.

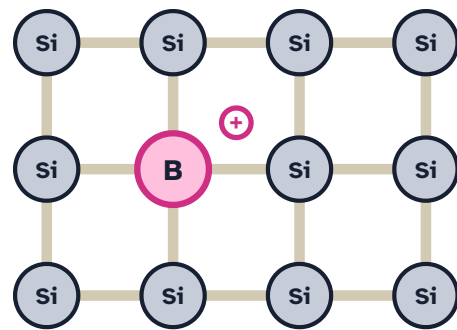
Setiap atom silikon punya 4 elektron valensi. Di dalam kristal, setiap atom berpegangan tangan dengan 4 tetangganya. Apa jadinya jika kita menyelipkan atom dengan 5 atau 3 elektron valensi?

Tipe n: diberi fosfor (5 elektron)



elektron ke-5 "nganggur" → bebas bergerak

Tipe p: diberi boron (3 elektron)



satu "tangan" kosong → lubang

Kiri: fosfor menyumbang satu elektron bebas (tipe n). Kanan: boron menyisakan satu lubang (tipe p). Garis abu-abu = ikatan antaratom.

- **Tipe n** (*negative*): silikon diberi atom bervalensi 5, seperti **fosfor** atau arsenik. Empat elektronnya berikatan, elektron kelima hampir bebas. Pembawa muatan mayoritasnya **elektron**.
- **Tipe p** (*positive*): silikon diberi atom bervalensi 3, seperti **boron** atau galium. Satu ikatan kekurangan elektron sehingga terbentuk **lubang**. Pembawa muatan mayoritasnya lubang.



AWAS JEBAKAN

Tipe n **tidak** bermuatan negatif, dan tipe p **tidak** bermuatan positif! Atom fosfor membawa elektron ekstra, tetapi intinya juga punya satu proton ekstra. Jadi kepingan tipe n tetap **netral**. Huruf "n" dan "p" hanya menunjukkan jenis pembawa muatan yang paling banyak bergerak.



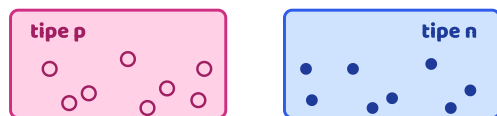
SEJUMPUT SAJA CUKUP

Menambahkan kira-kira **satu atom fosfor untuk setiap sejuta atom silikon** sudah membuat jumlah elektron bebas naik **jutaan kali**. Karena itu pabrik cip membutuhkan silikon super murni: kotoran sekecil apa pun ikut menjadi "bumbu" yang tidak diinginkan.

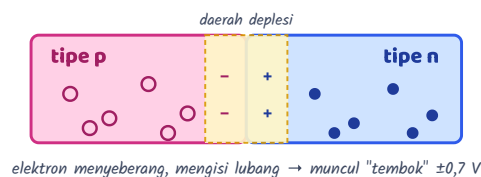
32.3 Dioda: pintu putar satu arah, dan rahasia charger HP

Tempelkan keping tipe p dengan keping tipe n, maka lahirlah **sambungan p-n**, inti dari sebuah **dioda**. Dioda bekerja seperti **pintu putar di gerbang stasiun KRL**: kamu bisa lewat ke satu arah, tetapi pintunya terkunci jika

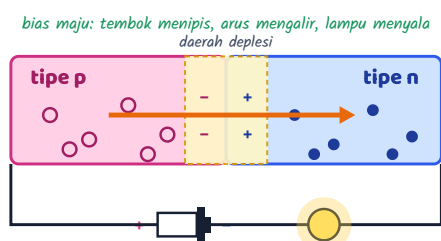
didorong dari arah sebaliknya. Ikuti animasinya.



Langkah 1. Dua keping semikonduktor: tipe p penuh **lubang** (lingkaran kosong), tipe n penuh **elektron bebas** (titik biru).



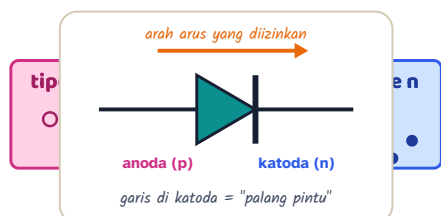
Langkah 2. Saat ditempelkan, elektron di dekat sambungan menyeberang dan mengisi lubang. Terbentuk **daerah deplesi** tanpa pembawa muatan bebas, dengan "tembok" beda potensial sekitar **0,7 V** untuk silikon.



Langkah 3. Bias maju: kutub + baterai ke sisi p, kutub – ke sisi n. Jika tegangannya melebihi $\pm 0,7$ V, tembok "jebol" dan arus mengalir deras. Lampu menyala.



Langkah 4. Bias mundur: baterai dibalik. Elektron dan lubang ditarik menjauhi sambungan, tembok makin tebal, dan hampir tidak ada arus. Lampu padam.



Langkah 5. Simbol dioda: segitiga menunjuk arah arus yang diizinkan (dari anoda ke katoda), dan garisnya adalah palang yang menolak arus balik.



Tebak Dulu!

Raka menyolder dioda silikon secara seri dengan lampu senter dan baterai 3 V, tetapi dioda itu terpasang terbalik (bias mundur). Apa yang terjadi?

Lampu menyala lebih terang karena dioda menambah tegangan.

Lampu menyala seperti biasa karena dioda hanya kawat kecil.

Lampu tidak menyala karena dioda menahan arus dari arah itu.

Baterai meledak karena arusnya berbalik.

Lampu tidak menyala. Pada bias mundur, daerah deplesi melebar sehingga hanya arus bocor yang sangat kecil (orde mikroampere atau lebih kecil) yang lewat. Baterai aman. Sifat ini justru dimanfaatkan sebagai **pengaman**: mainan elektronik sering diberi dioda supaya tidak rusak jika baterainya terpasang terbalik.

Penyearah: mengubah AC menjadi DC

Listrik PLN adalah arus bolak-balik (AC) 50 Hz: arahnya berbalik 100 kali setiap detik. Padahal baterai HP hanya mau diisi arus searah (DC). Di dalam charger, tegangan diturunkan dulu, lalu **disearahkan** oleh dioda, lalu **diratakan** oleh kapasitor.

- **Penyearah setengah gelombang** (1 dioda): bagian negatif gelombang dibuang. Hasilnya denyut-denyut 50 kali per detik dengan "jeda" kosong.
- **Penyearah gelombang penuh** (jembatan 4 dioda): bagian negatif dibalik menjadi positif. Denyutnya 100 kali per detik tanpa jeda, tetapi arus selalu melewati **2 dioda**, jadi hilang $\pm 1,4$ V.
- **Kapasitor perata**: mengisi muatan saat tegangan memuncak, lalu "menyumbangkan" muatannya saat tegangan turun, seperti tandon air di atap yang tetap mengalirkan air walau pompa menyala-mati. Sisa naik-turunnya disebut **riak** (*ripple*).

$$V_{dc} \approx \sqrt{2} V_{rms} - 0,7 n$$

Tegangan puncak AC dikurangi 'tiket masuk' 0,7 volt untuk setiap dioda yang dilewati arus.

 V_{rms}

Tegangan efektif trafo V

 n

Dioda yang dilewati buah

 V_{dc}

Tegangan keluaran (kapasitor besar) V

TEGANGAN KELUARAN
(KAPASITOR BESAR)

11,33

V

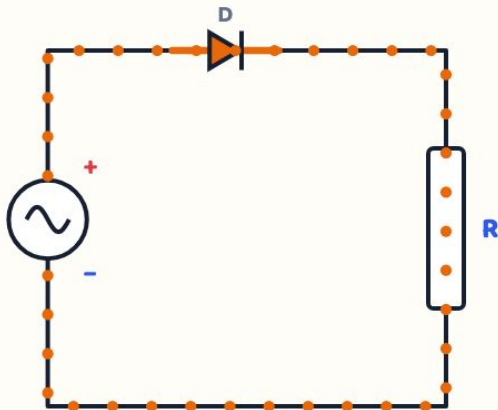
Trafo 9 V rms punya puncak $\sqrt{2}$ kali lebih besar. Dikurangi 0,7 V untuk setiap dioda (2 buah) → keluaran $\approx$ **11,33** V DC.

Cek satuan: V – V = V. Angka 0,7 V berlaku untuk dioda silikon; dioda germanium hanya $\pm 0,3$ V.

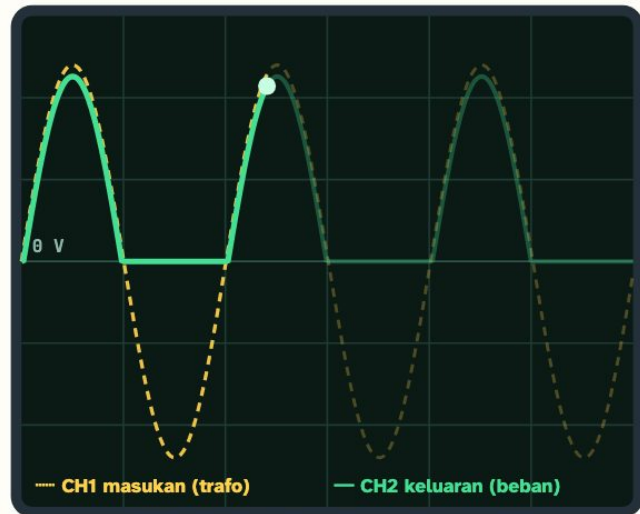
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-PENYEARAH](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-penyearah)

LAB MINI
Osiloskop penyearah: dari AC menjadi DC

 LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-32

 trafo
12 V puncak


~ masih bergelombang



5 V/kotak • 10 ms/kotak • gerak lambat x50

Puncak keluaran

11,3 V

Rata-rata (DC)

3,48 V

Riak (puncak-ke-puncak)

11,3 V

Frekuensi

50 denyut/s

Mulai dari "tanpa dioda", lalu coba setengah gelombang dan jembatan. Perhatikan dioda mana yang menyala oranye di tiap setengah putaran. Lalu pasang kapasitor dan cari kombinasi C dan R yang membuat riaknya di bawah 1 V. Apa yang terjadi jika bebannya diperkecil (arus lebih besar)?

KERJAKAN BERSAMA
Adaptor 9 volt

Sebuah adaptor memakai trafo 9 V (rms), penyearah jembatan dioda silikon, dan kapasitor besar. Berapa kira-kira tegangan DC keluarannya tanpa beban berat?

- 1 Tegangan puncak trafo: $V_{\text{maks}} = \sqrt{2} \times 9 = 12,7 \text{ V}$.
- 2 Pada jembatan, arus melewati 2 dioda: hilang $2 \times 0,7 = 1,4 \text{ V}$.
- 3 Kapasitor besar terisi hingga hampir puncak: $V_{\text{dc}} \approx 12,7 - 1,4 = 11,3 \text{ V}$.

Sekitar 11,3 V. Karena itu adaptor "9 V" murah sering terukur lebih dari 9 V saat tidak dibebani, lalu turun ketika arus besar ditarik (riaknya membesar).


CHARGER HP ZAMAN SEKARANG

Charger modern langsung menyearahkan listrik PLN, lalu mencacahnya ribuan kali per detik dengan transistor. Frekuensi tinggi ini membuat trafonya bisa sangat mungil. Di ujungnya, arus disearahkan dan diratakan lagi. Jadi dioda dan kapasitor tetap bekerja di dalam kotak kecil itu, dua kali!

LED dan sel surya: dioda yang bermain dengan cahaya

LED (*light-emitting diode*) adalah dioda yang memancarkan cahaya. Saat diberi bias maju, elektron dari sisi n "jatuh" ke lubang di sisi p. Energi jatuhnya dilepas sebagai **foton**. Besar energi foton kira-kira sama dengan celah pita bahannya, jadi **warna LED ditentukan oleh bahannya**, bukan oleh warna plastik pembungkusnya.

Hubungan energi foton dan panjang gelombang (ingat Bab 28): $E = \frac{hc}{\lambda}$, atau versi praktisnya $\lambda \text{ (nm)} \approx \frac{1240}{E \text{ (eV)}}$.

LED merah dengan celah $\pm 1,9$ eV memancarkan cahaya ± 650 nm. LED biru dengan celah $\pm 2,7$ eV memancarkan ± 460 nm.



TAMU DARI MASA LALU

LED merah dan hijau sudah ada sejak 1960-an, tetapi LED **biru** yang terang sangat sulit dibuat. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, dan Shuji Nakamura berhasil membuatnya dari galium nitrida pada awal 1990-an dan meraih **Nobel Fisika 2014**. Berkat LED biru, lahirlah lampu LED putih (LED biru + lapisan fosfor kuning) yang hemat energi di rumah-rumah kita.

LED itu "rakus": begitu tegangannya sedikit melewati tegangan maju, arusnya melonjak dan LED bisa putus. Karena itu LED **selalu** dipasang seri dengan resistor pelindung.

$$R = \frac{V_s - V_{LED}}{I}$$

Sisa tegangan yang tidak dipakai LED harus 'ditanggung' resistor, supaya arusnya pas.

 V_s

Tegangan sumber V

 V_{LED}

Tegangan maju LED V

 I

Arus LED mA

 R Hambatan resistor Ω

HAMBATAN RESISTOR

200 Ω

Sumber **5 V**, LED memakai **2 V**, sisanya ditanggung resistor. Agar arusnya **15 mA**, pilih **R $\approx$ 200 Ω** , lalu ambil nilai standar terdekat yang sedikit lebih besar.

Cek satuan: $\frac{V}{A} = \Omega$. Jangan lupa: arus dalam mA harus diubah ke A dulu.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-LED-RESISTOR

Kamu ingin menyalakan LED merah (tegangan maju 2,0 V, arus 15 mA) dari port USB 5 V. Berapa hambatan resistor yang dibutuhkan?

1 Tegangan yang harus ditanggung resistor: $5,0 - 2,0 = 3,0$ V.

2 Ubah arus ke ampere: $15 \text{ mA} = 0,015$ A.

3 $R = \frac{3,0}{0,015} = 200 \Omega$.

200 Ω . Di toko elektronik, nilai standar terdekat di atasnya adalah **220 Ω** : arusnya sedikit lebih kecil ($\pm 13,6$ mA), LED tetap terang dan lebih awet.

Sel surya adalah kebalikan LED. Foton yang cukup energinya menabrak sambungan p-n dan melepaskan pasangan elektron-lubang. Medan listrik di daerah deplesi langsung "menyortir" mereka: elektron didorong ke sisi n, lubang ke sisi p. Muncullah tegangan sekitar **0,5–0,6 V per sel**. Satu panel surya berisi puluhan sel yang disusun seri supaya tegangannya cukup besar.



FISIKA INDONESIA

Di Waduk Cirata, Jawa Barat, ratusan ribu panel surya mengapung di atas air sebagai **PLTS terapung** yang termasuk terbesar di Asia Tenggara (diresmikan 2023). Di desa-desa, **lampu jalan tenaga surya** menyimpan energi siang hari di baterai, lalu menyala otomatis saat gelap. Sementara itu, kawasan industri di **Batam** menjadi salah satu pusat perakitan dan pengujian komponen elektronik dan semikonduktor di Indonesia.

MITOS

"Warna LED berasal dari plastik berwarna yang membungkusnya."

MITOS

"Panel surya butuh panas matahari, jadi makin panas makin banyak listriknya."

FAKTA

Warnanya ditentukan oleh **celah pita** bahan semikonduktornya. Banyak LED modern berpembungkus bening tetapi tetap memancarkan merah, hijau, atau biru. Plastik berwarna hanya membantu kita mengenali LED saat padam.

FAKTA

Panel surya memanen **cahaya**, bukan panas. Justru jika panel terlalu panas, tegangannya sedikit **turun**. Hari cerah yang sejuk adalah hari terbaik bagi panel surya.

32.5 Transistor: saklar dan penguat paling penting di dunia

Susun tiga lapis semikonduktor, misalnya n-p-n, maka jadilah **transistor**. Kakinya ada tiga: **basis** (B), **kolektor** (C), dan **emitor** (E). Ide besarnya: **arus kecil di basis mengendalikan arus besar dari kolektor ke emitor**. Mirip pintu air bendungan yang besar tetapi bisa dibuka dengan memutar tuas kecil.

$$I_C = \beta I_B$$

Arus basis yang mungil mengatur arus kolektor yang puluhan sampai ratusan kali lebih besar.



Arus basis **0,2** mA dikuatkan **100** kali → arus kolektor **20** mA. Rumus ini berlaku selama transistor belum jenuh (belum 'mentok' terbuka penuh).

Cek satuan: β tidak bersatuan, karena mA/mA.

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

Transistor punya dua "pekerjaan":

Peran	Cara kerja	Contoh
Penguat	Sinyal kecil di basis (misalnya dari mikrofon) menghasilkan salinan yang jauh lebih besar di kolektor.	pengeras suara masjid, radio, amplifier gitar
Saklar	Basis tanpa arus → transistor mati (0). Basis diberi arus cukup → transistor jenuh , terbuka penuh (1).	lampu otomatis, semua cip komputer

Peran saklar inilah yang membuka pintu ke dunia digital. Saklar hanya punya dua keadaan: mati atau nyala, **0** atau **1**. Cip prosesor HP modern memuat **lebih dari sepuluh miliar** transistor mungil, masing-masing berukuran puluhan nanometer, menyalakan-mati miliaran kali per detik.

Bahasa sederhana • Transistor adalah saklar yang tidak perlu dipencet tangan. Saklar ini "dipencet" oleh listrik kecil. Karena sangat kecil dan sangat cepat, miliaran transistor bisa dimasukkan ke dalam satu cip HP.



TAMU DARI MASA LALU

Pada Desember 1947, John Bardeen dan Walter Brattain di laboratorium Bell (Amerika Serikat) menyalakan transistor pertama, sebesar ibu jari. William Shockley segera menyempurnakannya. Ketiganya meraih **Nobel Fisika 1956**. Sebelumnya, komputer memakai tabung hampa sebesar bola lampu: komputer ENIAC (1946) berisi ± 18.000 tabung, beratnya ± 27 ton, dan menghabiskan satu ruangan!

CONTOH Transistor menyalakan LED

Transistor dengan $\beta = 100$ mendapat arus basis $0,15 \text{ mA}$. Berapa arus kolektornya? Cukupkah untuk menyalakan LED yang butuh 15 mA ?

1 $I_C = \beta I_B = 100 \times 0,15 \text{ mA} = 15 \text{ mA}$.

2 Arus 15 mA pas untuk LED biasa.

15 mA, cukup. Arus basis yang hanya $0,15 \text{ mA}$ (misalnya dari sensor atau cip) berhasil "memerintah" arus seratus kali lebih besar.

32.6 Sistem bilangan biner: bahasa ibu komputer

Kita berhitung dengan sepuluh angka (0–9), mungkin karena jari kita sepuluh. Komputer hanya punya saklar, dan saklar hanya mengenal dua keadaan. Maka komputer berhitung dengan **bilangan biner** (basis 2), hanya memakai angka **0** dan **1**. Satu angka biner disebut **bit** (*binary digit*). Delapan bit disebut satu **byte**.

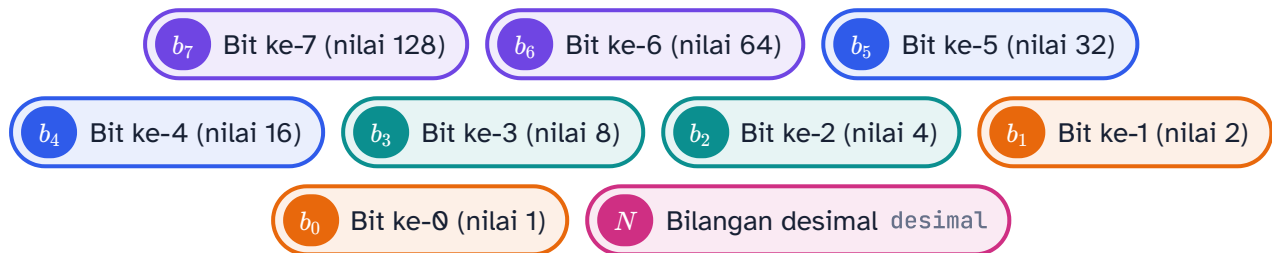
Mengapa tidak memakai sepuluh tingkat tegangan saja? Karena membedakan "nyala" dan "mati" jauh lebih mudah dan tahan gangguan. Bayangkan memberi kode dengan senter dari seberang lapangan: membedakan nyala-mati itu gampang, tetapi membedakan sepuluh tingkat terang? Hampir mustahil!

Nilai tempat: pangkat dua

Pada bilangan desimal, nilai tempatnya 1, 10, 100, 1.000, dan seterusnya (pangkat 10). Pada biner, nilai tempatnya 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, dan seterusnya (pangkat 2). Contoh: $1011_2 = 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 11$.

$$N = \sum_{k=0}^7 b_k \cdot 2^k = 128b_7 + 64b_6 + \dots + 2b_1 + b_0$$

Setiap bit yang menyala menyumbang nilai tempatnya. Jumlahkan saja!



BILANGAN DESIMAL

165

desimal

Biner **10100101** = **165** dalam desimal. Satu byte bisa menyimpan 256 nilai berbeda, dari 0 sampai 255.

Cek satuan: Bit tidak bersatuan. Delapan bit = 1 byte, cukup untuk satu huruf: huruf A disimpan sebagai 65 = 01000001.

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

Dari desimal ke biner: bagi dua terus

Bagi bilangan desimal dengan 2 berulang-ulang dan catat sisanya. Baca sisanya **dari bawah ke atas**. Contoh untuk 13: $13 : 2 = 6$ sisa **1**; $6 : 2 = 3$ sisa **0**; $3 : 2 = 1$ sisa **1**; $1 : 2 = 0$ sisa **1**. Jadi $13 = 1101_2$.

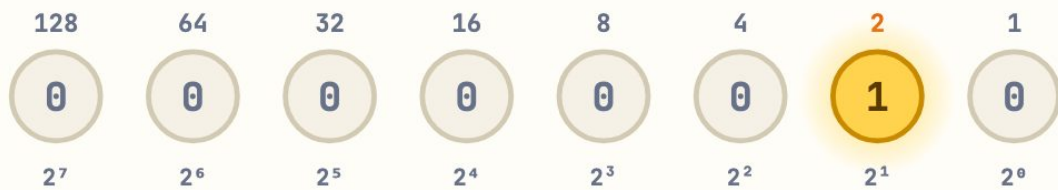


TRIK KAK NARA: KARTU TEBAK PIKIRAN

Buat 5 kartu. Kartu pertama berisi semua bilangan 1-31 yang bit ke-0-nya bernilai 1 (1, 3, 5, 7, ...). Kartu kedua berisi bilangan yang bit ke-1-nya 1 (2, 3, 6, 7, 10, 11, ...). Begitu seterusnya untuk 4, 8, dan 16. Minta temanmu memilih angka rahasia dan menyebutkan kartu mana saja yang memuat angka itu. Jumlahkan angka **terkecil** di kartu-kartu tersebut, dan tebakkanmu pasti tepat. Kamu sedang membaca biner tanpa ketahuan!

LAB MINI

Papan lampu biner: satu byte di tanganmu

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-32desimal **2**

$$2 = 2$$

biner 0000 0010 • heksa 02

Desimal
2Biner
0000 0010Heksadesimal
02Huruf (kode ASCII)
—Target tercapai
0

Ketuk lampu untuk menyalakan atau mematikan bit. Tekan  **Target acak**, lalu buat angka yang diminta secepat mungkin. Tekan ► **Jalankan** untuk melihat byte menghitung sendiri: bit mana yang paling sering berkedip?

CONTOH

Membaca bilangan biner

Ubah 101101_2 ke bilangan desimal.

- 1 Tulis nilai tempat dari kanan: 1, 2, 4, 8, 16, 32.
- 2 Bit yang bernilai 1 berada di tempat 32, 8, 4, dan 1.
- 3 $32 + 8 + 4 + 1 = 45$.

$101101_2 = 45$. Cek dengan Rumus Hidup di atas: nyalakan bit yang sesuai!

MITOS

"Komputer sangat pintar karena memahami angka 0 sampai 9 lebih cepat dari kita."

FAKTA

Komputer hanya mengenal

0 dan 1

. Ia hebat karena melakukan miliaran operasi sederhana setiap detik tanpa lelah. Foto, lagu, dan pesan WhatsApp di HP-mu semuanya disimpan sebagai deretan 0 dan 1.

32.7 Gerbang logika dan tabel kebenaran

Bagaimana saklar bisa "berpikir"? Dengan disusun menjadi **gerbang logika**. Gerbang logika menerima satu atau dua masukan (0 atau 1) dan menghasilkan satu keluaran menurut aturan tertentu. Dalam rangkaian nyata, **1** berarti tegangan tinggi (misalnya 5 V atau 3,3 V) dan **0** berarti tegangan sekitar 0 V. Semua kemungkinan masukan dan keluarannya dicatat dalam **tabel kebenaran**.

Simbol	Gerbang	Ekspresi	A B = 00	01	10	11	Analogi
	NOT (BUKAN)	$Y = \overline{A}$	$A = 0 \rightarrow Y = 1; A = 1 \rightarrow Y = 0$				si pembangkang
	AND (DAN)	$Y = A \cdot B$	0	0	0	1	brankas dua kunci
	OR (ATAU)	$Y = A + B$	0	1	1	1	bel dua tombol
	NAND	$Y = \overline{A \cdot B}$	1	1	1	0	alarm "belum lengkap"
	NOR	$Y = \overline{A + B}$	1	0	0	0	lampu "rumah kosong"
	XOR	$Y = A \oplus B$	0	1	1	0	saklar tangga



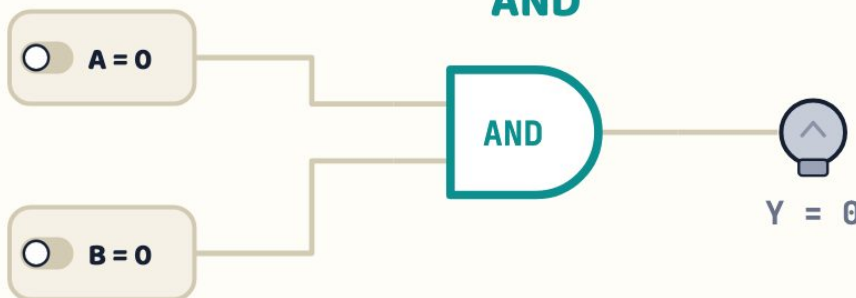
TRIK KAK NARA: HAFAL LEWAT CERITA

AND = brankas bank dengan dua kunci: harus *dua-duanya* diputar. **OR** = bel rumah dengan tombol di pintu depan dan belakang: *cukup satu*. **XOR** = saklar lampu tangga: lampu menyala jika posisi saklar atas dan bawah *berbeda*. **NOT** = si pembangkang. Huruf **N** di depan NAND dan NOR artinya "lalu dibalik" (lihat bulatan kecil di ujung simbolnya).

LAB MINI Laboratorium gerbang logika

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-32

ketuk saklar ↓



$$Y = A \cdot B$$

Brankas dua kunci: terbuka hanya jika A DAN B diputar.

Tabel kebenaran

A	B	Y
0	0	0 ✓
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Masukan

A = 0, B = 0

Keluaran Y

0 (lampu padam)

Baris tabel dicoba

1 dari 4

Pilih gerbang, lalu ketuk saklar **A** dan **B** di kanvas (atau tombolnya). Kabel bertegangan tinggi (1) menyala oranye. Coba semua baris tabel kebenaran sampai tercentang. Gerbang mana yang keluarannya 1 paling sering?



AWAS JEBAKAN: "ATAU" SEHARI-HARI

Kalau ibumu bertanya "mau teh atau kopi?", biasanya artinya pilih **salah satu**, bukan dua-duanya. Itu XOR! Dalam logika, **OR** berarti "salah satu *atau keduanya*": jika A = 1 dan B = 1, keluaran OR tetap 1. Banyak siswa tertukar di sini.

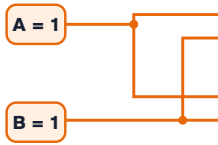


TAMU DARI MASA LALU

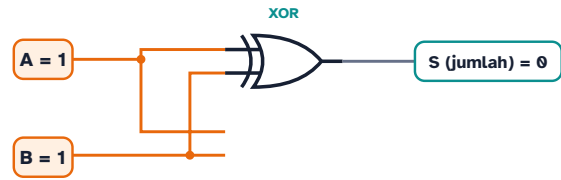
Pada 1854, guru matematika Inggris **George Boole** menulis buku tentang "hukum-hukum pikiran" dan menyatakan logika (benar/salah) dengan aljabar. Hampir seratus tahun kemudian, pada 1937, mahasiswa bernama **Claude Shannon** menunjukkan dalam tesisnya bahwa rangkaian saklar listrik dapat menjalankan aljabar Boole. Sejak itulah setiap komputer "berpikir" dengan logika Boole. Bahkan bilangan biner sudah dibahas filsuf Gottfried Leibniz sekitar tahun 1700.

Komputer menjumlahkan: $1 + 1 = 10$

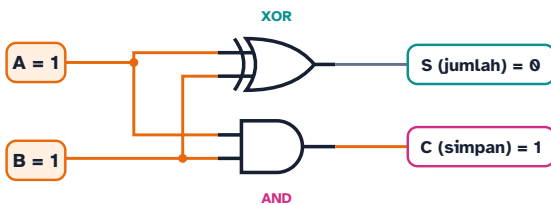
Hanya dengan dua gerbang, komputer sudah bisa menjumlahkan dua bit. Rangkaian ini disebut **penjumlah setengah** (*half adder*).



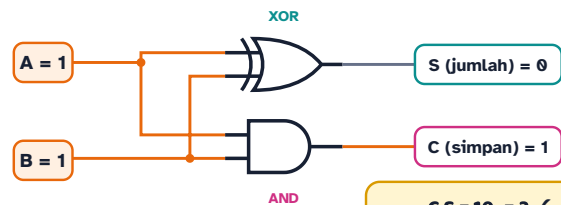
Langkah 1. Kita ingin menghitung $1 + 1$ dengan saklar saja. Masukan $A = 1$ dan $B = 1$ dicabangkan ke dua gerbang.



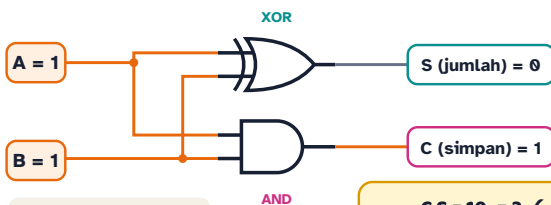
Langkah 2. Gerbang **XOR** memberi angka **jumlah** (S): $1 \oplus 1 = 0$. Seperti $5 + 5 = 10$ di desimal, angka satuannya 0.



Langkah 3. Gerbang **AND** memberi angka **simpanan** (C, *carry*): $1 \cdot 1 = 1$. Inilah "satu disimpan" yang dulu kamu pelajari di SD!



Langkah 4. Hasilnya dibaca C lalu S: 10_2 , yaitu 2 dalam desimal. Benar!



$0+0=00$ $0+1=01$
 $1+0=01$ $1+1=10$ (C S)

C S = $10_2 = 2$ ✓

Langkah 5. Tabel lengkap keempat kemungkinan. Sambungkan banyak penjumlah seperti ini, maka jadilah kalkulator. Cip HP-mu menjumlahkan bilangan 64 bit dengan cara yang sama.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

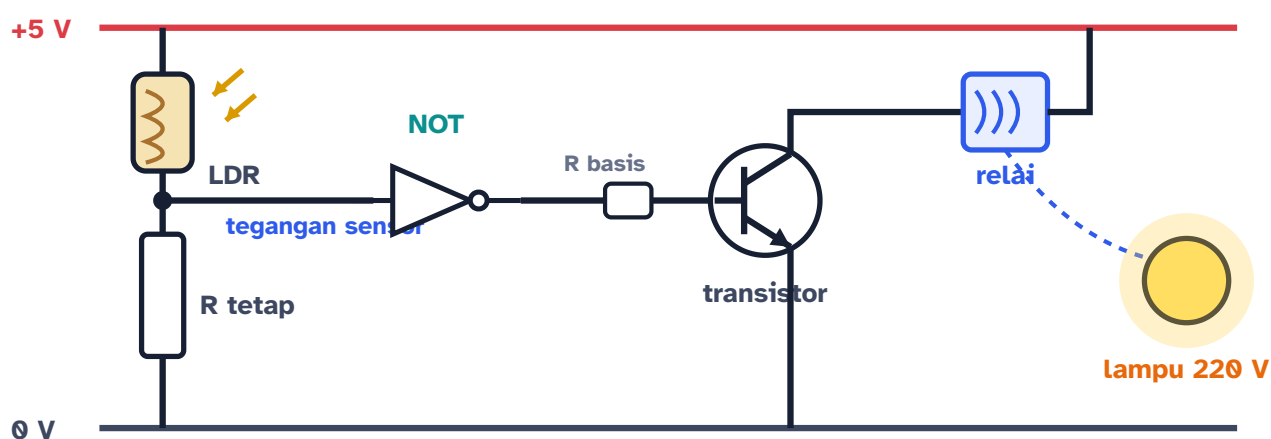
HUKUM DE MORGAN DAN KEAJAIBAN NAND

Dua hukum De Morgan: $\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$ dan $\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$. Akibatnya mengejutkan: **semua** gerbang bisa dibuat hanya dari NAND. NOT: sambungkan kedua masukan NAND, $\overline{A \cdot A} = \overline{A}$. AND: NAND lalu NOT. OR: $A + B = \overline{\overline{A} \cdot \overline{B}}$, yaitu NAND dari dua NOT. Karena itu NAND disebut **gerbang universal**. Pabrik cip menyukainya karena cukup satu jenis "batu bata" untuk membangun komputer apa pun. (NOR juga universal.)

32.8 Sensor, mikrokontroler, dan sistem otomatis

Hampir semua alat otomatis mengikuti pola tiga langkah: **masukan** → **proses** → **keluaran**. **Sensor** mengubah besaran fisika (cahaya, suhu, gerak, jarak) menjadi sinyal listrik. **Rangkaian logika** atau **mikrokontroler** (komputer mini satu cip yang bisa diprogram) memutuskan. **Aktuator** (lampu, motor, pompa, bel) menjalankan keputusan.

Sensor	Mendeteksi	Prinsip fisika	Contoh pemakaian
LDR (resistor peka cahaya)	terang-gelap	cahaya melepas pembawa muatan → hambatan turun	lampu jalan otomatis
Termistor	suhu	hambatan semikonduktor turun saat panas	rice cooker, termometer digital
Sensor PIR	gerak manusia	perubahan radiasi inframerah tubuh	lampu toilet, alarm
Sensor ultrasonik	jarak	waktu pantul bunyi berfrekuensi tinggi	sensor parkir mobil, robot
Sensor kelembapan tanah	tanah basah-kering	air menurunkan hambatan tanah	penyiram tanaman otomatis
Fotodioda	cahaya inframerah	efek fotolistrik di sambungan p-n	penerima remote TV

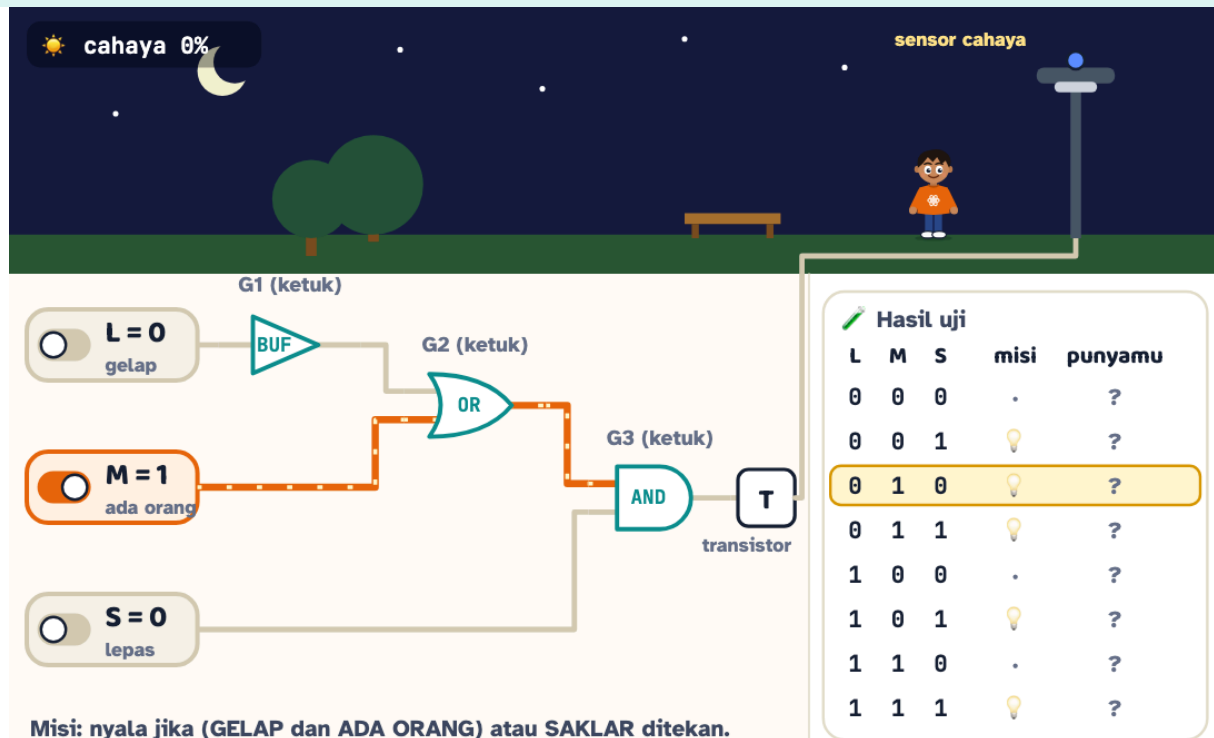


Saat gelap, hambatan LDR naik, tegangan sensor turun (0). Gerbang NOT membalikinya menjadi 1, transistor terbuka, relai tertarik, dan lampu 220 V menyala. Relai memisahkan listrik kecil (5 V) dari listrik rumah yang berbahaya.

Sekarang giliranmu menjadi insinyur. Lampu taman modern dibuat lebih hemat: ia menyala hanya jika **gelap** **DAN ada orang lewat**, atau jika petugas menekan **saklar manual**. Susunlah gerbangnya!

LAB MINI Tantangan insinyur: otak lampu taman hemat energi

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-32



Masukan

L=0 M=1 S=0

Lampu rangkaianmu

padam

Seharusnya

NYALA

Status

x belum sesuai misi

Ketuk tiap kotak gerbang untuk mengganti jenisnya. Ketuk sensor gerak dan saklar manual untuk mengubah masukan, atau geser tingkat cahaya. Tekan  **Uji & kemungkinan** untuk memeriksa rancanganmu. Tekan ► **Jalankan** untuk melihat sehari semalam di taman.

Pompa penyiram (**P**) harus menyala jika tanah kering ($K = 1$) dan sedang tidak hujan ($H = 0$). Tulis ekspresi logikanya, gerbang yang dibutuhkan, dan tabel kebenarannya.

- 1 "Tidak hujan" berarti kebalikan H : $\overline{H}$. Jadi perlu gerbang **NOT** untuk H .
- 2 "Kering **dan** tidak hujan": $P = K \cdot \overline{H}$. Perlu gerbang **AND**.
- 3 Tabel: $(K, H) = (0, 0) \rightarrow P = 0; (0, 1) \rightarrow 0; (1, 0) \rightarrow 1; (1, 1) \rightarrow 0$.
- 4 Cek akal sehat: pompa hanya menyala pada satu keadaan, yaitu tanah kering di hari cerah. Air hujan tidak dibuang percuma.

$P = K \cdot \overline{H}$: satu **NOT** dan satu **AND**. Dengan mikrokontroler, logika yang sama ditulis sebagai program: "jika kering dan tidak hujan, maka nyalakan pompa".



LANJUT • JEMBATAN KE KODING & KA

NEURON BUATAN: GERBANG LOGIKA YANG BISA BELAJAR

Dalam kecerdasan artifisial, **perseptron** (neuron buatan paling sederhana) menghitung $w_1A + w_2B$ lalu mengeluarkan 1 jika hasilnya $\geq$ ambang θ . Dengan $w_1 = w_2 = 1$ dan $\theta = 1,5$, ia menjadi gerbang **AND**. Dengan $\theta = 0,5$, ia menjadi **OR**. Bedanya dengan gerbang biasa: bobot w dan ambang θ bisa **diubah otomatis dari contoh data**, itulah "belajar". Satu perseptron tidak akan pernah bisa menjadi XOR (coba buktikan!). Untuk itu, neuron harus disusun berlapis-lapis. Itulah awal mula *deep learning*.



FISIKA INDONESIA

Mulai tahun ajaran 2025/2026, sekolah di Indonesia mengenal mata pelajaran pilihan **Koding dan Kecerdasan Artifisial**. Logika "jika... dan... atau... maka..." yang kamu pelajari di bab ini adalah fondasinya. Banyak SMK dan madrasah juga rajin mengikuti lomba robotik pelajar, dengan robot yang "berpikir" memakai sensor, mikrokontroler, dan gerbang logika persis seperti di sini.



Lampu jalan otomatis

Sensor cahaya + logika NOT + transistor/relai. Banyak lampu jalan tenaga surya di desa juga memakai prinsip ini.



Palang parkir

Palang naik jika tiket sah DAN ada mobil di depan palang, dan tidak turun selama sensor masih mendeteksi mobil di bawahnya.



Mesin cuci

Sensor ketinggian air, pengunci pintu, dan pewaktu digabung dengan logika: motor berputar hanya jika pintu terkunci DAN air cukup.



Charger HP

Dioda menyearahkan arus, kapasitor meratakannya, dan transistor mengatur tegangannya agar baterai tidak kelebihan muatan.



Remote TV

LED inframerah berkedip mengirim kode biner. Fotodioda di TV membacanya: 0 dan 1 yang tidak terlihat mata.



Robot SMK

Sensor ultrasonik mengukur jarak, mikrokontroler memutuskan "jika jarak < 20 cm, belok", dan motor menjalankannya.

Cek Cepat

Silikon murni diberi sedikit atom fosfor yang memiliki 5 elektron valensi. Hasilnya adalah...

semikonduktor tipe p

semikonduktor tipe n

isolator

konduktor bermuatan negatif

Gerbang yang keluarannya 1 hanya jika kedua masukannya berbeda adalah...

AND

OR

NAND

XOR

Bilangan biner 11010_2 sama dengan bilangan desimal...

26

13

52

11.010

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A



Tantangan Rumah: kartu tebak pikiran biner

Bahan: 5 lembar kertas atau kartu, pulpen, dan seorang teman atau anggota keluarga

1. Tulis angka 1–31 dalam biner (5 bit) di kertas buram. Contoh: $13 = 01101$.
2. Kartu "1" berisi semua angka yang bit paling kanannya 1. Kartu "2" berisi angka yang bit keduanya 1. Lanjutkan untuk kartu "4", "8", dan "16". Setiap kartu berisi 16 angka.
3. Minta temanmu memilih angka rahasia 1–31, lalu menunjuk semua kartu yang memuat angka itu.
4. Jumlahkan angka terkecil (pojok kiri atas) di kartu-kartu yang ditunjuk. Umumkan angkanya dengan gaya pesulap!

Pertanyaan: Mengapa trik ini selalu berhasil? Berapa kartu yang dibutuhkan untuk angka 1–100? Lalu, berapa bilangan terbesar yang bisa kamu hitung dengan sepuluh jari jika setiap jari adalah satu bit (tegak = 1, tekuk = 0)?



RINGKASAN KILAT

Bab 32 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **konduktor**, **isolator**, dan **semikonduktor** memakai gambaran pita energi, lalu menjelaskan doping **tipe n** dan **tipe p**
- menjelaskan cara kerja **dioda**, **penyearah**, **LED**, **sel surya**, dan **transistor** sebagai saklar dan penguat
- mengubah bilangan **biner** ↔ **desimal** dan menjelaskan mengapa komputer memakai biner
- membaca dan menyusun **gerbang logika** NOT, AND, OR, NAND, NOR, XOR beserta tabel kebenarannya
- merancang **sistem otomatis** sederhana (sensor → logika → aktuator), jembatan menuju mapel

Koding & Kecerdasan Artifisial



Istilah kunci

semikonduktor

pita valensi

pita konduksi

celah pita

lubang

doping

sambungan p-n

dioda

riak

LED

Sel surya

transistor

bilangan biner

bit

byte

gerbang logika

Rumus penting

$$V_{dc} \approx \sqrt{2} V_{rms} - 0,7 \text{ n}$$

Tegangan DC dari penyearah. Tegangan puncak AC dikurangi 'tiket masuk' 0,7 volt untuk setiap dioda yang dilewati arus.

$$R = \frac{V_s - V_{LED}}{I}$$

Resistor pelindung LED. Sisa tegangan yang tidak dipakai LED harus 'ditanggung' resistor, supaya arusnya pas.

$$I_C = \beta I_B$$

Transistor sebagai penguat arus. Arus basis yang mungil mengatur arus kolektor yang puluhan sampai ratusan kali lebih besar.

$$N = \sum_{k=0}^7 b_k \cdot 2^k = 128b_7 + 64b_6 + \dots + 2b_1 + b_0$$

Biner (8 bit) → desimal. Setiap bit yang menyala menyumbang nilai tempatnya. Jumlahkan saja!

⚠ Jangan sampai terjebak

- Tipe n tidak bermuatan negatif, dan tipe p tidak bermuatan positif!
- Kalau ibumu bertanya "mau teh atau kopi?", biasanya artinya pilih salah satu, bukan dua-duanya.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgem.my.id/physicspedia#soal?bab=32

🧩 Teka-teki untuk Bab 33

Sebuah seismometer BMKG mengubah getaran tanah menjadi deretan 0 dan 1, lalu mengirimnya lewat internet hampir secepat cahaya. Sementara itu, gelombang gempa merambat di batuan "hanya" beberapa kilometer per detik. Siapa yang menang balapan: **kabar gempanya** atau **guncangannya**? Dan mengapa setelah gempa di laut masih ada waktu untuk lari ke bukit?

▼ Intip petunjuk

Gempa mengirim beberapa jenis gelombang dengan kecepatan berbeda: gelombang P yang cepat datang lebih dulu, gelombang S yang lebih merusak menyusul. Tsunami jauh lebih lambat lagi, dan kecepatannya bergantung pada kedalaman laut: $v = \sqrt{gh}$. Bab 33 akan mengubah selisih waktu ini menjadi menit-menit penyelamat nyawa.

33 Bumi yang Bergerak: Fisika Gempa, Tsunami & Gunung Api

Indonesia duduk di atas pertemuan lempeng-lempeng raksasa. Fisika membantu kita memahami guncangannya, menghitung "waktu emas" sebelum tsunami tiba, dan menyelamatkan nyawa.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **struktur lapisan bumi** dan gerak **lempeng tektonik**, serta alasan Indonesia rawan gempa dan letusan gunung api;
- membedakan gelombang **P, S, dan permukaan**, lalu menentukan jarak dan lokasi **episenter** dari selisih waktu S–P;
- memahami **magnitudo** sebagai skala logaritmik: naik 1 berarti energi ± 32 kali;
- menghitung cepat rambat **tsunami** $v = \sqrt{gh}$ dan menjelaskan mengapa gelombang meninggi di dekat pantai;
- menerapkan **mitigasi**: bangunan tahan gempa, peringatan dini InaTEWS, tas siaga bencana, dan evakuasi ke tempat tinggi.

LATIHAN SIRENE DI SEKOLAH PANTAI

KOMIK • 4 PANEL

Latihan evakuasi, SMP di pesisir

KAK NARA

Ini LATIHAN! Gempa kuat! Merunduk, lindungi kepala, berpegangan!

GRRR! Ya Bumi



RAKA

Guncangannya sudah berhenti. Kok kita masih harus jalan ke bukit, Kak?

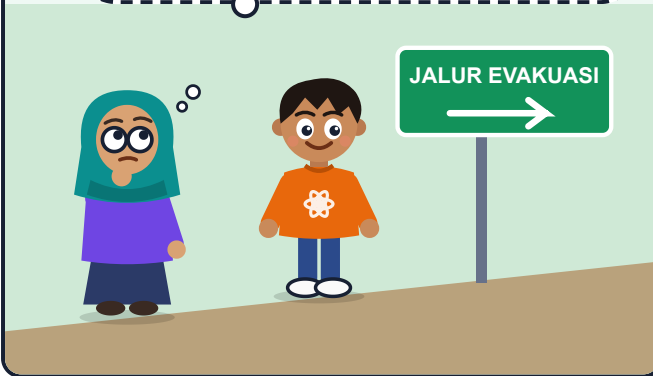


SARI

Pusat gempa di bawah laut. Kalau memicu tsunami, gelombangnya butuh waktu untuk sampai ke sini.

RAKA

Air laut bisa "telat" datang? Berapa menit, ya?



Titik kumpul di atas bukit

KAK NARA

Gelombang laut punya "batas kecepatan": $v = \sqrt{gh}$. Fisika memberi kita menit-menit emas. Kita pakai untuk menyelamatkan diri!



Tebak Dulu!

Di tengah samudra yang dalamnya sekitar 4 km, kira-kira secepat apa gelombang tsunami bergerak?

Selambat ombak biasa di pantai, sekitar 10 km/jam.

Secepat motor di jalan raya, sekitar 60 km/jam.

Hampir secepat pesawat jet, sekitar 700 km/jam.

Secepat cahaya, sehingga tidak ada waktu untuk lari.

Jawabannya: hampir secepat pesawat jet. Dengan $v = \sqrt{gh} = \sqrt{9,8 \times 4000} \approx 198$ m/s, atau sekitar 710 km/jam! Tetapi saat mendekati pantai yang dangkal, tsunami **melambat** drastis (dan meninggi). Selisih waktu inilah yang memberi kesempatan untuk evakuasi, terutama bila sumber gempa jauh. Kita akan menghitungnya di subbab 33.5.

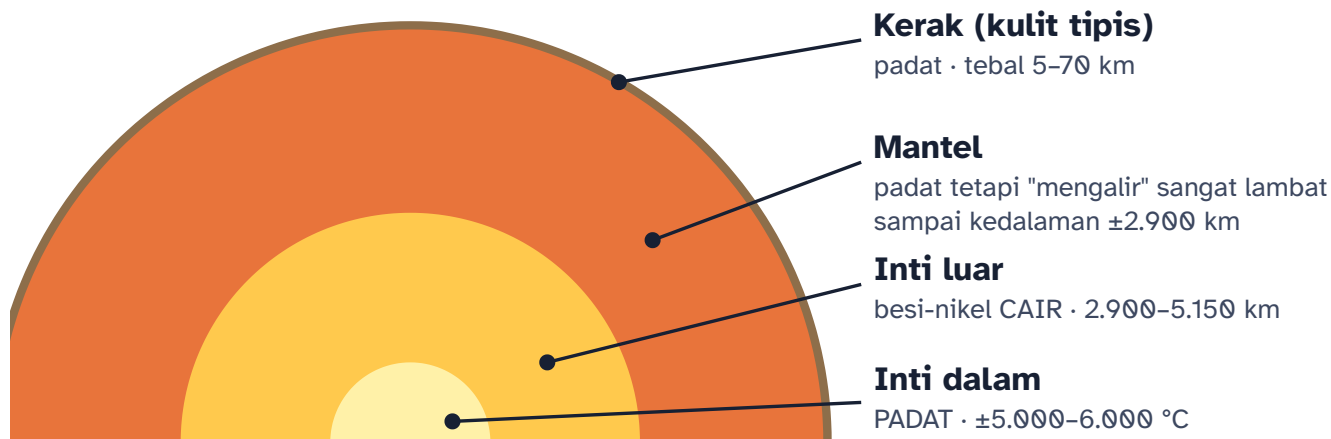
33.1 Lapisan bumi dan lempeng tektonik

Bumi berbentuk hampir bulat dengan jari-jari sekitar **6.371 km**. Kita tidak bisa mengebor sampai ke pusatnya: lubang bor terdalam di dunia "hanya" sekitar 12 km. Lalu bagaimana ilmuwan tahu isinya? Dengan "mendengarkan" gelombang gempa yang merambat menembus Bumi, seperti dokter yang memeriksa tubuh dengan USG.

Bayangkan **telur rebus** yang cangkangnya retak-retak. Cangkangnya yang tipis adalah **kerak**, putih telurnya adalah **mantel**, dan kuning telurnya adalah **inti**.

Bahasa sederhana • Bumi berlapis-lapis seperti telur. Kita tinggal di kulitnya yang tipis (kerak). Di bawahnya ada batuan panas (mantel), dan di tengahnya ada inti besi yang sangat panas. Kulit Bumi terpecah menjadi potongan-potongan besar yang bergerak pelan sekali. Saat potongan itu bergesekan, terjadilah gempa.

jari-jari ± 6.371 km (skala sebenarnya)



Penampang Bumi dengan perbandingan tebal lapisan yang sebenarnya. Kerak hanya garis tipis! Inti dalam tetap padat walau sangat panas karena tekanannya luar biasa besar.

Lempeng-lempeng yang menggapung

Kerak dan bagian atas mantel yang kaku membentuk **litosfer**, yang terpecah menjadi belasan potongan raksasa: **lempeng tektonik**. Lempeng-lempeng ini "mengapung" di atas lapisan mantel yang lebih lunak dan bergerak sangat pelan, hanya beberapa sentimeter per tahun, kira-kira secepat kuku jarimu tumbuh. Pelan, tetapi bertenaga luar biasa.

Batas lempeng	Gerakan	Akibat	Contoh
Konvergen (menunjam)	saling mendekat; lempeng samudra yang lebih rapat menyusup ke bawah	gempa besar, tsunami, deretan gunung api	barat Sumatra, selatan Jawa sampai Nusa Tenggara
Divergen	saling menjauh; magma naik mengisi celah	lantai samudra baru, gunung api bawah laut	punggungan tengah Samudra Atlantik
Transform (sesar geser)	bergesekan menyamping	gempa dangkal yang merusak	sesar Palu-Koro (Sulawesi), sesar besar Sumatra



FISIKA INDONESIA

Indonesia berada di pertemuan tiga lempeng besar: **Eurasia**, **Indo-Australia**, dan **Pasifik** (ditambah lempeng Laut Filipina). Lempeng Indo-Australia bergerak ke utara sekitar 5–7 cm per tahun dan menunjam di bawah Sumatra dan Jawa. Akibatnya, Indonesia termasuk **Cincin Api Pasifik** dengan sekitar **127 gunung api aktif** dan ribuan gempa setiap tahun, kebanyakan kecil. Hidup di negeri seperti ini berarti kita perlu paham fisiknya, bukan takut.



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1912, ahli meteorologi Jerman **Alfred Wegener** memperhatikan pantai Amerika Selatan dan Afrika yang cocok seperti potongan puzzle. Ia menduga semua benua dulu menyatu, lalu "berlayar" saling menjauh. Banyak ilmuwan menertawakannya karena ia tidak bisa menjelaskan tenaga penggerakannya. Baru pada 1960-an, peta dasar laut dan data magnet batuan membuktikan bahwa lantai samudra memang terus melebar. Gagasan Wegener berkembang menjadi teori **tektonik lempeng**.

33.2

Gempa bumi: gelombang P, S, dan permukaan

Dua lempeng tidak bergeser dengan mulus. Bidang sentuhnya "macet" karena gesekan, sementara lempengnya terus mendorong. Batuan pun melentur dan menyimpan energi, seperti **penggaris plastik yang ditekek** perlahan. Ketika gesekannya tidak kuat lagi menahan, batuan tiba-tiba tergelincir dan melenting. Energi yang tersimpan bertahun-tahun dilepas dalam beberapa detik sebagai **gelombang seismik**.



AWAS JEBAKAN: HIPOSENTER VS EPISENTER

Titik di dalam Bumi tempat batuan mulai patah disebut **hiposenter** (fokus). Titik di permukaan tepat di atasnya disebut **episenter**. Berita "gempa berpusat 20 km barat daya kota X dengan kedalaman 10 km" menyebut letak episenter dan kedalaman hiposenter. Gempa **dangkal** di dekat permukaan umumnya lebih merusak daripada gempa dalam yang bermagnitudo sama.

Gelombang P (primer)

dorong-tarik, searah rambatan
 $\pm 6 \text{ km/s}$ · lewat padat, cair, gas



arah rambat
→

Gelombang S (sekunder)

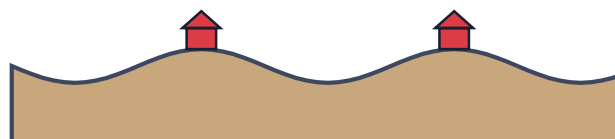
goyang tegak lurus rambatan
 $\pm 3,5 \text{ km/s}$ · hanya lewat padat



→

Gelombang permukaan

berguling di permukaan, paling lambat
amplitudo terbesar, paling merusak



Gelombang P menekan dan meregangkan batuan seperti slinky didorong. Gelombang S menggoyang batuan ke samping seperti tali dikibaskan. Gelombang permukaan datang paling akhir dengan guncangan terbesar.

Gelombang	Jenis	Kecepatan di kerak ($\pm$)	Merambat lewat	Yang kamu rasakan
P (primer)	longitudinal	5–7 km/s	padat, cair, gas	hentakan pertama, sering terdengar seperti dentuman
S (sekunder)	transversal	3–4 km/s	hanya padat	guncangan kuat menyamping
Permukaan (Love, Rayleigh)	gabungan	sedikit lebih lambat dari S	dekat permukaan	tanah bergelombang, paling merusak



TANAH YANG BERUBAH SEPERTI BUBUR

Pada gempa Palu 2018, beberapa kawasan seperti Petobo dan Balaroa mengalami **likuifaksi**. Tanah pasir yang jenuh air diguncang kuat sehingga tekanan air di sela butirannya naik. Butiran pasir tidak lagi saling menekan, gesekannya hilang, dan tanah berperilaku seperti cairan. Kamu bisa merasakan versi mininya saat menginjak-injak pasir basah di tepi pantai: lama-lama kakimu terbenam. Kini peta zona rawan likuifaksi dipakai untuk menata ulang permukiman.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

BAYANGAN GELOMBANG S: BUKTI INTI LUAR CAIR

Stasiun seismik di sisi Bumi yang jauh dari gempa (lebih dari sekitar 104° busur dari episenter) tidak menerima gelombang S langsung. Gelombang S tidak bisa merambat lewat zat cair karena zat cair tidak punya kekakuan geser: modulus gesernya nol, sehingga $v_S = \sqrt{\mu/\rho} = 0$. Bayangan S yang sangat lebar ini membuktikan bahwa inti luar Bumi **cair**. Gelombang P bisa lewat, tetapi dibiaskan sehingga juga meninggalkan zona bayangan antara $\pm 104^\circ$ dan $\pm 140^\circ$.



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1936, ahli seismologi Denmark **Inge Lehmann** memperhatikan gelombang P lemah yang muncul di dalam zona bayangan, padahal "seharusnya" tidak ada. Ia menyimpulkan bahwa di dalam inti cair ada inti lain yang padat, yang memantulkan gelombang itu. Penemuan **inti dalam** ini dibuat hanya dengan membaca coretan seismogram di atas kertas, tanpa komputer modern.

33.3 Menentukan lokasi gempa dari selisih waktu S–P

Gelombang P dan S berangkat dari hiposenter pada saat yang sama, tetapi P lebih cepat. Seperti dua pelari yang start bersamaan: makin panjang lintasannya, makin jauh jarak antara keduanya di garis finis. Jadi **jeda antara kedatangan P dan S** memberi tahu seberapa jauh pusat gempa.

Jika jaraknya d , waktu tiba P adalah $t_P = d/v_P$ dan waktu tiba S adalah $t_S = d/v_S$. Selisihnya:

$$\Delta t = t_S - t_P = d \left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P} \right) \implies d = \Delta t \frac{v_P v_S}{v_P - v_S}$$

RUMUS HIDUP Jarak pusat gempa dari jeda S-P

$$d = \Delta t \frac{v_P v_S}{v_P - v_S}$$

Makin lama jeda antara getaran kecil (P) dan guncangan besar (S), makin jauh pusat gempanya.

Δt Jeda S-P s

v_P Kecepatan gelombang P km/s

v_S Kecepatan gelombang S km/s

d Jarak ke hiposenter km

JARAK KE HIPOSENTER

100,8

km

Jeda S-P **12** s, dengan $v_P = 6$ km/s dan $v_S = 3,5$ km/s → pusat gempa sekitar **100,8** km dari stasiun.

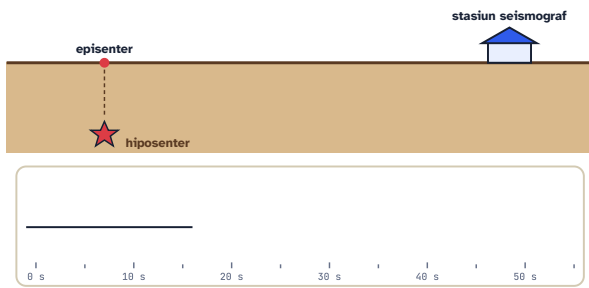
$$\text{Cek satuan: } s \times \frac{(\text{km/s})^2}{\text{km/s}} = \text{km}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-JARAK-EPISENTER

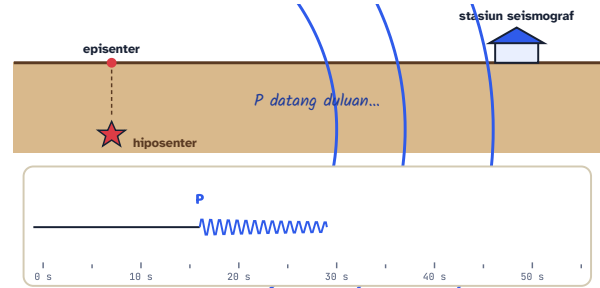


TRIK KAK NARA: KALI DELAPAN

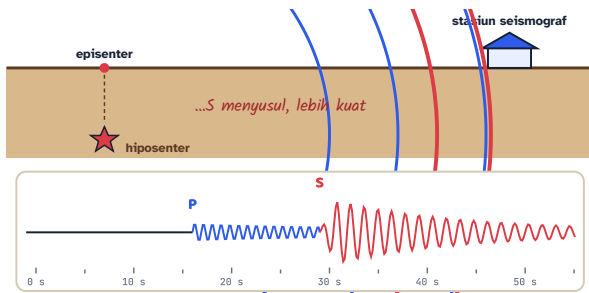
Untuk kecepatan khas kerak bumi ($v_P \approx 6$ km/s, $v_S \approx 3,5$ km/s), faktor $\frac{v_P v_S}{v_P - v_S} \approx 8,4$ km/s. Jadi: **jarak (km) $\approx 8 \times$ jeda S-P (detik)**. Kalau kamu merasakan hentakan kecil lalu guncangan besar 5 detik kemudian, pusat gempa sekitar 40 km darimu.



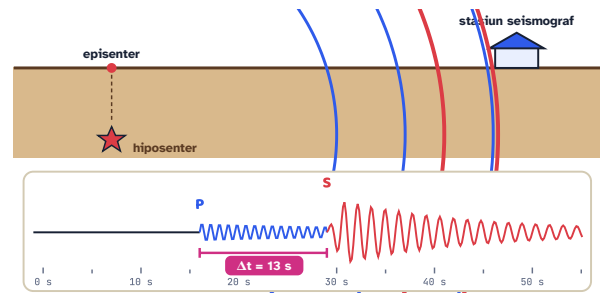
Langkah 1. Batuan patah di **hiposenter**, sekitar 20 km di bawah tanah. Sebuah stasiun seismograf BMKG menunggu di permukaan.



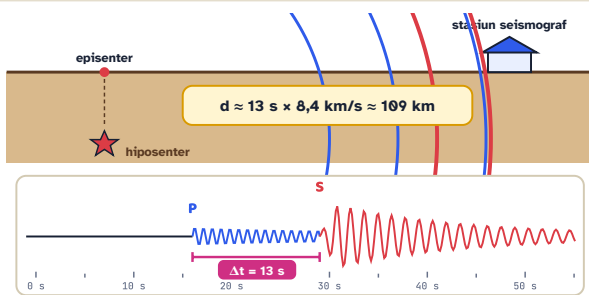
Langkah 2. Gelombang **P** yang cepat tiba lebih dulu. Seismograf mencatat getaran kecil.



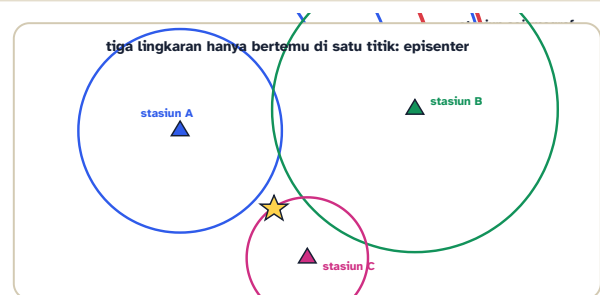
Langkah 3. Beberapa detik kemudian gelombang **S** tiba. Simpangannya jauh lebih besar.



Langkah 4. Ukur jeda pada skala waktu: dari P sampai S kira-kira **13 detik**.

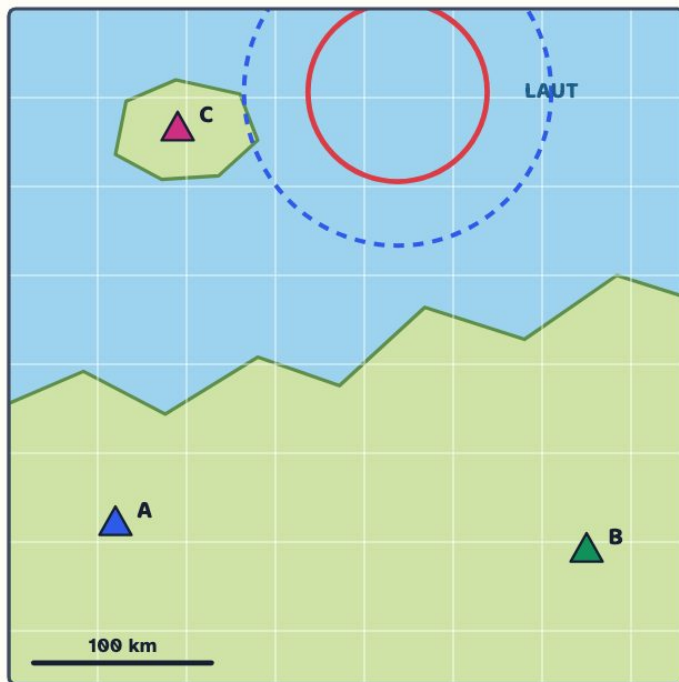


Langkah 5. Hitung jarak: $d \approx 13 \times 8,4 \approx 109$ km. Tetapi satu stasiun hanya tahu **jaraknya**, bukan arahnya. Pusat gempa bisa di mana saja pada lingkaran berjari-jari 109 km.



Langkah 6. Dengan **tiga** stasiun, kita punya tiga lingkaran. Hanya satu titik yang dilewati ketiganya: itulah episenter. Cara ini disebut triangulasi (tepatnya trilaterasi, karena memakai jarak).

LAB MINI
Detektif gempa: temukan episenter dari tiga stasiun

 LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-33


Stasiun A



Stasiun B



Stasiun C


 $t = 14 \text{ s setelah gempa} \cdot v_P = 6,0 \text{ km/s} \cdot v_S = 3,5 \text{ km/s}$

Jeda S–P stasiun A

—

Jeda S–P stasiun B

—

Jeda S–P stasiun C

—

Tebakanmu meleset

ketuk peta

Tekan ► **Jalankan** untuk memicu gempa di lokasi rahasia. Baca jeda S–P di setiap seismogram (garis tiap 10 s), hitung jaraknya, lalu **ketuk peta** untuk menebak episenter. Nyalakan "lingkaran jarak" bila butuh bantuan, lalu tekan 🔍 **Ungkap episenter**.

CONTOH
Hentakan lalu guncangan

Seismograf di Padang mencatat gelombang P, lalu 12 detik kemudian gelombang S. Dengan $v_P = 6,0 \text{ km/s}$ dan $v_S = 3,5 \text{ km/s}$, berapa jarak stasiun ke pusat gempa?

1 Faktor kecepatan: $\frac{v_P v_S}{v_P - v_S} = \frac{6,0 \times 3,5}{2,5} = 8,4 \text{ km/s}$.

2 $d = 12 \times 8,4 = 100,8 \text{ km}$.

Sekitar 100 km. Dengan trik "kali delapan": $12 \times 8 = 96 \text{ km}$, cukup dekat untuk perkiraan cepat.

33.4 Magnitudo: skala logaritmik yang menipu mata

Kekuatan gempa dinyatakan dengan **magnitudo** (M). Skalanya **logaritmik**: naik 1 angka berarti simpangan pada seismogram 10 kali lebih besar, dan energi yang dilepas sekitar $10^{1,5} \approx 32$ kali lebih besar. Jadi gempa M 7

bukan "sedikit lebih kuat" dari M 6. Ia melepas energi ± 32 kali lipat, dan ± 1.000 kali lipat gempa M 5!



TAMU DARI MASA LALU

Pada 1935, seismolog Amerika **Charles Richter** dan rekannya Beno Gutenberg membuat skala magnitudo untuk gempa di California. Karena kekuatan gempa berbeda jutaan kali lipat, mereka memakai logaritma supaya angkanya mudah ditulis. Skala Richter asli kurang tepat untuk gempa sangat besar, sehingga kini dipakai **magnitudo momen** (M_w) yang dihitung dari luas bidang patahan dan besar pergeserannya.

RUMUS HIDUP

Perbandingan energi dua gempa

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{1,5(M_2 - M_1)}$$

Naik satu magnitudo, energinya sekitar 32 kali lipat. Naik dua magnitudo, seribu kali!

M_1 Magnitudo gempa kecil

M_2 Magnitudo gempa besar

E_2/E_1 Perbandingan energi kali

PERBANDINGAN ENERGI

1.000
kali

Gempa M 7 melepas energi sekitar **1.000** kali gempa M 5. Artinya dibutuhkan **1.000** gempa M 5 untuk menyamai satu gempa M 7!

Cek satuan: Perbandingan tidak bersatuan. Simpangan di seismogram naik 10 kali per magnitudo, energinya naik $10^{1,5} \approx 31,6$ kali.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ENERGI-GEMPA

Magnitudo	Energi dibanding M 5	Gambaran umum
M 2-3	$\pm 1/32.000 - 1/1.000$	terjadi setiap hari, biasanya tidak terasa
M 4-5	$\pm 1/32 - 1$	terasa, barang bergoyang, kerusakan ringan

M 6	± 32 kali	bisa sangat merusak bila dangkal dan dekat permukiman (Yogyakarta 2006, M 6,3)
M 7	± 1.000 kali	gempa besar (Palu 2018, M 7,5)
M 8–9	± 32.000 – $1.000.000$ kali	gempa raksasa di zona subduksi (Aceh 2004, M 9,1)



AWAS JEBAKAN: MAGNITUDO $\neq$ INTENSITAS

Magnitudo adalah satu angka untuk satu gempa: seberapa besar energi di sumbernya. **Intensitas** (skala MMI, I–XII) menyatakan seberapa kuat guncangan *di tempatmu*, dan berbeda-beda di setiap kota. Gempa Cianjur 2022 "hanya" bermagnitudo 5,6, tetapi sangat dangkal dan dekat permukiman sehingga intensitasnya tinggi dan kerusakannya parah. Kedalaman, jarak, jenis tanah, dan kualitas bangunan sama pentingnya dengan magnitudo.

COBA SENDIRI Raksasa melawan si besar

Gempa A bermagnitudo 9,1 dan gempa B bermagnitudo 7,5. Berapa kali energi gempa A dibanding gempa B? Berapa kali simpangan seismogramnya (pada jarak yang sama)?

1 Selisih magnitudo: $\Delta M = 9,1 - 7,5 = 1,6$.

2 Energi: $10^{1,5 \times 1,6} = 10^{2,4} \approx 251$ kali.

3 Simpangan: $10^{1,6} \approx 40$ kali.

Energi A sekitar 250 kali energi B, walaupun angkanya "cuma" berbeda 1,6. Inilah kekuatan (dan jebakan) skala logaritmik.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

DARI MAGNITUDO KE JOULE

Hubungan empiris Gutenberg-Richter: $\log_{10} E \approx 1,5M + 4,8$, dengan E dalam joule. Untuk M 9,1: $E \approx 10^{18,45} \approx 2,8 \times 10^{18}$ J, kira-kira energi listrik yang dipakai seluruh Indonesia selama beberapa tahun. Magnitudo momen dihitung dari momen seismik $M_0 = \mu AD$ (kekakuan geser $\times$ luas patahan $\times$ pergeseran): $M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 6,07$, dengan M_0 dalam N·m. Patahan gempa Aceh 2004 panjangnya sekitar 1.300 km!

MITOS

"Ilmuwan bisa meramal tanggal dan jam gempa besar berikutnya."

MITOS

"Banyak gempa kecil bagus, karena energinya terbangun sedikit-sedikit sehingga gempa besar batal."

FAKTA

Belum ada yang bisa. Ilmuwan dapat memetakan zona rawan dan **peluang** gempa dalam puluhan tahun, tetapi tidak tanggal dan jamnya. Waspada! pesan berantai "ramalan gempa"; percayai informasi resmi BMKG.

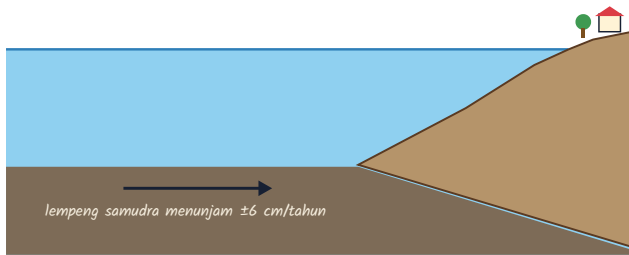
FAKTA

Untuk menyamai energi satu gempa M 7, dibutuhkan sekitar **1.000 gempa M 5** atau 32.000 gempa M 4. Gempa kecil hampir tidak "mengurangi tabungan" energi patahan.

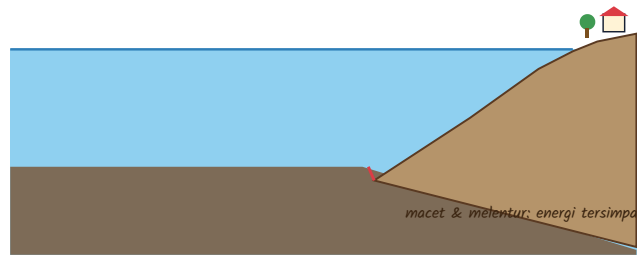
33.5 Tsunami: gelombang yang mengangut seluruh laut

Ombak biasa di pantai dibuat angin dan hanya menggerakkan lapisan air di dekat permukaan. **Tsunami** berbeda. Ketika gempa di bawah laut mengangkat atau menurunkan dasar laut beberapa meter, **seluruh kolom air** dari dasar sampai permukaan ikut terangkat. Tsunami juga bisa dipicu longsoran bawah laut atau letusan gunung api. Panjang gelombangnya bisa ratusan kilometer, dan jeda antarpuncaknya belasan sampai puluhan menit.

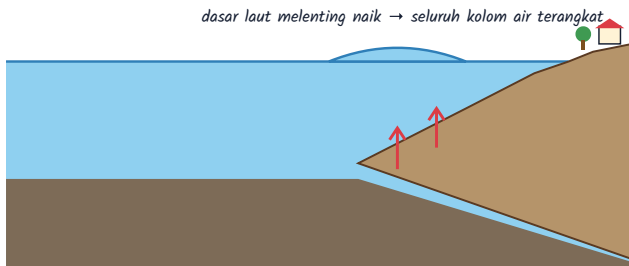
Bahasa sederhana • Tsunami adalah gelombang laut raksasa yang muncul ketika dasar laut tiba-tiba bergerak. Di laut dalam, tsunami melaju sangat cepat tetapi rendah. Di dekat pantai, ia melambat dan menjadi tinggi. Jika merasakan gempa kuat di pantai, segera pergi ke tempat yang tinggi.



Langkah 1. Lempeng samudra terus menyusup ke bawah lempeng benua, sekitar 6 cm per tahun.



Langkah 2. Bidang sentuhnya macet. Ujung lempeng benua ikut terseret ke bawah dan melentur, menyimpan energi selama puluhan sampai ratusan tahun.



Langkah 3. Batuan patah dan ujung lempeng **melenting naik** beberapa meter. Air di atasnya, dari dasar sampai permukaan, ikut terangkat.



Langkah 4. Gundukan air jatuh lagi dan menyebar ke dua arah sebagai tsunami. Di laut dalam tingginya mungkin hanya sekitar satu meter, tetapi sangat cepat.



Langkah 5. Mendekati pantai, gelombang melambat, memendek, dan meninggi. Sering kali air pantai **surut** dulu sebelum gelombang datang. Itu tanda untuk segera lari ke tempat tinggi.

Mengapa $v = \sqrt{gh}$?

Gelombang air disebut "gelombang air dangkal" jika panjang gelombangnya jauh lebih besar daripada kedalaman laut (kira-kira lebih dari 20 kali). Tsunami dengan panjang gelombang 200 km di laut sedalam 4 km memenuhi syarat itu. Bagi tsunami, samudra terdalam pun hanyalah "genangan dangkal"! Untuk gelombang seperti ini, cepat rambatnya hanya bergantung pada percepatan gravitasi dan kedalaman.

$$v = \sqrt{gh}$$

Makin dalam lautnya, makin ngebut tsunaminya. Di laut dangkal ia melambat, tetapi meninggi.

 h

Kedalaman laut m

 v

Cepat rambat m/s

CEPAT RAMBAT

198

m/s

Di laut sedalam **4.000 m**, tsunami melaju sekitar **198 m/s**. Kalikan dengan 3,6 untuk mendapatkan km/jam.

Satuan Nusantara: $\approx 58\%$ dari bunyi di udara $\cdot \approx 2 \times$ kereta cepat Whoosh (350 km/jam) $\cdot \approx 18 \times$ ojek di jalan kota (± 40 km/jam)

$$\text{Cek satuan: } \sqrt{\text{m/s}^2 \cdot \text{m}} = \sqrt{\text{m}^2/\text{s}^2} = \text{m/s}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-TSUNAMI](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-tsunami)

Kedalaman	Kecepatan	Setara dengan
7.000 m	262 m/s $\approx$ 940 km/jam	pesawat jet
4.000 m	198 m/s $\approx$ 710 km/jam	pesawat jet yang sedikit lebih pelan
1.000 m	99 m/s $\approx$ 360 km/jam	kereta cepat Whoosh (± 350 km/jam)
200 m	44 m/s $\approx$ 160 km/jam	mobil balap
50 m	22 m/s $\approx$ 80 km/jam	mobil di jalan tol
10 m	9,9 m/s $\approx$ 36 km/jam	sepeda motor, jauh lebih cepat dari larimu



Tebak Dulu!

Sebuah kapal nelayan sedang berada di tengah laut dalam ketika tsunami melintas di bawahnya. Apa yang dirasakan para nelayan?

Dinding air setinggi puluhan meter menghantam kapal.

Hampir tidak terasa: kapal hanya naik-turun pelan sekitar satu meter selama beberapa menit.

Kapal tersedot ke pusaran raksasa.

Air laut di sekitar kapal mendidih karena panas gempa.

Hampir tidak terasa! Di laut dalam, tinggi tsunami mungkin hanya sekitar satu meter, dan panjang gelombangnya ratusan kilometer. Kapal naik setinggi satu meter selama belasan menit, terlalu landai untuk dirasakan. Karena itu, bila peringatan tsunami berbunyi, kapal yang sudah di laut dalam lebih aman tetap di sana daripada kembali ke pelabuhan. Bahaya terbesar ada di perairan dangkal dekat pantai.

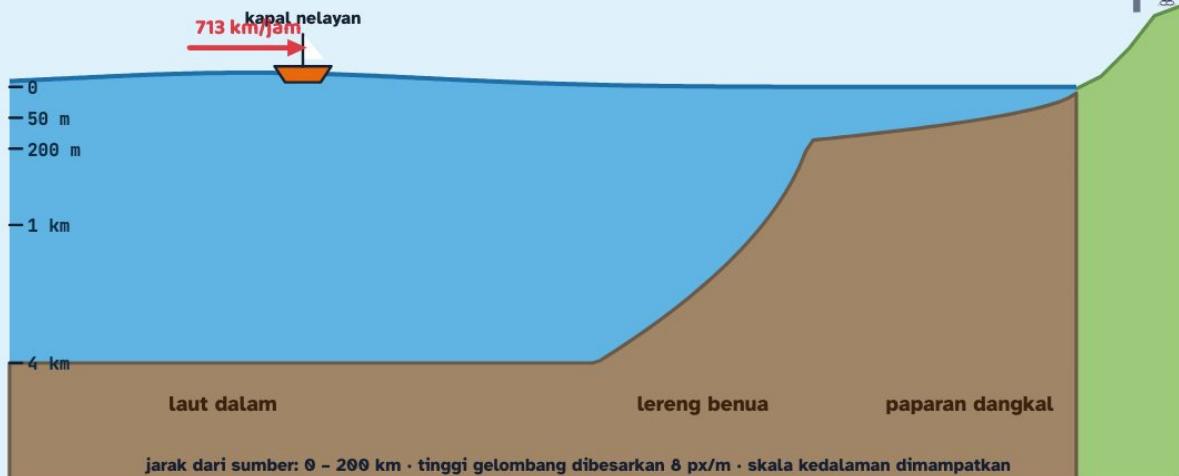
Mengapa tsunami meninggi di dekat pantai?

Bayangkan antrean motor yang mendekati gerbang tol. Motor terdepan melambat lebih dulu, sementara yang di belakang masih melaju kencang, sehingga antrean **memadat**. Hal yang sama terjadi pada tsunami: bagian depannya sudah di air dangkal dan melambat, sementara bagian belakangnya masih di air dalam dan melaju. Gelombang memendek, dan energinya yang hampir tidak berkurang tertumpuk dalam volume air yang lebih kecil. Akibatnya gelombang **meninggi**.

LAB MINI
Perjalanan tsunami: dari laut dalam ke pantai

 LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-33

🕒 3,6 menit sejak gempa
 $v = \sqrt{(g \cdot 4.000 \text{ m})} = 198 \text{ m/s}$



Jarak ke pantai

155,2 km

Kedalaman laut

4.000 m

Kecepatan

198 m/s = 713 km/jam

Tinggi gelombang

1 m

Waktu sejak gempa

3,6 menit

Perkiraan tiba di pantai

52 menit

Tekan ► **Jalankan** dan ikuti gelombangnya. Perhatikan kecepatan dan tingginya saat melewati landas benua. Coba ubah kedalaman laut dalam: apa yang terjadi pada waktu tiba? Nyalakan "air surut dulu" untuk melihat tanda alam yang sering mendahului tsunami.

KERJAKAN BERSAMA
Berapa menit waktu emas?

Sumber tsunami berada 150 km dari pantai. Anggap 120 km pertama lautnya sedalam 4.000 m dan 30 km terakhir rata-rata sedalam 100 m. Berapa menit tsunami tiba di pantai? ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

1 Bagian dalam: $v_1 = \sqrt{9,8 \times 4000} = 198 \text{ m/s}$, sehingga $t_1 = 120\,000/198 \approx 606 \text{ s}$.

2 Bagian dangkal: $v_2 = \sqrt{9,8 \times 100} = 31,3 \text{ m/s}$, sehingga $t_2 = 30\,000/31,3 \approx 958 \text{ s}$.

3 Total: $606 + 958 \approx 1564 \text{ s} \approx 26 \text{ menit}$.

Sekitar 26 menit, dan 30 km terakhir yang dangkal justru memakan waktu lebih lama! Tetapi jangan menunggu: jika sumbernya dekat (seperti di Teluk Palu 2018), tsunami bisa tiba dalam hitungan menit saja.



AWAS JEBAKAN YANG MENYELAMATKAN NYAWA

Air laut surut tiba-tiba bukan saatnya memungut ikan atau merekam video: itu tanda tsunami mungkin datang dalam beberapa menit. Tetapi tsunami **tidak selalu** didahului surut, jadi jangan menunggu tanda itu. Tsunami juga datang dalam **beberapa gelombang**, dan gelombang pertama belum tentu yang terbesar. Tetaplah di tempat tinggi sampai ada pernyataan aman dari pihak berwenang.



FISIKA INDONESIA

Pada 26 Desember 2004, gempa M 9,1 di barat Aceh memicu tsunami yang merenggut lebih dari 220.000 jiwa di negara-negara sekitar Samudra Hindia, sebagian besar di Aceh. Kita mengenang mereka dengan belajar. Di **Pulau Simeulue**, sangat dekat dengan pusat gempa, korban jiwanya jauh lebih sedikit. Warganya mewarisi kearifan lokal **smong** dari tsunami tahun 1907: "jika gempa kuat dan air laut surut, segera lari ke bukit." Kisah turun-temurun itu adalah sistem peringatan dini yang sangat efektif. Pada 2018, tsunami juga melanda Teluk Palu (setelah gempa M 7,5) dan pesisir Selat Sunda (dipicu longsoran Anak Krakatau, tanpa gempa besar). Peristiwa ini mengingatkan bahwa tsunami bisa datang sangat cepat atau dari sumber yang tidak terduga.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

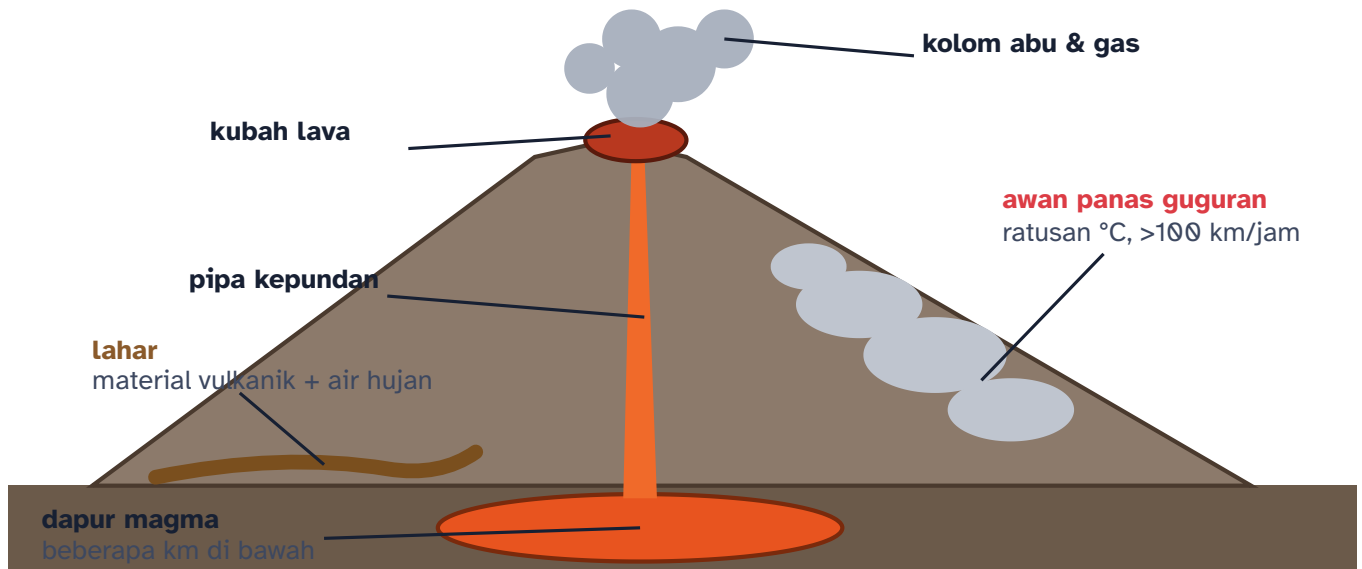
HUKUM GREEN

Jika energi gelombang hampir tidak hilang, laju aliran energinya tetap: energi per satuan luas $\propto A^2$ dikali kecepatan v harus konstan, sehingga $A^2 \sqrt{h} = \text{tetap}$, atau $A \propto h^{-1/4}$. Dari 4.000 m ke 10 m, tinggi gelombang naik $(400)^{1/4} \approx 4,5$ kali. Panjang gelombang memendek sebanding v , yaitu $\propto \sqrt{h}$. Di dekat garis pantai, rumus ini tidak berlaku lagi: gelombang pecah dan tinggi naiknya ke darat (*run-up*) sangat dipengaruhi bentuk teluk dan dasar laut.

33.6 Gunung api: tekanan magma dan awan panas

Di zona subduksi, lempeng samudra yang menunjam membawa air ke kedalaman. Air itu menurunkan titik lebur batuan di atasnya sehingga terbentuk **magma**, batuan cair yang lebih ringan dari batuan sekitarnya. Magma naik dan berkumpul di **dapur magma** beberapa kilometer di bawah gunung. Itulah sebabnya deretan gunung api Indonesia sejajar dengan zona subduksi, dari Sumatra, Jawa, sampai Nusa Tenggara.

Magma mengandung gas terlarut, terutama uap air dan karbon dioksida, seperti **soda dalam botol tertutup**. Saat magma naik, tekanannya turun dan gas membentuk gelembung yang mengembang cepat. Kocok botol soda lalu buka tutupnya: *psssh!* Magma yang **kental** (seperti di Merapi) menahan gelembung gas sehingga tekanannya menumpuk dan letusannya cenderung eksplosif. Magma yang **encer** membiarkan gas lolos sehingga lavanya cenderung mengalir.



Penampang gunung api tipe Merapi. Kubah lava yang tumbuh di puncak bisa runtuh dan melahirkan awan panas yang meluncur di lembah.

Bahaya khas Merapi adalah **awan panas guguran**, yang oleh warga sekitar dijuluki *wedhus gembel* ("domba gembal") karena bentuknya bergulung-gulung. Ini adalah campuran gas panas, abu, dan batuan yang **lebih rapat dari udara**, sehingga meluncur menuruni lereng mengikuti lembah seperti air terjun raksasa. Suhunya ratusan derajat Celsius dan kecepatannya bisa lebih dari 100 km/jam. Tidak ada yang bisa berlari mendahuluinya, jadi satu-satunya cara selamat adalah **mengungsi sebelum terjadi**, sesuai status gunung api.

Status (PVMBG)	Arti	Yang dilakukan warga
Level I • Normal	aktivitas dasar	beraktivitas biasa, tetap mengikuti informasi
Level II • Waspada	ada peningkatan aktivitas	tidak mendekati kawah sesuai radius yang ditetapkan
Level III • Siaga	menuju letusan	bersiap mengungsi; kawasan rawan dikosongkan sesuai arahan
Level IV • Awas	letusan sedang atau segera terjadi	mengungsi dari zona bahaya, mengikuti petugas



TAMU DARI MASA LALU

Letusan **Tambora** (Sumbawa, 1815) adalah letusan terbesar dalam sejarah tercatat. Abunya menyelimuti langit hingga tahun 1816 dikenal di Eropa dan Amerika sebagai "tahun tanpa musim panas". Pada 26–27 Agustus 1883, **Krakatau** di Selat Sunda meletus dahsyat. Dentumannya terdengar hingga sekitar 4.800 km jauhnya, di Pulau Rodrigues dekat Mauritius, dan dianggap bunyi terkeras dalam sejarah tercatat. Gelombang tekanan udaranya terekam barometer di seluruh dunia beberapa kali mengelilingi Bumi. Tsunami yang menyusul merenggut sekitar 36.000 jiwa di pesisir Banten dan Lampung.

KERJAKAN BERSAMA

Tekanan di dapur magma

Dapur magma berada 5 km di bawah permukaan. Massa jenis batuan di atasnya rata-rata 2.700 kg/m^3 . Berapa tekanan batuan pada atap dapur magma, dan berapa kali tekanan udara ($1 \text{ atm} \approx 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$)? ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

1 Gunakan tekanan hidrostatik (Bab 13): $P = \rho gh = 2700 \times 9,8 \times 5000$.

2 $P \approx 1,3 \times 10^8 \text{ Pa}$.

3 Dibanding tekanan udara: $1,3 \times 10^8 / 1,0 \times 10^5 \approx 1.300 \text{ atm}$.

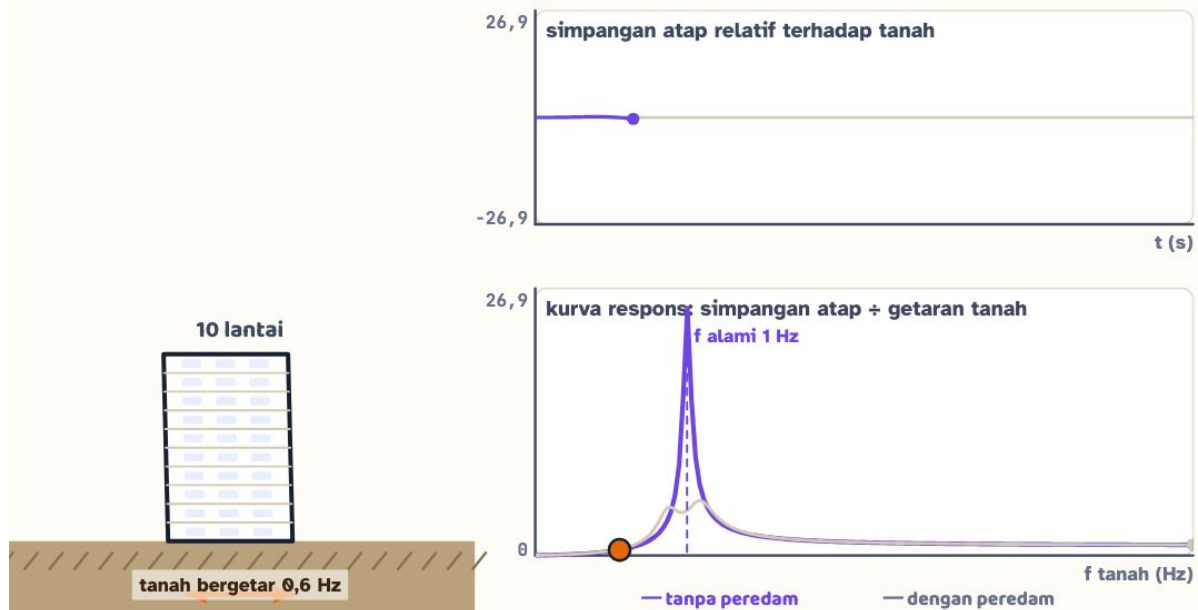
Sekitar 1.300 kali tekanan udara. Pada tekanan sebesar ini, gas tetap larut dalam magma. Saat magma naik dan tekanannya turun, gas "keluar" dan mendorong letusan.

33.7 Mitigasi: bangunan tahan gempa, peringatan dini, dan siap siaga

Gempa jarang membunuh secara langsung. Yang membahayakan adalah **bangunan yang runtuh**, tsunami, dan longsor. Karena itu, mitigasi berarti dua hal: membuat bangunan dan lingkungan lebih kuat, serta membuat kita tahu apa yang harus dilakukan.

Gedung bergoyang dan resonansi

Setiap gedung punya **frekuensi alami**, seperti ayunan di taman (ingat Bab 12). Perkiraan kasar untuk gedung bertingkat: periode alaminya $T \approx 0,1 N$ detik, dengan N jumlah lantai. Gedung 10 lantai bergoyang bolak-balik sekitar sekali per detik. Jika tanah bergetar dengan frekuensi yang sama, terjadilah **resonansi**: setiap dorongan datang tepat waktu dan simpangan gedung terus membesar, seperti ayunan yang didorong pada saat yang pas.



Frekuensi alami gedung
1 Hz ($T = 1$ s)

f tanah / f gedung
0,6

Simpangan atap (relatif)
0,4 × getaran tanah

Status

☒ **relatif aman**

Tekan ► **Jalankan**. Atur jumlah lantai dan frekuensi getaran tanah. Cari frekuensi yang membuat atap bergoyang paling hebat. Lalu pasang **peredam massa** di atap (bandul penyerap getaran) dan bandingkan kurva responsnya.

KERJAKAN BERSAMA

Gedung mana yang paling bahaya?

Tanah lunak di sebuah kota cenderung bergetar dengan periode sekitar 0,8 s saat gempa. Gedung mana yang paling berisiko beresonansi: 3 lantai, 8 lantai, atau 25 lantai?

1. Pakai $T \approx 0,1N$: 3 lantai $\rightarrow$ 0,3 s; 8 lantai $\rightarrow$ 0,8 s; 25 lantai $\rightarrow$ 2,5 s.
2. Resonansi terjadi jika periode alami gedung mendekati periode getaran tanah (0,8 s).

Gedung 8 lantai. Pada gempa Meksiko 1985, banyak gedung sekitar 6–15 lantai runtuh karena periode alaminya cocok dengan getaran tanah lunak bekas danau di bawah kota itu, sementara gedung yang jauh lebih pendek atau lebih tinggi lebih banyak yang selamat.

Prinsip bangunan tahan gempa yang bisa diterapkan pada rumah:

- **Ringan dan sederhana:** gaya gempa sebanding dengan massa ($F = ma$). Atap ringan lebih aman daripada atap beton berat.
- **Saling terikat:** sloof (balok bawah), kolom, dan balok ring atas dihubungkan dengan besi tulangan sehingga rumah bergerak sebagai satu kesatuan, seperti kardus yang diikat tali.
- **Denah simetris:** bentuk sederhana (persegi) tidak mudah terpuntir.
- **Lentur:** sambungan yang bisa sedikit bergerak meredam energi alih-alih patah.
- **Peredam:** gedung tinggi memakai isolasi dasar (bantalan karet-baja di bawah fondasi) atau **peredam massa** berupa bandul raksasa di puncaknya. Gedung Taipei 101 di Taiwan memakai bola baja sekitar 660 ton.



FISIKA INDONESIA

Leluhur kita sudah lama "berhitung" dengan gempa. Banyak **rumah adat panggung** dari kayu, seperti *omo hada* di Nias, berdiri di atas tiang yang ditumpukan pada batu (umpak) dan disambung dengan pasak, bukan paku. Rumah seperti ini ringan, lentur, dan bisa sedikit bergeser saat diguncang, mirip prinsip isolasi dasar pada gedung modern. Banyak rumah adat Nias tetap berdiri setelah gempa besar Nias 2005.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MENGAPA BANDUL KECIL BISA MENENANGKAN GEDUNG RAKSASA?

Pasang massa kecil m_2 dengan pegas k_2 di atap gedung, lalu setel frekuensinya hampir sama dengan frekuensi gedung: $\sqrt{k_2/m_2} \approx \sqrt{k_1/m_1}$. Saat gempa menggetarkan gedung pada frekuensi resonansinya, bandul bergoyang berlawanan fase dan menarik atap ke arah sebaliknya. Satu puncak resonansi yang sangat tinggi terpecah menjadi dua puncak yang jauh lebih rendah. Den Hartog menurunkan setelan terbaiknya: $f_2/f_1 = 1/(1 + \mu)$ dan rasio redaman $\zeta_2 = \sqrt{3\mu/[8(1 + \mu)^3]}$, dengan $\mu = m_2/m_1$. Simulasi di atas memakai $\mu = 0,05$.

Peringatan dini: berlomba dengan gelombang

Gelombang seismik merambat beberapa kilometer per detik, tsunami ratusan kilometer per jam, sedangkan sinyal listrik dan radio hampir secepat cahaya. Sistem peringatan dini memanfaatkan selisih kecepatan ini.

peringatan alami: gempa kuat/lama, air surut, gemuruh → langsung evakuasi!



cepat hampir secepat cahaya, jauh lebih cepat dari tsunami (± 200 m/s) dan gelombang gempa (± 3 m/s).

Alur InaTEWS (Indonesia Tsunami Early Warning System) yang dioperasikan BMKG sejak 2008. Tanda alam tetap yang paling cepat: jika merasakan gempa kuat di pantai, jangan menunggu sirene.

Langkah selamat: sebelum, saat, dan sesudah

1. **Sebelum:** kenali jalur evakuasi (papan hijau bertanda panah) dan titik kumpul di sekolah dan rumah. Siapkan tas siaga. Sepakati tempat bertemu keluarga.
2. **Saat gempa (di dalam gedung):** merunduk, lindungi kepala dan leher (misalnya di bawah meja yang kokoh), dan berpegangan sampai guncangan berhenti. Jauhi kaca dan lemari tinggi.
3. **Sesudah guncangan:** keluar dengan tenang lewat tangga, **bukan lift**. Waspada gempa susulan dan benda yang bisa jatuh.
4. **Di pantai:** jika gempa terasa kuat atau lama, sulit berdiri, atau air laut surut tiba-tiba, **langsung** menuju tempat tinggi atau ke lantai atas bangunan evakuasi yang kokoh, tanpa menunggu sirene. Berjalan kaki atau bersepeda; mobil mudah terjebak macet.
5. **Tetap di tempat aman** sampai ada pernyataan resmi bahwa ancaman berakhir, karena tsunami datang dalam beberapa gelombang.



TRIK KAK NARA: PATOKAN 20-20-20

Di banyak kegiatan kesiapsiagaan di pesisir Indonesia, dikenal patokan mudah diingat: jika gempa terasa sekitar **20 detik** atau lebih, anggap tsunami bisa datang dalam sekitar **20 menit** (bahkan bisa lebih cepat), maka segera menuju tempat setinggi sekitar **20 meter**. Patokan ini bukan rumus fisika yang pasti, tetapi membantu kita bertindak cepat tanpa ragu.

Kemas tas siaga bencanamu

Tas siaga berisi kebutuhan untuk bertahan sekitar tiga hari, cukup ringan untuk dibawa berlari, dan disimpan di dekat pintu. Ketuk barang untuk memasukkannya ke tas, lalu periksa hasilnya. Ingat fisika: setiap kilogram berarti sekitar 10 N beban di punggungmu!

PERMAINAN



Kemas tas siagaku

Berat: 0 kg $\approx$ 0 N

Batas nyaman ± 8 kg (garis). Ketuk sekali untuk memasukkan, ketuk lagi untuk mengeluarkan.



Air minum 2 botol

2 kg



Makanan tahan lama

0,6 kg



Obat pribadi & P3K

0,3 kg



Senter + baterai cadangan

0,3 kg



Fotokopi dokumen (dalam plastik)

0,2 kg



Radio kecil bertenaga baterai

0,4 kg



Power bank terisi penuh

0,3 kg



Peluit

0,02 kg



Masker

0,05 kg



Pakaian ganti & jas hujan

1 kg



Uang tunai secukupnya

0,05 kg



Sabun, sikat gigi, pembalut

0,4 kg



Konsol gim + kabelnya

2,5 kg



Setumpuk buku tebal

4 kg



Panci dan wajan besi

2,5 kg

☒ **Periksa tasku**

☐ **Kosongkan**

MITOS

"Saat lantai bergoyang, cara teraman adalah berlari secepatnya keluar gedung."

MITOS

"Tsunami hanya satu gelombang. Setelah air surut kembali, kita bisa turun ke pantai."

FAKTA

Banyak orang terluka karena jatuh atau tertimpa benda saat berlari ketika lantai masih bergoyang.

Anjuran umum:

merunduk, lindungi kepala, berpegangan

, lalu keluar dengan tenang setelah guncangan reda.

FAKTA

Tsunami biasanya datang dalam

beberapa gelombang

dengan jeda belasan menit atau lebih, dan gelombang pertama belum tentu yang terbesar.

Tunggu pernyataan aman resmi.



Seismometer BMKG

Ratusan sensor di seluruh Indonesia mencatat getaran tanah dan mengirimnya secara digital ke pusat BMKG dalam hitungan detik.



Rumah panggung kayu

Ringan dan lentur, sambungan pasaknya meredam energi guncangan. Kearifan lokal yang sejalan dengan fisika.



Gedung evakuasi tsunami

Di Banda Aceh dan kota pesisir lain dibangun gedung tinggi berkerangka kuat untuk evakuasi vertikal bila bukit terlalu jauh.



Pos pengamatan gunung api

Petugas memantau getaran, kemiringan tanah, dan gas belerang untuk menentukan status Normal, Waspada, Siaga, atau Awas.



Tanah subur lereng gunung

Abu vulkanik kaya mineral membuat lereng Merapi dan gunung lain sangat subur untuk sayur dan kopi.



Listrik dari panas bumi

Panas magma yang sama memanaskan air bawah tanah menjadi uap untuk memutar turbin PLTP, misalnya di Kamojang dan Dieng.

Cek Cepat

Gelombang gempa yang tidak dapat merambat melalui zat cair adalah...

gelombang P

gelombang S

gelombang bunyi

gelombang tsunami

Tsunami bergerak dari laut sedalam 4.000 m ke laut sedalam 1.000 m. Kecepatannya menjadi...

4 kali lebih cepat

2 kali lebih cepat

setengah kecepatan semula

seperempat kecepatan semula

Jeda S–P di stasiun A adalah 10 s, sedangkan di stasiun B 25 s. Pernyataan yang benar adalah...

stasiun A lebih dekat ke pusat gempa

stasiun B lebih dekat ke pusat gempa

kedua stasiun sama jauhnya

gempa terasa lebih kuat di stasiun B

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. C • 3. A



Tantangan Rumah: meja getar dan menara sedotan

Bahan: nampan atau papan tipis, 4–6 pensil bulat, sedotan atau stik es krim, selotip, plastisin, benang

1. Letakkan nampan di atas pensil-pensil yang berjajar sehingga nampan bisa digeser maju-mundur seperti tanah yang bergetar.
2. Buat dua menara dari sedotan: satu pendek (2 "lantai") dan satu tinggi (6 "lantai"). Tempelkan di atas nampan dengan plastisin, lalu beri sedikit plastisin di puncak masing-masing.
3. Geser nampan maju-mundur dengan pelan, lalu sedang, lalu cepat. Catat menara mana yang bergoyang paling hebat pada tiap kecepatan.
4. Gantungkan bola plastisin kecil dengan benang dari puncak menara tinggi (bandul peredam). Atur panjang benangnya, lalu ulangi percobaan.

Pertanyaan: Mengapa menara tinggi "paling suka" goyangan pelan, sedangkan menara pendek bergoyang hebat pada goyangan cepat? Apakah bandul benang membantu? Panjang benang berapa yang paling efektif, dan apa hubungannya dengan periode bandul $T = 2\pi\sqrt{L/g}$?



RINGKASAN KILAT

Bab 33 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **struktur lapisan bumi** dan gerak **lempeng tektonik**, serta alasan Indonesia rawan gempa dan letusan gunung api
- membedakan gelombang **P, S, dan permukaan**, lalu menentukan jarak dan lokasi **episenter** dari selisih waktu S–P
- memahami **magnitudo** sebagai skala logaritmik: naik 1 berarti energi ± 32 kali
- menghitung cepat rambat **tsunami** $v = \sqrt{gh}$ dan menjelaskan mengapa gelombang meninggi di dekat pantai

- menerapkan **mitigasi**: bangunan tahan gempa, peringatan dini InaTEWS, tas siaga bencana, dan evakuasi ke tempat tinggi

Istilah kunci

kerak

mantel

inti

litosfer

lempeng tektonik

gelombang seismik

hiposenter

episenter

likuifaksi

magnitudo

Tsunami

magma

awan panas guguran

resonansi

Rumus penting

$$d = \Delta t \frac{v_P v_S}{v_P - v_S}$$

Jarak pusat gempa dari jeda S–P. Makin lama jeda antara getaran kecil (P) dan guncangan besar (S), makin jauh pusat gempanya.

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{1,5(M_2 - M_1)}$$

Perbandingan energi dua gempa. Naik satu magnitudo, energinya sekitar 32 kali lipat. Naik dua magnitudo, seribu kali!

$$v = \sqrt{gh}$$

Cepat rambat tsunami. Makin dalam lautnya, makin ngebut tsunaminya. Di laut dangkal ia melambat, tetapi meninggi.

Jangan sampai terjebak

- Titik di dalam Bumi tempat batuan mulai patah disebut hiposenter (fokus).
- Magnitudo adalah satu angka untuk satu gempa: seberapa besar energi di sumbernya.
- Air laut surut tiba-tiba bukan saatnya memungut ikan atau merekam video: itu tanda tsunami mungkin datang dalam beberapa menit.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=33

Teka-teki untuk Bab 34

Panas di perut Bumi yang mendorong magma Merapi juga memanaskan air bawah tanah sampai ratusan derajat Celsius. Di Kamojang dan Dieng, uap itu memutar turbin dan menyalakan jutaan lampu **tanpa membakar bahan bakar apa pun**. Mengapa pembangkit seperti ini disebut "energi terbarukan", dan apa hubungannya dengan udara kota yang makin gerah dan banjir rob di pantai utara Jawa?

▼ Intip petunjuk

Ingat generator di Bab 25: putar kumparan di medan magnet, maka listrik mengalir. Pertanyaannya, apa yang memutar turbin? Pembangkit yang membakar batu bara atau minyak melepaskan gas CO₂, gas yang memerangkap panas di atmosfer. Bab 34 akan membandingkan sumber-sumber energi dan menghitung jejak karbon kita.

34 Selimut Bumi Makin Tebal: Energi, Iklim, dan Aksi Kita

Halaman sekolah kebanjiran padahal tidak hujan, siang terasa makin terik. Apa hubungannya dengan knalpot motor dan lampu kamarmu? Kabar baiknya: fisika juga menunjukkan jalan keluarnya, dan Indonesia kaya Matahari, angin, serta panas bumi.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menelusuri **rantai perubahan energi** dari Matahari sampai lampu di rumahmu dan menghitung **efisiensi**;
- menjelaskan **efek rumah kaca** lewat neraca energi Bumi, lalu memperkirakan suhu kesetimbangan planet;
- membedakan **bukti, penyebab, dan dampak** perubahan iklim, termasuk banjir rob di pesisir utara Jawa;
- menghitung daya **panel surya** dan **turbin angin**, serta **jejak karbon** kegiatan sehari-hari;
- memilih **aksi hemat energi** yang dampaknya terukur, dari kamar tidur sampai kebijakan negara.

BANJIR TANPA HUJAN

KOMIK • 4 PANEL

Pesisir Pekalongan, siang bolong

RAKA

Panasnya kebangetan! Eh, kok halaman sekolah banjir? Kan nggak hujan dari kemarin!

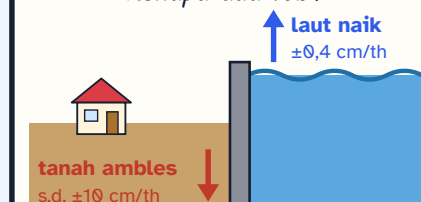
SARI

Ini **banjir rob**, Rak: air laut pasang masuk ke darat. Tanahnya ambles, muka lautnya naik.

RAKA

Laut naik? Memangnya siapa yang nambahin airnya?

Kenapa ada rob?



KAK NARA

Salah satu "tersangkanya" keluar dari knalpot kita: gas CO_2 . Ia membuat Bumi seperti memakai selimut yang makin tebal.

RAKA

Jadi motorku ikut bikin banjir?!



Di bukit dekat sekolah

KAK NARA

Kabar baiknya, kuncinya juga ada di fisika: Matahari, angin, panas bumi, dan cara kita memakai energi. Yuk, selidiki!

TARSI

Siap! Aku yang mengukur.



Tebak Dulu!

Bagaimana sebenarnya gas CO_2 membuat Bumi makin hangat?

CO_2 melubangi lapisan ozon, sehingga sinar Matahari masuk lebih banyak.

CO_2 yang keluar dari knalpot itu panas, jadi udara ikut memanaskan.

CO_2 menyerap sinar inframerah yang dipancarkan permukaan Bumi, lalu memancarkannya lagi ke segala arah, sebagian kembali ke bawah.

CO_2 memantulkan cahaya Matahari kembali ke Bumi seperti cermin.

Jawabannya: CO_2 menahan "panas pulang" berupa inframerah. Cahaya Matahari (kebanyakan cahaya tampak) menembus udara dan menghangatkan tanah serta laut. Permukaan yang hangat lalu memancarkan sinar *inframerah* ke angkasa. CO_2 , uap air, dan metana menyerap inframerah itu, lalu memancarkannya kembali ke segala arah, termasuk ke bawah. Lubang ozon adalah masalah yang **berbeda** (soal sinar ultraungu), dan panas dari knalpot itu sendiri sangat kecil dibanding efek selimutnya.

34.1 Energi: satu "mata uang", banyak wujud

Kamu sudah mengenal energi kinetik dan potensial (Bab 8), kalor (Bab 15), dan energi listrik (Bab 23). Semuanya adalah **energi**: kemampuan untuk melakukan usaha atau memanaskan sesuatu. Energi seperti mata uang yang

bisa ditukar ke banyak bentuk: **kimia** (makanan, bensin, batu bara), **listrik**, **cahaya**, **kalor**, **kinetik**, **potensial**, dan **nuklir**.

Hukum kekekalan energi. Energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan; energi hanya berubah bentuk. Yang "hilang" sebenarnya berubah menjadi bentuk yang tidak kita inginkan, biasanya kalor.

Karena itu kita mengukur **efisiensi**: berapa bagian energi masukan yang berubah menjadi energi berguna.

$$\eta = \frac{E_{\text{berguna}}}{E_{\text{masukan}}} \times 100\%$$

Bahasa sederhana • Gampangnya: energi itu seperti uang jajan yang ditukar-tukar. Uangnya tidak hilang, tetapi setiap kali ditukar ada "biaya" yang berubah jadi panas. Lampu pijar membuang banyak uang jajannya jadi panas, sedangkan lampu LED jauh lebih hemat.

Hampir semua energi yang kita pakai berasal dari **Matahari**. Bahkan bensin dan batu bara adalah "baterai purba": cahaya Matahari yang ditangkap tumbuhan jutaan tahun lalu. Ikuti perjalanannya.



Matahari

Langkah 1. Di inti Matahari, energi nuklir (fusi) berubah menjadi **cahaya** yang melesat ke Bumi.



Matahari

hutan purba

Langkah 2. Jutaan tahun lalu, tumbuhan purba menangkap cahaya itu lewat fotosintesis: energi cahaya menjadi **energi kimia**.



Matahari

hutan purba

batu bara

Langkah 3. Tumbuhan mati, terkubur, dan tertekan selama jutaan tahun menjadi **batu bara**. Energi kimianya tersimpan, seperti baterai purba.



Matahari

hutan purba

batu bara



PLTU

Langkah 4. Di PLTU, batu bara dibakar: energi kimia → **kalor** → uap bertekanan → turbin berputar (**kinetik**). Karbon yang dulu diikat tumbuhan lepas lagi sebagai **CO₂**.



Matahari

hutan purba

batu bara



PLTU

kabel listrik

Langkah 5. Generator mengubah putaran menjadi **energi listrik**, lalu kabel mengirimnya ke kota (Bab 25).



Matahari

hutan purba

batu bara



PLTU

kabel listrik

Langkah 6. Di rumahmu, lampu mengubah listrik menjadi **cahaya** dan **kalor**. Perjalanan selesai!



Matahari

hutan purba

batu bara



PLTU

kabel listrik

100 J batu bara → ±35 J listrik di PLTU → ±32 J sampai rumah
Lampu LED: ±10 J cahaya · Lampu pijar: hanya ±1-2 J cahaya

Langkah 7. Setiap pergantian bentuk ada "pajaknya" berupa **kalor**. Dari 100 J batu bara, hanya sebagian kecil yang menjadi cahaya. Lampu yang efisien membuat seluruh rantai jauh lebih hemat.

CONTOH LED atau pijar?

Satu lampu pijar 60 W dan satu lampu LED 9 W sama terangnya. Masing-masing menyala 6 jam sehari selama 30 hari. Tarif listrik ±Rp1.445 per kWh. Berapa rupiah yang dihemat jika memakai LED?

- 1 Energi lampu pijar: $60 \text{ W} \times 6 \text{ jam} \times 30 = 10\,800 \text{ Wh} = 10,8 \text{ kWh}$.
- 2 Energi lampu LED: $9 \times 6 \times 30 = 1\,620 \text{ Wh} = 1,62 \text{ kWh}$.
- 3 Selisih: $10,8 - 1,62 = 9,18 \text{ kWh}$, dikali tarif: $9,18 \times 1\,445 \approx \text{Rp}13\,265$.

Hemat ±Rp13.000 per lampu setiap bulan, dan PLTU tidak perlu membakar batu bara untuk 9 kWh itu (±7 kg CO₂ lebih sedikit).



TRIK KAK NARA: "WATT KALI JAM, BAGI SERIBU"

Energi listrik dalam kWh = daya (W) × lama (jam) ÷ 1000. Kipas 40 W menyala 5 jam: $40 \times 5 \div 1000 = 0,2 \text{ kWh}$. Satu kWh itulah yang dihitung meteran PLN dan token prabayar.

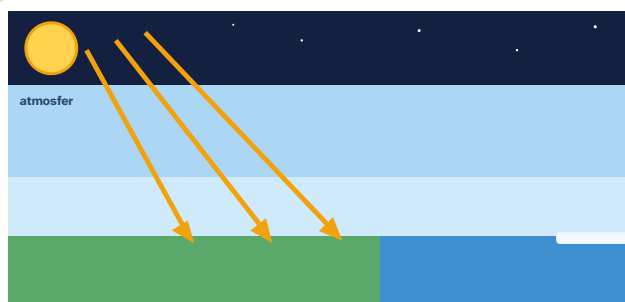
34.2 Efek rumah kaca: selimut tak terlihat

Bumi menerima energi dari Matahari dan membuangnya ke angkasa. Kalau energi masuk = energi keluar, suhu Bumi tetap. Inilah **neraca energi** Bumi. Di bagian atas atmosfer, Matahari memberi **1.361 W/m²** (disebut *konstanta surya*). Karena Bumi bulat dan berputar, rata-rata seluruh permukaan hanya menerima seperempatnya, yaitu ±340 W/m².

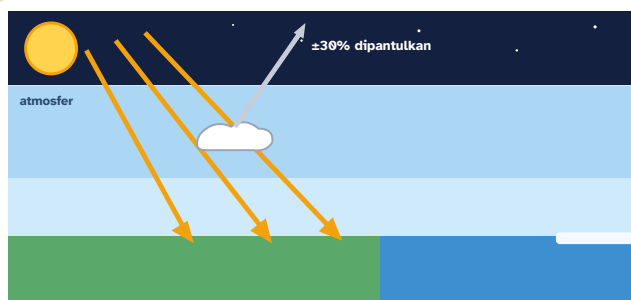
Tidak semuanya diserap. Sekitar 30% dipantulkan kembali oleh awan, es, dan permukaan terang. Bagian yang dipantulkan disebut **albedo** ($\alpha \approx 0,30$ untuk Bumi). Sisanya menghangatkan daratan dan lautan, yang lalu memancarkan energi sebagai **sinar inframerah** (Bab 15 dan 27).



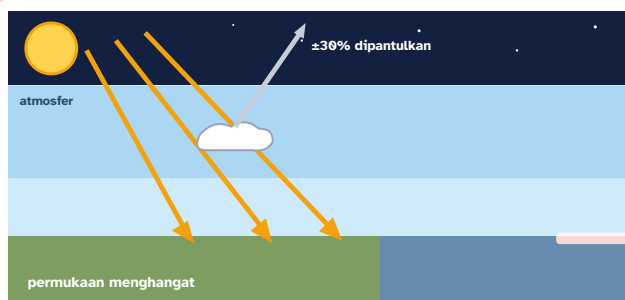
Langkah 1. Matahari memancarkan energi, sebagian besar berupa cahaya tampak (gelombang pendek) yang mudah menembus udara.



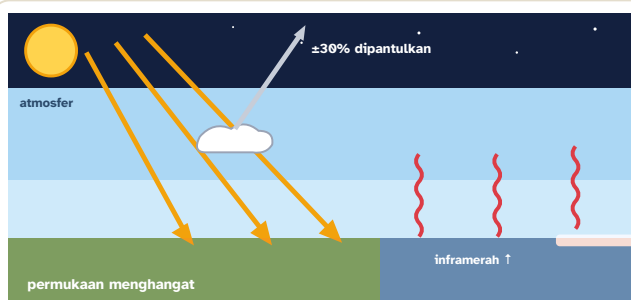
Langkah 2. Cahaya itu tiba di Bumi: rata-rata $\pm 340 \text{ W/m}^2$ untuk setiap meter persegi permukaan.



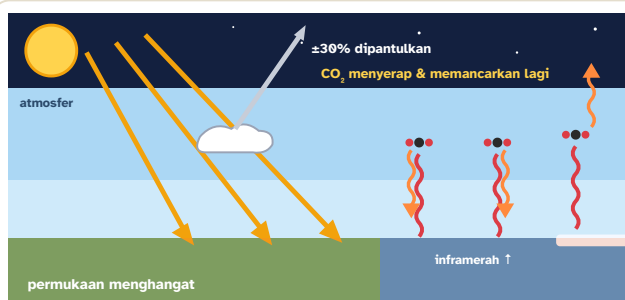
Langkah 3. Awan, es, dan permukaan terang memantulkan $\pm 30\%$ kembali ke angkasa. Itulah albedo.



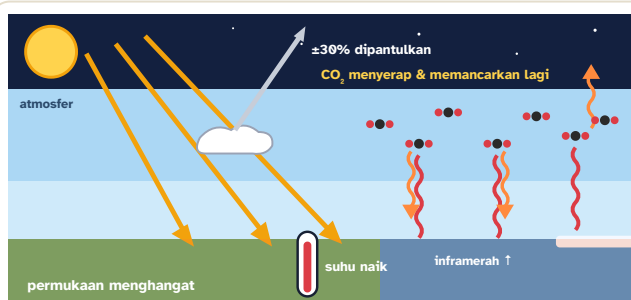
Langkah 4. Sisanya diserap daratan dan lautan, sehingga permukaan menghangat.



Langkah 5. Permukaan yang hangat memancarkan energi sebagai **inframerah** (gelombang panjang) ke atas.



Langkah 6. Molekul CO_2 , uap air, dan metana menyerap inframerah, lalu memancarkannya lagi ke **segala arah**. Sebagian kembali ke bawah dan menghangatkan permukaan lagi.



Langkah 7. Tambah $\text{CO}_2 \rightarrow$ selimut makin tebal $\rightarrow$ lebih sedikit energi lolos. Bumi baru setimbang lagi pada **suhu yang lebih tinggi**.

Seandainya Bumi tidak punya selimut gas rumah kaca, berapa suhunya? Kita bisa menghitungnya dengan menyamakan energi yang diserap dengan energi yang dipancarkan benda hitam, σT^4 (hukum Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$):

$$\underbrace{\frac{S}{4}(1-\alpha)}_{\text{diserap}} = \underbrace{\sigma T^4}_{\text{dipancarkan}}$$

Untuk planet lain, cahaya Matahari makin redup sebanding dengan kuadrat jarak (hukum kuadrat terbalik): $S = S_0/d^2$, dengan $S_0 = 1\,361\text{ W/m}^2$ dan d dalam satuan astronomi (SA). Jadi kita bisa "memindahkan" planet mendekat atau menjauhi Matahari.

RUMUS HIDUP

Suhu planet tanpa selimut gas rumah kaca

$$T = \left(\frac{S_0 (1 - \alpha)}{4\sigma d^2} \right)^{1/4}$$

Energi Matahari yang diserap sama dengan energi panas yang dipancarkan. Makin jauh dari Matahari atau makin terang permukaannya, makin dingin planetnya.

d

Jarak dari Matahari SA

α

Albedo (bagian yang dipantulkan)

T

Suhu kesetimbangan °C

SUHU KESETIMBANGAN

-18,4
°C

Planet berjarak **1 SA** dengan albedo **0,3** setimbang pada **-18,4 °C**. Untuk Bumi (1 SA, albedo 0,30) hasilnya $\pm -18\text{ °C}$, padahal rata-rata sungguhan $\pm 15\text{ °C}$. Selisihnya adalah 'hadiah' dari selimut gas rumah kaca!

Cek satuan: $S_0 = 1\,361\text{ W/m}^2$ adalah intensitas Matahari di jarak Bumi. $\left(\frac{\text{W/m}^2}{\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}} \right)^{1/4} = \text{K}$, lalu kurangi 273 untuk mendapatkan °C.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-IKLIM-SUHU



COBA PLANET TETANGGA

Atur Rumus Hidup ke **Mars** ($d = 1,52\text{ SA}$, albedo 0,25): hasilnya $\pm -63\text{ °C}$, mirip suhu Mars sungguhan karena atmosfernya sangat tipis. Lalu coba **Venus** ($d = 0,72\text{ SA}$, albedo 0,76): hasilnya $\pm -43\text{ °C}$, padahal permukaan Venus $\pm 460\text{ °C}$, cukup panas untuk melelehkan timah! Atmosfer Venus hampir seluruhnya CO_2 dan sangat tebal, sehingga efek rumah kacanya "kebablasan".

CONTOH Bumi tanpa selimut

Dengan $S = 1\,361 \text{ W/m}^2$ dan $\alpha = 0,30$, berapa suhu Bumi seandainya tidak ada efek rumah kaca?

1 Energi yang diserap per m^2 : $\frac{1\,361 \times 0,70}{4} \approx 238 \text{ W/m}^2$.

2 $T^4 = \frac{238}{5,67 \times 10^{-8}} \approx 4,2 \times 10^9 \text{ K}^4$.

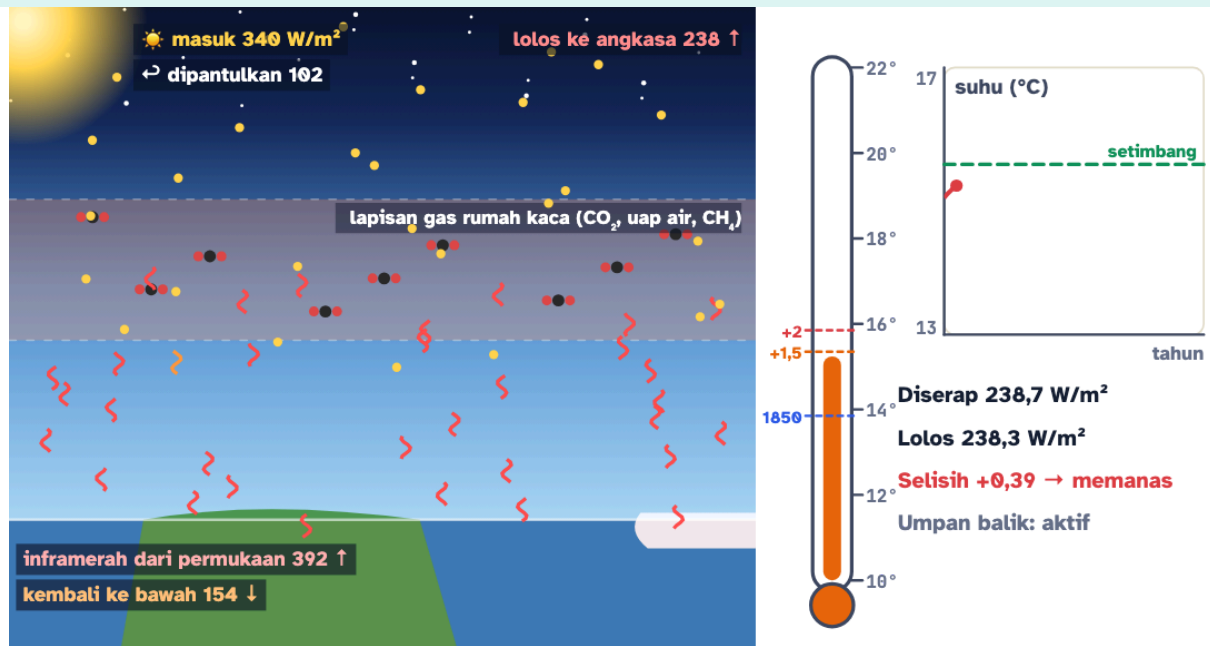
3 $T = (4,2 \times 10^9)^{1/4} \approx 255 \text{ K} \approx -18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tanpa selimut, Bumi membeku pada $\pm -18 \text{ }^\circ\text{C}$. Kenyataannya rata-rata $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Efek rumah kaca alami menambah $\pm 33 \text{ }^\circ\text{C}$ dan membuat kehidupan mungkin!



AWAS JEBAKAN

Efek rumah kaca itu **bukan musuh**. Tanpanya, lautan membeku. Masalahnya adalah **efek rumah kaca yang diperkuat**: manusia menambah CO_2 terlalu banyak dan terlalu cepat, sehingga selimutnya menebal. Istilah "rumah kaca" pun hanya analogi. Rumah kaca sungguhan hangat terutama karena udaranya terkurung, bukan karena menyerap inframerah.



Suhu rata-rata
15,24 °C

Suhu setimbang
15,55 °C

Kenaikan sejak ±1850
1,39 °C

Ketidakseimbangan energi
0,39 W/m²

Waktu berjalan
3 tahun

Titik kuning = cahaya Matahari, titik putih = cahaya yang dipantulkan, titik merah = inframerah. Mulai dari Bumi sekarang (±420 ppm). Naikkan CO₂ ke 560 ppm: berapa kenaikan suhu setimbangnya? Coba matikan **umpan balik**, lalu tekan **Letusan Tambora**. Ini model sederhana untuk belajar, bukan ramalan cuaca.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MODEL ATMOSFER SATU LAPIS

Anggap atmosfer satu lapisan yang menyerap bagian ϵ (emisivitas) inframerah dari permukaan dan bersuhu T_a . Neraca lapisan: $\epsilon\sigma T_s^4 = 2\epsilon\sigma T_a^4$, sehingga $T_a^4 = T_s^4/2$. Neraca di puncak atmosfer:

$$\frac{S}{4}(1 - \alpha) = (1 - \epsilon)\sigma T_s^4 + \epsilon\sigma T_a^4 = \sigma T_s^4 \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right). \text{ Hasilnya } T_s = T_e \left(\frac{2}{2 - \epsilon}\right)^{1/4}, \text{ dengan } T_e \approx 255 \text{ K.}$$

Agar $T_s = 288 \text{ K}$, diperlukan $\epsilon \approx 0,78$. Jika $\epsilon = 1$, $T_s = 2^{1/4}T_e \approx 303 \text{ K}$. Model ini juga menjelaskan mengapa stratosfer mendingin ketika troposfer memanas.



TAMU DARI MASA LALU

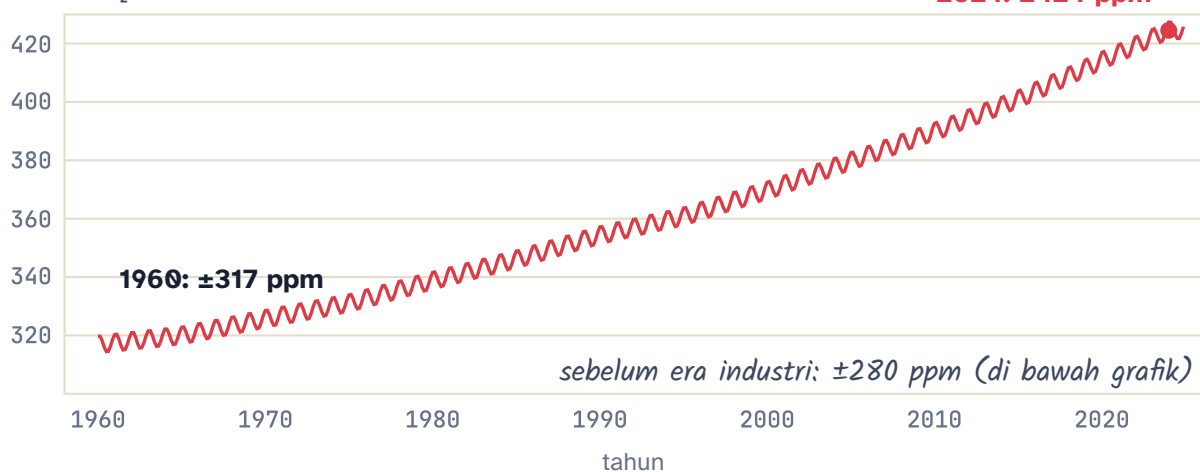
Sekitar tahun 1824, **Joseph Fourier** menduga atmosfer berfungsi seperti selimut. Tahun 1856, **Eunice Foote** menjemur tabung kaca berisi berbagai gas dan mendapati tabung berisi CO₂ paling panas. Tahun 1859, **John Tyndall** mengukur bahwa CO₂ dan uap air menyerap inframerah. Tahun 1896, **Svante Arrhenius** menghitung dengan tangan bahwa melipatgandakan CO₂ akan menghangatkan Bumi beberapa derajat. Sejak 1958, **Charles Keeling** mengukur CO₂ udara setiap hari di Gunung Mauna Loa, Hawaii. Jadi fisika iklim sudah berumur lebih dari 150 tahun!

34.3

Bukti dan dampak: Bumi sedang demam

Ilmuwan tidak menyimpulkan pemanasan global dari satu hari yang panas. Buktinya datang dari banyak alat ukur yang saling menguatkan: termometer di ribuan stasiun cuaca, pelampung di lautan, satelit, inti es purba, dan lingkaran pohon.

CO₂ di udara (ppm), Mauna Loa



Kurva Keeling (disederhanakan dari data pengukuran). Gelombang kecil tiap tahun terjadi karena hutan belahan utara menyerap CO₂ saat musim semi-panas dan melepasnya saat musim gugur-dingin. Garis besarnya terus naik.

±1,2 °C

kenaikan suhu rata-rata global dibanding akhir abad ke-19 (2024 sempat melewati 1,5 °C)

>420 ppm

CO₂ di udara, tertinggi setidaknya dalam ratusan ribu tahun

±20 cm

kenaikan muka laut global sejak 1900, kini ±4 mm per tahun

±90%

kelebihan panas Bumi yang tersimpan di lautan

Dampaknya terasa di Indonesia. Gelombang panas makin sering, hujan ekstrem makin deras (sehingga banjir kilat), kemarau saat El Niño makin kering sehingga hutan dan lahan gambut mudah terbakar, dan air laut yang terlalu hangat membuat **terumbu karang memutih**. Karang yang stres mengusir alga mungil yang memberinya

warna dan makanan. Jika air tidak segera sejuk kembali, karang bisa mati. Padahal Indonesia adalah jantung Segitiga Terumbu Karang dunia.

Bahasa sederhana • Gampangnya: Bumi sedang demam ringan. Kenaikan 1 °C terdengar kecil, tetapi untuk seluruh planet itu besar sekali. Coba ingat badanmu: 37 °C normal, 38 °C sudah demam!



FISIKA INDONESIA: KENAPA ADA BANJIR ROB?

Di pesisir Semarang, Pekalongan, dan Jakarta Utara, banjir rob terjadi karena **dua gerak sekaligus**. Muka laut naik ± 4 mm per tahun karena pemanasan global (air laut memuai dan es daratan mencair). Namun tanahnya sendiri **ambles** jauh lebih cepat, di beberapa titik bisa mencapai ± 10 cm per tahun, terutama karena air tanah disedot berlebihan dan beban bangunan. Jadi penurunan tanah bisa 20 kali lebih cepat daripada kenaikan laut! Solusinya pun harus dua arah: mengurangi emisi, sekaligus menghentikan penyedotan air tanah, memakai air perpipaan, menanam mangrove, dan membangun tanggul.



AWAS JEBAKAN: ASAP HITAM $\neq$ CO₂

Asap hitam dari knalpot atau cerobong adalah **pencemaran udara**: partikel halus (PM_{2,5}), jelaga, dan gas beracun yang merusak paru-paru. CO₂ justru **tidak berwarna dan tidak berbau**. Keduanya sering keluar dari sumber yang sama (pembakaran bahan bakar fosil), tetapi akibatnya berbeda: pencemaran membuat kita sakit hari ini, sedangkan CO₂ menebalkan selimut Bumi selama ratusan tahun. Menghemat bahan bakar menolong keduanya sekaligus.



Tebak Dulu!

Es di Samudra Arktik (Kutub Utara) mengapung di laut. Jika semuanya mencair, bagaimana muka laut global?

Naik puluhan meter, karena es di kutub sangat banyak.

Hampir tidak berubah, karena es terapung sudah "mengeser" air seberat dirinya.

Turun, karena air lebih padat daripada es.

Naik persis setinggi bongkahan es yang menyembul.

Hampir tidak berubah: ini hukum Archimedes (Bab 13)! Es terapung memindahkan air yang beratnya sama dengan berat es. Saat mencair, es berubah menjadi air yang volumenya hampir sama dengan air yang tadi dipindahkan. (Muka laut naik sedikit sekali karena air lelehan tawar sedikit kurang padat daripada air laut.) Yang berbahaya adalah es **daratan** di Greenland dan Antartika serta gletser gunung: saat mencair, airnya benar-benar *ditambahkan* ke laut. Ditambah lagi, air laut yang hangat **memuai**.

MITOS

"Kemarin hujan deras dan dingin. Jadi pemanasan global itu bohong."

MITOS

"Lubang ozon adalah penyebab pemanasan global."

FAKTA

Cuaca

adalah keadaan udara hari ini, sedangkan

iklim

adalah rata-rata puluhan tahun. Satu hari dingin tidak membatalkan tren rata-rata seluruh Bumi, sama seperti satu nilai jelek tidak menentukan rapormu.

FAKTA

Lubang ozon disebabkan gas CFC dan membuat sinar ultraungu lebih banyak masuk. Itu masalah berbeda. Kabar baiknya, dunia melarang CFC lewat

Protokol Montreal 1987

, dan ozon kini perlahan pulih. Bukti bahwa kerja sama global bisa berhasil!

MITOS

"Perubahan iklim terlalu besar. Tidak ada yang bisa kita lakukan."

FAKTA

Setiap pecahan derajat yang dicegah mengurangi dampak. Teknologi bersih (panel surya, angin, baterai) kini jauh lebih murah daripada 15 tahun lalu, dan pilihan banyak orang menggerakkan pasar serta kebijakan.

34.4 Energi fosil vs terbarukan

Bahan bakar fosil (batu bara, minyak bumi, gas alam) terbentuk dari sisa makhluk hidup selama jutaan tahun. Persediaannya terbatas, sehingga disebut **tak terbarukan**. Saat dibakar, karbonnya bergabung dengan oksigen: $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Saat ini lebih dari separuh listrik Indonesia masih berasal dari PLTU batu bara.

Energi terbarukan berasal dari sumber yang terus diisi ulang oleh alam: cahaya Matahari, angin, air hujan yang mengalir, panas dari dalam Bumi, dan biomassa. Hampir tanpa emisi CO_2 saat beroperasi.



FAKTA UNIK DARI TARSI

Satu liter bensin beratnya $\pm 0,74$ kg, tetapi saat dibakar menghasilkan $\pm 2,3$ kg CO_2 , lebih berat dari bensinnya! Kok bisa? Setiap atom karbon (massa 12) mengikat dua atom oksigen dari udara (massa 2×16), menjadi CO_2 bermassa 44. Jadi massa karbonnya "dikalikan" $44/12 \approx 3,7$.

Sumber	Terbarukan?	Kelebihan	Tantangan	Contoh di Indonesia
Batu bara (PLTU)	Tidak	stabil siang-malam, teknologinya mapan	CO ₂ terbesar (± 1 kg per kWh), polusi udara, tambang merusak lahan	banyak di Jawa, Sumatra, Kalimantan
Gas alam (PLTG/PLTGU)	Tidak	cepat dinyalakan, emisi $\pm$ setengah batu bara	tetap fosil; kebocoran metana	PLTGU Muara Karang, Tambak Lorok
Surya (PLTS)	Ya	Matahari tropis berlimpah, panel bisa di atap	hanya siang; butuh lahan atau atap luas; perlu baterai	PLTS Terapung Cirata, PLTS atap
Air (PLTA)	Ya	stabil, bisa jadi "baterai" (bendungan)	bendungan mengubah ekosistem sungai; kemarau mengurangi debit	Cirata, Saguling, Jatiluhur
Angin (PLTB)	Ya	tanpa bahan bakar, lahan di bawahnya masih bisa ditanami	angin berubah-ubah; lokasi berangin terbatas	PLTB Sidrap, PLTB Tolo Jeneponto
Panas bumi (PLTP)	Ya	menyala 24 jam, sangat stabil	eksplorasi mahal dan berisiko; lokasi di pegunungan vulkanik	Kamojang, Dieng, Sarulla, Lahendong
Biomassa & biogas	Ya (jika ditanam ulang)	memanfaatkan limbah pertanian dan ternak	bisa memicu pembukaan hutan bila tak dikelola	biogas kotoran sapi di desa

MITOS

"Listrik tenaga surya tak bisa diandalkan, karena malam tidak ada Matahari."

MITOS

"Mobil listrik pasti bebas emisi."

FAKTA

Jaringan listrik yang baik memadukan banyak sumber: PLTS di siang hari, PLTP dan PLTA yang stabil, PLTB, serta

baterai

atau PLTA pompa untuk menyimpan kelebihan siang hari. Tidak ada satu sumber yang harus bekerja sendirian.

FAKTA

Knalpotnya memang nol, tetapi listriknya bisa berasal dari PLTU. Emisi totalnya bergantung pada sumber listrik. Makin banyak PLTS, PLTB, dan PLTP di jaringan, makin bersih kendaraan listrik.

34.5

Surya, air, angin, panas bumi, biogas

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Sel surya adalah semikonduktor (Bab 32). Foton cahaya melepaskan elektron sehingga mengalir arus (efek fotolistrik, Bab 28). Panel silikon modern mengubah $\pm 20\%$ energi cahaya menjadi listrik. Indonesia berada di khatulistiwa, sehingga rata-rata menerima $\pm 4\text{--}5$ kWh energi cahaya per m^2 setiap hari.

$$P = \eta I A$$

Daya listrik = efisiensi × intensitas cahaya × luas panel.

 η

Efisiensi panel %

 I Intensitas cahaya (W/m²) A Luas panel (m²) P

Daya listrik W

DAYA LISTRIK

2.000

W

Panel seluas **10** m² dengan efisiensi **20%** di bawah cahaya **1.000** W/m² menghasilkan **2.000** W.

Satuan Nusantara: $\approx 33\%$ dari mesin motor bebek · $\approx 5 \times$ rice cooker saat memasak · $\approx 200 \times$ lampu LED

Cek satuan: $\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times \text{m}^2 = \text{W}$. Efisiensi ditulis dalam persen, jadi dibagi 100.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-iklim-surya](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-iklim-surya)

Atap rumah Sari dipasang 6 panel surya, masing-masing seluas 2 m^2 dengan efisiensi 20%. Di kotanya, energi cahaya Matahari rata-rata $4,5 \text{ kWh per m}^2$ per hari. Berapa energi listrik per hari, dan berapa rupiah per bulan yang bisa dihemat (tarif $\pm \text{Rp}1.445/\text{kWh}$)?

1 Luas total: $A = 6 \times 2 = 12 \text{ m}^2$.

2 Energi listrik per hari: $E = \eta \times (\text{energi cahaya per m}^2) \times A = 0,20 \times 4,5 \times 12 = 10,8 \text{ kWh}$.

3 Per bulan: $10,8 \times 30 = 324 \text{ kWh}$, senilai $324 \times 1.445 \approx \text{Rp}468.000$.

4 Cek kewajaran: di dunia nyata ada rugi-rugi kabel, inverter, debu, dan panas ($\pm 20\%$), sehingga hasil nyata $\pm 8-9 \text{ kWh}$ per hari.

Sekitar 9–11 kWh per hari, cukup untuk sebagian besar kebutuhan rumah tangga hemat, dan menghindari $\pm 250 \text{ kg CO}_2$ per bulan dari PLTU.

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Air di bendungan menyimpan energi potensial. Saat mengalir turun setinggi h , energi itu memutar turbin. Daya PLTA: $P = \eta \rho g Q h$, dengan Q debit air (m^3/s). PLTA Cirata di Jawa Barat berkapasitas $\pm 1.000 \text{ MW}$. Di atas waduknya yang sama kini terapung ratusan ribu panel surya!

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (angin, PLTB)

Angin adalah udara yang bergerak, jadi membawa energi kinetik. Udara bermassa $m = \rho A v t$ melewati baling-baling seluas A dalam waktu t . Energi kinetiknya $\frac{1}{2} m v^2$, sehingga dayanya sebanding dengan v^3 .



Tebak Dulu!

Kecepatan angin naik dua kali lipat (misalnya dari 4 m/s ke 8 m/s). Daya yang dibawa angin melalui turbin menjadi...

2 kali lipat, karena kecepatannya 2 kali.

4 kali lipat, karena energi kinetik sebanding dengan v^2 .

8 kali lipat.

tetap, karena ukuran turbinnya sama.

8 kali lipat! Energi kinetik tiap kilogram udara naik 4 kali (v^2), dan jumlah udara yang lewat tiap detik juga naik 2 kali (v). Totalnya $2^3 = 8$. Karena itulah lokasi PLTB dipilih dengan sangat teliti: sedikit lebih berangin berarti jauh lebih banyak listrik.

RUMUS HIDUP

Daya turbin angin

$$P = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) v^3 \eta$$

Angin dua kali lebih kencang membawa daya delapan kali lebih besar!

v Kecepatan angin m/s

D Diameter baling-baling m

η Efisiensi turbin %

P Daya listrik kW

DAYA LISTRIK

735

kW

Angin **7** m/s menerpa baling-baling berdiameter **114** m. Dengan efisiensi **35%**, turbin menghasilkan **±735** kW.

Cek satuan: $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3} = \text{W}$, lalu dibagi 1000 menjadi kW.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-IKLIM-ANGIN](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-IKLIM-ANGIN)

Satu turbin PLTB Sidrap memiliki baling-baling berdiameter 114 m. Jika angin rata-rata 7 m/s, massa jenis udara $1,2 \text{ kg/m}^3$, dan efisiensi 35%, berapa daya rata-ratanya? Bandingkan dengan kapasitas maksimum turbin, 2,5 MW.

- 1 Luas sapuan: $A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (114)^2 \approx 10\,207 \text{ m}^2$.
- 2 $P = \frac{1}{2} \times 1,2 \times 10\,207 \times 7^3 \times 0,35 \approx 735\,000 \text{ W} \approx 0,74 \text{ MW}$.
- 3 Rasio terhadap kapasitas: $0,74/2,5 \approx 0,29$, yaitu $\pm 29\%$.

Rata-rata $\pm 0,74 \text{ MW}$. Angka $\pm 29\%$ itu disebut faktor kapasitas: turbin tidak selalu bekerja penuh karena angin naik-turun. PLTP bisa mencapai 80–90%, PLTS $\pm 15\%$.



LANJUT • OLIMPIADE

BATAS BETZ: KENAPA TURBIN TAK BISA MENGAMBIL 100%?

Jika turbin mengambil semua energi angin, udara di belakangnya berhenti dan menumpuk, sehingga udara baru tidak bisa lewat. Misalkan angin datang dengan laju v_1 dan pergi dengan v_2 . Model cakram aktuator memberi laju di baling-baling $v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$ dan daya $P = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)$. Turunkan terhadap v_2 dan samakan dengan nol: maksimum terjadi pada $v_2 = v_1/3$, dengan $P_{\text{maks}} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho A v_1^3$. Jadi paling banyak **59,3%**. Albert Betz menurunkannya pada 1919.

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Indonesia berdiri di atas Cincin Api (Bab 33). Magma memanaskan air tanah di dalam batuan hingga menjadi uap bertekanan tinggi. Sumur dibor, uapnya dialirkan untuk memutar turbin, lalu air dingin disuntikkan kembali ke dalam tanah. PLTP menyala siang-malam, tidak bergantung cuaca.



FISIKA INDONESIA: NEGERI PANAS BUMI

Sumur panas bumi pertama di Indonesia dibor di **Kamojang**, Garut, tahun 1926. PLTP Kamojang mulai menyalurkan listrik tahun 1983 dan kini berkapasitas lebih dari 200 MW. Di dataran tinggi **Dieng**, Jawa Tengah, PLTP memanfaatkan kawasan vulkanik yang sama dengan kawah-kawah wisatanya. Indonesia memiliki salah satu potensi panas bumi terbesar di dunia ($\pm 24 \text{ GW}$) dan kapasitas terpasangnya menempati peringkat kedua dunia. Masih banyak yang belum dimanfaatkan, mungkin menunggu insinyur seperti kamu!

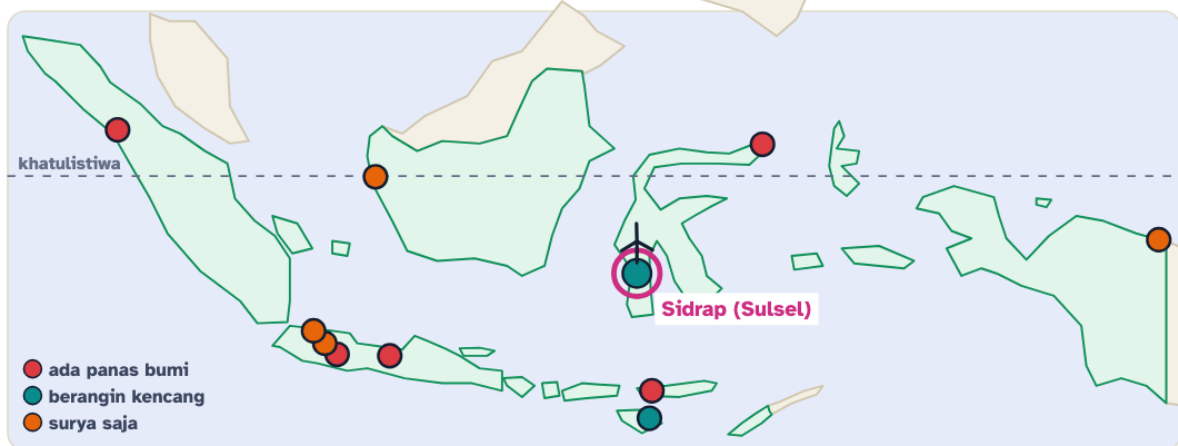
Biomassa dan biogas

Kotoran sapi yang dimasukkan ke tangki tertutup (digester) diurai bakteri tanpa oksigen menjadi **biogas**, sebagian besar metana (CH_4). Kotoran dari 2–3 ekor sapi bisa mencukupi kompor sebuah keluarga. Bonusnya:

metana adalah gas rumah kaca ± 28 kali lebih kuat daripada CO_2 . Membakarnya menjadi CO_2 justru mengurangi dampak, dan ampasnya menjadi pupuk.

LAB MINI Ladang energi Nusantara: pilih lokasi, bangun pembangkit

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



Potensi di lokasi ini (perkiraan):

Surya 5 kWh/m²/hari

Angin 7 m/s

Panas bumi tidak ada

PLTB 100 MW → faktor kapasitas 29%

PLTB skala besar pertama di Indonesia (2018): 30 turbin.

± 40 turbin @ 2,5 MW, baling-baling 114 m



Faktor kapasitas
29 %

Energi setahun
258 GWh

Cukup untuk
184.000 rumah

CO_2 dihindari
258 ribu ton/tahun

Jam
02.50

Ketuk sebuah titik di peta, pilih jenis pembangkit, atur kapasitasnya, lalu jalankan satu hari. Bandingkan PLTS, PLTB, dan PLTP di lokasi yang sama. Di mana PLTB layak? Mengapa PLTP disebut "pemikul beban dasar"? Data potensi adalah perkiraan kasar untuk belajar.



Lampu jalan tenaga surya

Siang hari panel mengisi baterai, malam hari baterai menyalakan lampu LED. Cocok untuk desa yang jauh dari jaringan PLN.



Kompas biogas

Kotoran sapi menjadi gas masak dan pupuk. Dapur lebih bersih, metana tidak lepas ke udara.



PLTS Terapung Cirata

Ratusan ribu panel mengapung di waduk, dengan kapasitas puncak ± 192 MW, salah satu yang terbesar di Asia Tenggara. Air di bawahnya ikut mendinginkan panel.



Uap dari perut Bumi

Di Kamojang dan Dieng, uap panas bumi memutar turbin siang dan malam tanpa membakar apa pun.

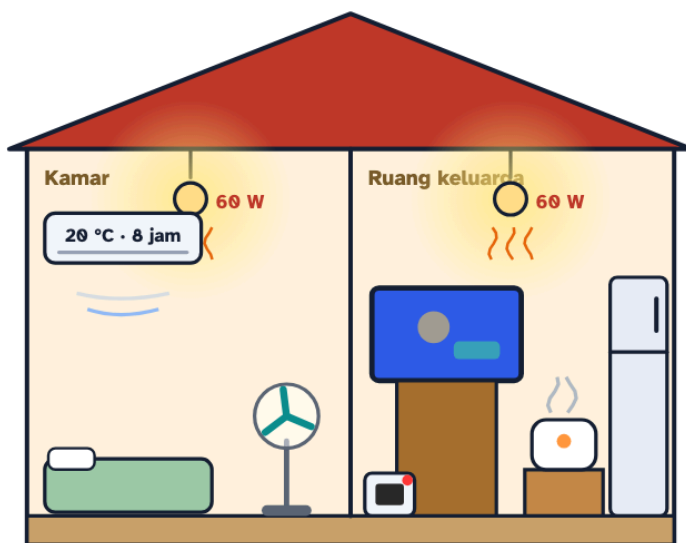
34.6 Efisiensi energi dan jejak karbon

Jejak karbon adalah jumlah gas rumah kaca (dihitung setara CO_2) yang dilepaskan akibat suatu kegiatan. Listrik di Indonesia saat ini rata-rata menghasilkan $\pm 0,8 \text{ kg CO}_2$ per kWh, karena sebagian besar masih dari batu bara. Energi yang **tidak dipakai** adalah energi paling bersih dan paling murah!

LAB MINI

Rumah hemat energi: kWh, rupiah, dan CO_2

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



👉 ketuk lampu, AC, kipas, TV, rice cooker, atau stopkontak

Energi per bulan (kWh)

8 lampu (6 jam)	86
AC 1 PK	209
Kipas angin	0
TV & set-top box	14
Rice cooker	39
Siaga (standby)	7
Kulkas	27
Pompa air	8

Rp564.000 / bulan

312 kg CO_2 / bulan

🌳 $\approx$ serapan 170 pohon setahun



Energi per bulan

390 kWh

Tagihan per bulan

Rp564.000

CO_2 per bulan

312 kg

Hemat vs rumah boros

16 %

Ketuk benda di dalam rumah atau geser pengaturnya. Tekan **Rumah boros** sebagai patokan, lalu cari kombinasi yang menghemat minimal 50% tanpa membuat penghuninya kepanasan. Angka daya adalah perkiraan rumah tangga biasa; tarif $\pm \text{Rp}1.445/\text{kWh}$.

Transportasi juga penyumbang besar. Membakar satu liter bensin menghasilkan $\pm 2,3 \text{ kg CO}_2$. Kendaraan yang irit dan **penyumbang** membagi jejak karbonnya ke banyak orang.

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{d}{e} \times 2,3 \div n$$

Setiap liter bensin yang dibakar melepas $\pm 2,3$ kg CO_2 , lalu dibagi rata ke semua penumpang.

d Jarak perjalanan km

e Irit bahan bakar km/L

n Jumlah penumpang orang

m_{CO_2} CO_2 per orang kg

CO_2 PER ORANG

1,02

kg

Perjalanan **20** km dengan kendaraan **45** km/L yang membawa **1** orang menghasilkan **1,02** kg CO_2 per orang.

Satuan Nusantara: $\approx 6,8 \times \text{satu apel} \cdot \approx 4\%$ dari karung beras

Cek satuan: $\frac{\text{km}}{\text{km/L}} = \text{L}$, lalu $\text{L} \times \frac{\text{kg}}{\text{L}} = \text{kg}$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-IKLIM-JEJAK](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-iklim-jejak)

Raka pergi 20 km. Pilihan A: motor 45 km/L, sendirian. Pilihan B: bus kota 3 km/L yang membawa 40 penumpang. Berapa jejak karbon per orang untuk tiap pilihan?

- 1 Motor: bensin $20/45 \approx 0,44$ L $\rightarrow 0,44 \times 2,3 \approx 1,02$ kg CO₂, semuanya milik Raka.
- 2 Bus: bensin/solar $20/3 \approx 6,7$ L $\rightarrow 6,7 \times 2,3 \approx 15,3$ kg CO₂ untuk seluruh bus.
- 3 Dibagi 40 penumpang: $15,3/40 \approx 0,38$ kg per orang.

Bus penuh $\pm 0,38$ kg per orang, kurang dari separuh motor sendirian ($\pm 1,02$ kg). Kunci efisiensi transportasi adalah berbagi kendaraan. (Untuk solar, angkanya $\pm 2,7$ kg CO₂ per liter, jadi bus sedikit lebih tinggi, tetapi tetap jauh lebih hemat per orang.)

34.7 Kendaraan listrik, baterai, dan nikel Indonesia

Mesin bensin hanya mengubah ± 20 – 30% energi bahan bakar menjadi gerak; sisanya terbuang menjadi panas knalpot dan mesin. Motor listrik mengubah ± 85 – 90% energi baterai menjadi gerak. Karena itu, walaupun listriknya masih sebagian dari batu bara, kendaraan listrik umumnya tetap lebih hemat energi per kilometer.

Sari menempuh 20 km per hari selama 300 hari setahun. Motor bensin: 50 km/L, bensin Rp10.000/L, 2,3 kg CO₂/L. Motor listrik: 30 Wh/km, tarif Rp1.445/kWh, listrik 0,8 kg CO₂/kWh. Bandingkan biaya dan CO₂ per tahun.

- 1 Jarak setahun: $20 \times 300 = 6\,000$ km.
- 2 Motor bensin: $6\,000/50 = 120$ L $\rightarrow$ biaya Rp1.200.000, CO₂ $120 \times 2,3 = 276$ kg.
- 3 Motor listrik: $6\,000 \times 0,030 = 180$ kWh $\rightarrow$ biaya $180 \times 1\,445 \approx$ Rp260.000, CO₂ $180 \times 0,8 = 144$ kg.
- 4 Jika baterainya diisi dari PLTS atap, CO₂ saat dipakai mendekati nol.

Motor listrik ± 4 – 5 kali lebih murah per tahun dan menghasilkan $\pm$ setengah CO₂, bahkan dengan listrik hari ini. Makin bersih listrik PLN, makin besar selisihnya.

Baterai kendaraan listrik umumnya baterai **litium-ion**. Banyak jenisnya memakai **nikel** di katodenya agar bisa menyimpan lebih banyak energi per kilogram. Di sinilah Indonesia berperan besar: Indonesia memiliki cadangan

nikel terbesar di dunia dan menjadi produsen nikel terbesar, terutama dari Sulawesi (Morowali, Sorowako, Kolaka) dan Halmahera.



TAMU DARI MASA LALU

Mobil listrik lebih tua dari yang kamu kira! Sekitar tahun 1900, kira-kira sepertiga mobil di Amerika Serikat bertenaga listrik: senyap, tidak berasap, dan mudah dinyalakan. Mobil bensin menang karena minyak murah dan baterai zaman itu berat. Seabad kemudian, baterai litium-ion (penemunya mendapat Nobel Kimia 2019) membuat kendaraan listrik bangkit lagi.



DUA SISI TAMBANG NIKEL

Nikel membuka lapangan kerja dan industri baterai. Namun banyak smelter nikel masih ditenagai PLTU, dan penambangan bisa menggunduli hutan serta mencemari pesisir bila tidak diawasi. Teknologi bersih harus dibuat dengan cara yang bersih pula: reklamasi lahan, smelter berlistrik hijau, dan **daur ulang baterai**. Fisikawan dan insinyur Indonesia dibutuhkan di setiap tahap.



LANJUT · IB

GAYA RADIASI DAN SENSITIVITAS IKLIM

Dampak CO₂ tumbuh secara **logaritmik**: gaya radiasi (tambahan energi yang tertahan) kira-kira $\Delta F \approx 5,35 \ln(C/C_0) \text{ W/m}^2$. Melipatgandakan CO₂ memberi $\Delta F \approx 3,7 \text{ W/m}^2$. Tanpa umpan balik, Bumi cukup menghangat $\pm 1,1\text{--}1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ untuk mengimbangnya (respons Planck). Umpan balik uap air dan es mencair memperbesarnya menjadi $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (perkiraan terbaik, rentang $\pm 2,5\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$). Itulah yang ditiru oleh simulasi neraca energi di atas.

34.8 Aksi kita: literasi energi

Ada dua jenis aksi iklim. **Mitigasi** berarti mengurangi emisi: hemat energi, beralih ke energi terbarukan, menanam dan menjaga hutan serta mangrove. **Adaptasi** berarti menyesuaikan diri dengan perubahan yang sudah terjadi: tanggul dan mangrove di pesisir, rumah panggung, padi tahan banjir atau kekeringan, sistem peringatan dini cuaca ekstrem.

Indonesia menargetkan **emisi nol bersih (net zero) paling lambat 2060**. Target sebesar itu dicapai lewat jutaan keputusan kecil dan beberapa keputusan besar. Kamu bisa ikut di keduanya: kebiasaan di rumah, proyek di sekolah, dan kelak pilihan kariermu.



Janji aksi minggu ini

Pilih aksi yang benar-benar akan kamu lakukan. Angka di kanan adalah perkiraan CO₂ yang dihemat setahun bila dilakukan terus. Pilihanmu tersimpan di perangkat ini.



Mencabut charger dan mematikan stopkontak alat yang tidak dipakai (bukan sekadar standby).

±70 kg



Mematikan mode "hangat" rice cooker setelah nasi matang.

±260 kg

- ☐ Menyetel AC di 25–26 °C (bukan 18–20 °C), atau memakai kipas angin saat cukup sejuk. ±350 kg
- ☐ Berjalan kaki atau bersepeda ke sekolah yang dekat (± 5 km), bukan diantar motor. ±90 kg
- ☐ Mematikan lampu dan kipas setiap keluar kamar. ±40 kg
- ☐ Menanam dan merawat 5 pohon atau bibit mangrove bersama teman. ±110 kg
- ☐ Menghabiskan makanan dan mengambil secukupnya (sampah makanan di TPA menghasilkan metana). ±100 kg

Total hematmu: **0 kg** CO₂ per tahun



Atap putih, rumah sejuk

Atap berwarna terang memantulkan lebih banyak cahaya (albedo tinggi), sehingga ruangan lebih sejuk dan AC tidak bekerja keras.



Mangrove, benteng biru

Mangrove meredam ombak dan rob, serta menyimpan karbon jauh lebih banyak per hektare daripada hutan daratan. Indonesia memiliki hutan mangrove terluas di dunia.



KRL, MRT, dan bus listrik

Satu rangkaian kereta membawa ratusan orang dengan listrik, mengurangi kemacetan sekaligus polusi udara kota.



Sekolah hemat energi

Audit listrik sekolah, PLTS atap, bank sampah, dan kebun sekolah: proyek fisika yang hasilnya bisa diukur dengan meteran!

Cek Cepat

Bumi tanpa gas rumah kaca akan bersuhu sekitar $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mengapa suhu rata-rata Bumi sebenarnya $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Karena inti Bumi memanaskan permukaan dengan sangat kuat.

Karena gas rumah kaca menyerap inframerah dari permukaan dan memancarkan sebagian kembali ke bawah.

Karena lapisan ozon memantulkan panas kembali ke Bumi.

Karena lautan menyimpan panas dari zaman purba.

Kecepatan angin di lokasi A 6 m/s dan di lokasi B 3 m/s . Turbin yang sama di lokasi A menghasilkan daya...

2 kali daya di B

3 kali daya di B

4 kali daya di B

8 kali daya di B

Pembangkit mana yang bisa menyala stabil siang dan malam tanpa membakar bahan bakar?

PLTP (panas bumi)

PLTS tanpa baterai

PLTU batu bara

PLTB di daerah yang jarang berangin

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. D • 3. A



Tantangan Rumah: hitam vs putih di bawah Matahari

Bahan: 2 gelas plastik sama besar, kertas hitam dan kertas putih (atau cat), selotip, air keran, termometer (atau termometer digital masak), stopwatch HP

1. Bungkus satu gelas dengan kertas hitam dan satu lagi dengan kertas putih. Isi keduanya dengan air keran yang sama banyak.
2. Catat suhu awal, lalu letakkan keduanya berdampingan di bawah terik Matahari.
3. Ukur suhu air setiap 5 menit selama 30 menit. Buat tabel dan grafik suhu terhadap waktu untuk kedua gelas.
4. **Keselamatan:** lakukan di tempat aman, pakai topi, minum air, dan jangan menatap Matahari.

Pertanyaan: Gelas mana yang lebih cepat panas? Hubungkan hasilmu dengan **albedo**. Apa yang terjadi pada suhu Bumi jika es kutub yang putih berganti menjadi laut yang gelap? (Petunjuk: ini disebut umpan balik es-albedo.)



RINGKASAN KILAT

Bab 34 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menelusuri **rantai perubahan energi** dari Matahari sampai lampu di rumahmu dan menghitung **efisiensi**
- menjelaskan **efek rumah kaca** lewat neraca energi Bumi, lalu memperkirakan suhu kesetimbangan planet
- membedakan **bukti, penyebab, dan dampak** perubahan iklim, termasuk banjir rob di pesisir utara Jawa
- menghitung daya **panel surya** dan **turbin angin**, serta **jejak karbon** kegiatan sehari-hari
- memilih **aksi hemat energi** yang dampaknya terukur, dari kamar tidur sampai kebijakan negara



Istilah kunci

energi

efisiensi

neraca energi

albedo

Bahan bakar fosil

Energi terbarukan

Jejak karbon

Mitigasi

Adaptasi



Rumus penting

$$T = \left(\frac{S_0 (1 - \alpha)}{4\sigma d^2} \right)^{1/4}$$

Suhu planet tanpa selimut gas rumah kaca.

Energi Matahari yang diserap sama dengan energi panas yang dipancarkan. Makin jauh dari Matahari atau makin terang permukaannya, makin dingin planetnya.

$$P = \eta I A$$

Daya panel surya. Daya listrik = efisiensi × intensitas cahaya × luas panel.

$$P = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) v^3 \eta$$

Daya turbin angin. Angin dua kali lebih kencang membawa daya delapan kali lebih besar!

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{d}{e} \times 2,3 \div n$$

Jejak karbon perjalanan. Setiap liter bensin yang dibakar melepas $\pm 2,3$ kg CO_2 , lalu dibagi rata ke semua penumpang.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Efek rumah kaca itu bukan musuh.
- Asap hitam dari knalpot atau cerobong adalah pencemaran udara: partikel halus (PM2,5), jelaga, dan gas beracun yang merusak paru-paru.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=34

Teka-teki untuk Bab 35

Setiap meter persegi di atas atmosfer Bumi menerima 1.361 W dari Matahari yang berjarak 150 juta km. Dari dua angka ini saja, bisakah kamu menghitung **daya total** yang dipancarkan Matahari? Lalu, dari mana Matahari mendapatkan energi sebesar itu selama 4,6 miliar tahun tanpa pernah "isi bensin"?

▼ Intip petunjuk

Bayangkan sebuah bola raksasa berjari-jari 150 juta km dengan Matahari di pusatnya. Semua cahaya Matahari menembus bola itu, dan luas bola adalah $4\pi r^2$. Untuk sumber energinya, ingat $E = mc^2$ (Bab 31): di inti Matahari, hidrogen dilebur menjadi helium. Selengkapnya di Bab 35: Astrofisika.

35

BAB 35 • FISIKA UNTUK INDONESIA & SEMESTA

Membaca Surat dari Bintang

Cahaya bintang yang kamu lihat malam ini mungkin berangkat sebelum kakek buyutmu lahir. Tanpa pernah ke sana, fisikawan bisa tahu suhu, umur, bahkan nasib bintang itu. Bagaimana caranya? Bab terakhir ini membawamu sejauh mungkin: sampai tepi alam semesta.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan siang-malam, **musim**, **fase Bulan**, **gerhana**, dan **pasang surut** dari gerak Bumi, Bulan, dan Matahari;
- memakai satuan astronomi dan **tahun cahaya**, lalu menghitung waktu tempuh cahaya;
- menjelaskan Matahari sebagai **reaktor fusi** dan menebak suhu bintang dari warnanya (**hukum Wien**);
- membaca **diagram H-R** dan menelusuri siklus hidup bintang sampai katai putih, bintang neutron, atau lubang hitam;
- menjelaskan bukti **alam semesta mengembang** (hukum Hubble) dan menghargai tradisi astronomi Nusantara.

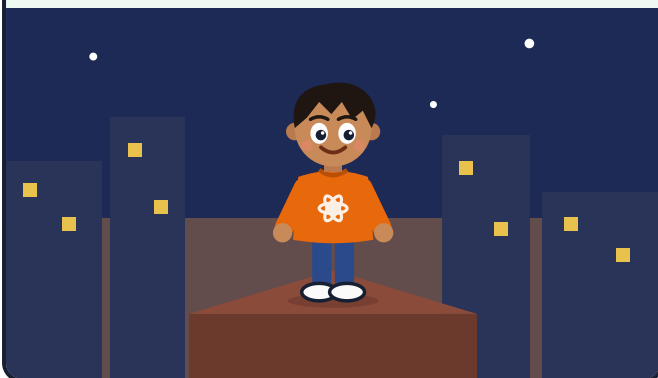
LANGIT KOTA, LANGIT DESA

KOMIK • 4 PANEL

Malam Minggu, atap rumah di Jakarta

RAKA

Bintangnya cuma tiga. Langit kota pelit banget!



Liburan di Lembang, jauh dari lampu kota

RAKA

WAAA! Itu awan atau asap di langit?!

SARI

*Itu **Bimasakti**, galaksi kita sendiri. Kita melihatnya dari dalam!*

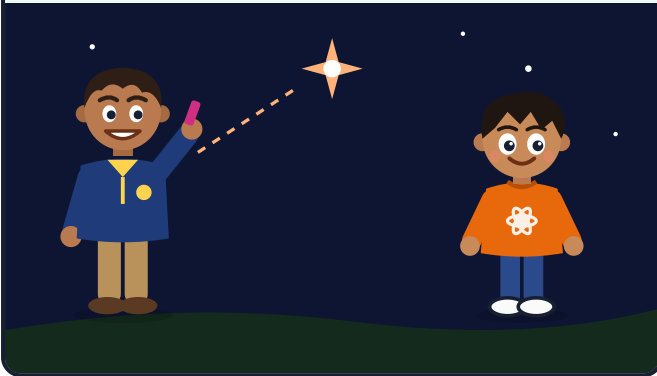


KAK NARA

Cahaya bintang terang itu berangkat ratusan tahun lalu. Malam ini kamu sedang melihat masa lalu!

RAKA

Jadi... bintangnya mungkin sudah nggak ada?



Di dekat kubah teleskop

KAK NARA

Bisa jadi! Malam ini kita jadi detektif bintang: dari cahayanya saja, kita bisa tahu suhu, umur, dan nasib sebuah bintang.

TARSI

Mataku sebesar otakku. Cocok jadi astronom, kan?



Tebak Dulu!

Mengapa Bumi mengalami musim panas dan musim dingin (misalnya di Eropa dan Australia)?

Karena Bumi lebih dekat ke Matahari saat musim panas dan lebih jauh saat musim dingin.

Karena sumbu rotasi Bumi miring $\pm 23,5^\circ$, sehingga sudut datang sinar dan lamanya siang berubah sepanjang tahun.

Karena Matahari kadang-kadang bersinar lebih terang.

Karena Bulan menghalangi sebagian cahaya Matahari pada musim dingin.

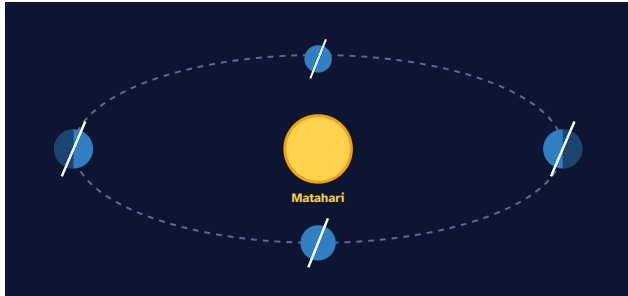
Jawabannya: kemiringan sumbu Bumi. Bukti bahwa jarak bukan penyebabnya: Bumi justru paling dekat ke Matahari pada awal Januari, saat Eropa sedang musim dingin! Lagi pula, ketika belahan utara musim panas, belahan selatan musim dingin pada saat yang sama, padahal jarak keduanya ke Matahari hampir sama. Yang menentukan adalah seberapa tegak sinar Matahari jatuh dan berapa jam siangnya.

35.1 Bumi, Bulan, Matahari: jam raksasa di langit

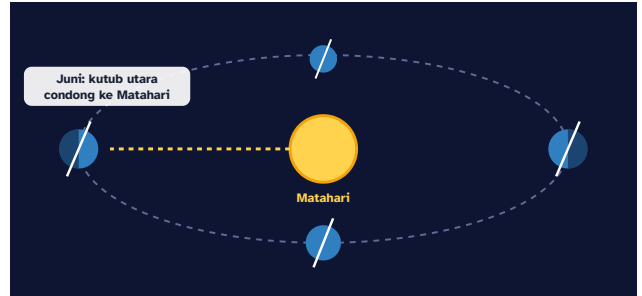
Rotasi Bumi (berputar pada porosnya sekali sehari) membuat siang dan malam. Bumi berputar ke arah timur, sehingga Matahari tampak terbit di timur. Dalam satu jam Bumi berputar 15° . Indonesia membentang $\pm 46^\circ$ bujur

($\pm 95^\circ$ sampai 141° BT), sehingga Matahari terbit di Papua kira-kira tiga jam lebih awal daripada di Aceh. Itulah sebabnya ada tiga zona waktu: WIB, WITA, dan WIT.

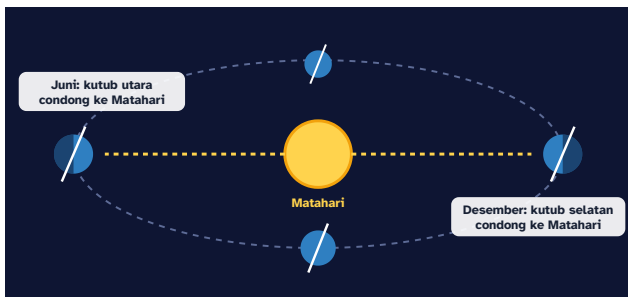
Revolusi Bumi (mengelilingi Matahari sekali setahun) dengan sumbu yang miring $\pm 23,5^\circ$ membuat **musim**. Ikuti animasinya.



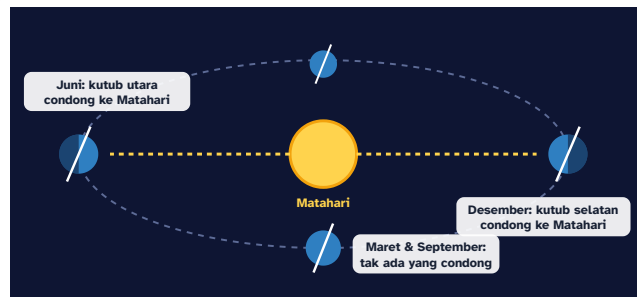
Langkah 1. Bumi mengelilingi Matahari sekali setahun. Sumbu (garis putih) miring $\pm 23,5^\circ$ dan selalu menunjuk ke arah yang sama di langit.



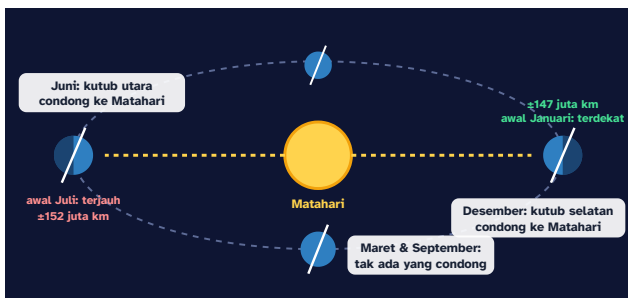
Langkah 2. Sekitar Juni, belahan utara condong ke Matahari: sinar jatuh lebih tegak dan siang lebih panjang. Musim panas di Eropa, musim dingin di Australia.



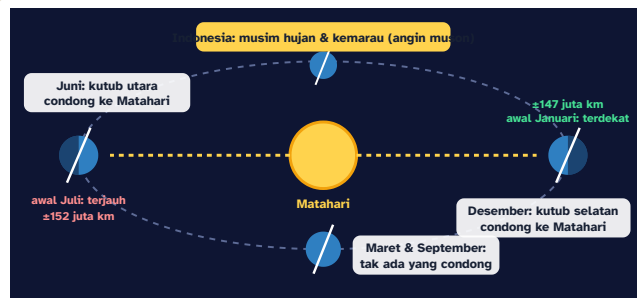
Langkah 3. Sekitar Desember, keadaannya terbalik: belahan selatan condong ke Matahari. Musim panas di Australia, musim dingin di Eropa.



Langkah 4. Sekitar 21 Maret dan 23 September, Matahari tepat di atas khatulistiwa. Di Pontianak, tengah hari tanpa bayangan!



Langkah 5. Jebaknya: Bumi paling dekat ke Matahari pada awal Januari (± 147 juta km) dan paling jauh pada awal Juli (± 152 juta km). Bedanya hanya $\pm 3\%$, bukan penyebab musim.



Langkah 6. Di Indonesia, pergeseran pemanasan ini membalik arah **angin muson**. Hasilnya musim hujan (kira-kira Oktober–April) dan kemarau (kira-kira April–Oktober) di sebagian besar wilayah.



FISIKA INDONESIA: HARI TANPA BAYANGAN

Karena berada di sekitar khatulistiwa, setiap kota di Indonesia mengalami **dua kali setahun** saat Matahari tepat di atas kepala pada tengah hari, sehingga benda tegak tidak berbayang. Di Pontianak, yang dilalui garis khatulistiwa, peristiwa ini terjadi sekitar 21–23 Maret dan 21–23 September dan dirayakan di Tugu Khatulistiwa. Kota lain mengalaminya pada tanggal berbeda tergantung lintangnya; BMKG rutin mengumumkan jadwalnya. Coba berdirikan spidol di halaman sekolah pada tanggal itu!

Fase Bulan dan gerhana

Bulan tidak bercahaya sendiri; ia memantulkan cahaya Matahari. Separuh Bulan selalu terang (menghadap Matahari), tetapi seberapa banyak bagian terang yang *kita lihat* bergantung pada posisi Bulan dalam orbitnya. Satu siklus fase lamanya $\pm 29,5$ hari: dasar kalender Hijriah.



Tebak Dulu!

Mengapa bentuk Bulan berubah-ubah dari sabit sampai purnama?

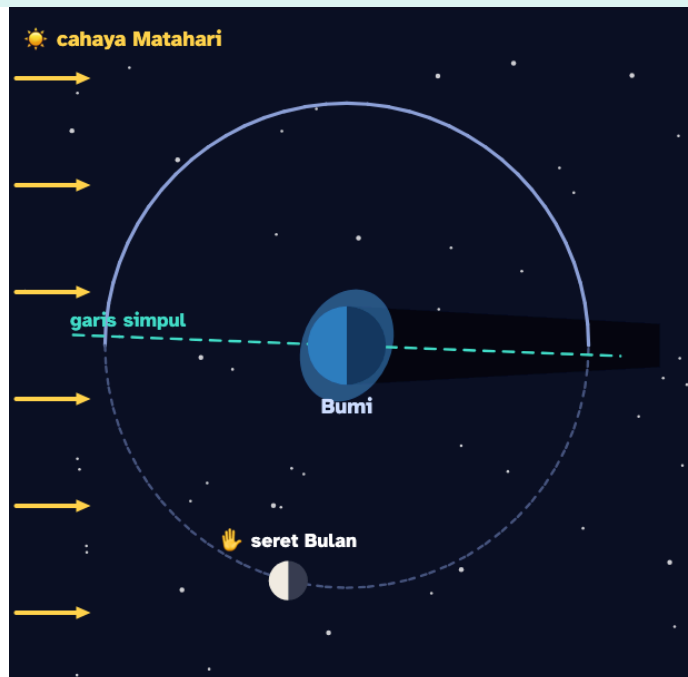
Karena bayangan Bumi menutupi sebagian Bulan.

Karena Bulan benar-benar berubah bentuk.

Karena dari Bumi kita melihat bagian Bulan yang tersinari Matahari dari sudut yang berbeda-beda.

Karena awan menutupi sebagian Bulan.

Jawabannya: sudut pandang kita berubah. Bayangan Bumi hanya mengenai Bulan saat **gerhana Bulan**, yang jarang terjadi. Fase Bulan terjadi setiap bulan karena Bulan beredar mengelilingi Bumi, sehingga kita melihat "separuh terang"-nya dari samping (sabit), separuh (kuartal), atau penuh (purnama). Buktikan sendiri di Lab Mini berikut.



Dilihat dari Bumi



Sabit awal

tampak samping (kemiringan diperbesar)



Fase: Sabit awal

Umur 6,2 hari • terang 38%

Terbit ±11.04 • Pasang perbani (rendah)

Fase

Sabit awal

Umur Bulan

6,2 hari

Bagian terang

38 %

Terbit sekitar

11.04 • terbenam 23.04

Gerhana?

-

Pasang surut

Pasang perbani (rendah)

Seret Bulan mengelilingi Bumi (Matahari jauh di sebelah kiri). Saat Bulan baru atau purnama, apakah selalu terjadi gerhana? Geser **Bulan ke-** untuk mengubah posisi Bumi di orbitnya, lalu matikan **orbit miring**. Perhatikan juga tonjolan air laut: kapan pasangannya paling tinggi?

Bidang orbit Bulan miring $\pm 5^\circ$ terhadap bidang orbit Bumi. Karena itu, saat Bulan baru, Bulan biasanya lewat sedikit di atas atau di bawah Matahari (tidak ada gerhana). **Gerhana Matahari** hanya terjadi jika Bulan baru tepat berada di dekat garis potong kedua bidang itu, dan **gerhana Bulan** jika purnama terjadi di sana. Kebetulan yang indah: Matahari ± 400 kali lebih lebar daripada Bulan, tetapi juga ± 400 kali lebih jauh, sehingga keduanya tampak sama besar di langit.

Bahasa sederhana • Gampangnya: gerhana Matahari = Bulan menutupi Matahari (siang jadi gelap sebentar). Gerhana Bulan = Bulan masuk ke bayangan Bumi (Bulan purnama jadi merah tembaga). Keduanya tidak terjadi setiap bulan karena "jalan" Bulan sedikit miring.

**AWAS JEBAKAN: JANGAN MENATAP MATAHARI!**

Sinar Matahari saat gerhana tidak "beracun". Bahayanya sama seperti hari biasa: menatap Matahari merusak retina tanpa terasa sakit. Saat gerhana kita tergoda menatapnya lama-lama. Gunakan kacamata gerhana bersertifikat atau proyeksi lubang jarum (lihat Tantangan Rumah). Kacamata hitam biasa, film rontgen, atau CD bekas **tidak aman**.



TAMU DARI MASA LALU: DUA GERHANA, DUA SIKAP

Pada 11 Juni 1983, gerhana Matahari total melintasi Jawa. Waktu itu banyak orang diminta tetap di dalam rumah dan menutup jendela karena takut. Pada **9 Maret 2016**, gerhana Matahari total melintasi Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, dan Maluku, termasuk Palu dan Ternate. Kali ini ribuan orang berkumpul di lapangan dengan kaca mata gerhana, para peneliti mengukur korona Matahari, dan turis datang dari luar negeri. Totalitasnya hanya $\pm 1,5\text{--}3$ menit di Indonesia. Pengetahuan mengubah rasa takut menjadi pesta sains!

Pasang surut

Gravitasi Bulan menarik sisi Bumi yang dekat sedikit lebih kuat daripada pusat Bumi, dan menarik sisi yang jauh sedikit lebih lemah. Selisih tarikan inilah (**gaya pasang surut**) yang membuat dua tonjolan air laut: satu menghadap Bulan, satu membelakanginya. Bumi berputar melewati kedua tonjolan, sehingga banyak pantai mengalami dua kali pasang sehari. Matahari juga ikut, dengan efek $\pm 46\%$ dari Bulan. Saat Bulan baru dan purnama, efek keduanya searah: **pasang purnama** yang tinggi. Saat kuartal pertama dan terakhir, saling melemahkan: **pasang perbani**. Ingat Bab 34? Banjir rob paling parah sering terjadi saat pasang purnama.

KERJAKAN BERSAMA Matahari terbit di Jayapura dan Banda Aceh

Suatu hari Matahari terbit di Jayapura ($\pm 140,7^\circ$ BT) pukul 05.30 WIT. Kira-kira pukul berapa Matahari terbit di Banda Aceh ($\pm 95,3^\circ$ BT), dinyatakan dalam WIB? Anggap keduanya dekat khatulistiwa.

- 1 Selisih bujur: $140,7^\circ - 95,3^\circ = 45,4^\circ$.
- 2 Bumi berputar 15° per jam, jadi selisih waktunya $45,4/15 \approx 3,03$ jam ≈ 3 jam 2 menit.
- 3 05.30 WIT sama dengan 03.30 WIB (WIT = WIB + 2 jam). Ditambah 3 jam 2 menit: ± 06.32 WIB.

Sekitar pukul 06.32 WIB. Walaupun satu zona waktu dengan Jakarta, Matahari di Aceh terbit jauh lebih "siang" karena Aceh berada di ujung barat zona WIB.

35.2 Tata surya dan skala jarak kosmik

Jarak di antariksa sangat besar, sehingga kilometer terasa terlalu kecil. Astronom memakai:

- **Satuan astronomi (SA):** jarak rata-rata Bumi–Matahari, ± 150 juta km ($1,496 \times 10^{11}$ m).
- **Tahun cahaya:** jarak yang ditempuh cahaya dalam setahun, $\pm 9,46 \times 10^{12}$ km. Ingat, tahun cahaya adalah satuan **jarak**, bukan waktu!

Benda	Jarak dari Matahari	Waktu tempuh cahaya Matahari	Diameter ($\times$ Bumi)
-------	---------------------	------------------------------	---------------------------

Merkurius	0,39 SA	3,2 menit	0,38
Venus	0,72 SA	6,0 menit	0,95
Bumi	1 SA	8,3 menit	1
Mars	1,52 SA	12,7 menit	0,53
Jupiter	5,2 SA	43 menit	11,0
Saturnus	9,5 SA	79 menit	9,1
Uranus	19,2 SA	2,7 jam	4,0
Neptunus	30,1 SA	4,2 jam	3,9
Proxima Centauri (bintang terdekat setelah Matahari)	± 268.000 SA = 4,24 tahun cahaya	4,24 tahun	$\pm 0,15 \times$ Matahari

$$t = \frac{d}{c}$$

Cahaya super cepat, tetapi alam semesta super luas. Melihat jauh berarti melihat masa lalu.



Cahaya butuh **499** detik untuk menempuh **$1,496 \times 10^8$** km. Lihat Satuan Nusantara di bawah sebagai pembandingan!

Satuan Nusantara: $\approx 14\%$ dari satu jam $\cdot \approx 8,3 \times$ satu menit $\cdot \approx 1.663 \times$ kedipan mata

Cek satuan: $\frac{\text{km}}{\text{km/s}} = \text{s}$, dengan $c \approx 299\,792 \text{ km/s}$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ASTRO-CAHAYA

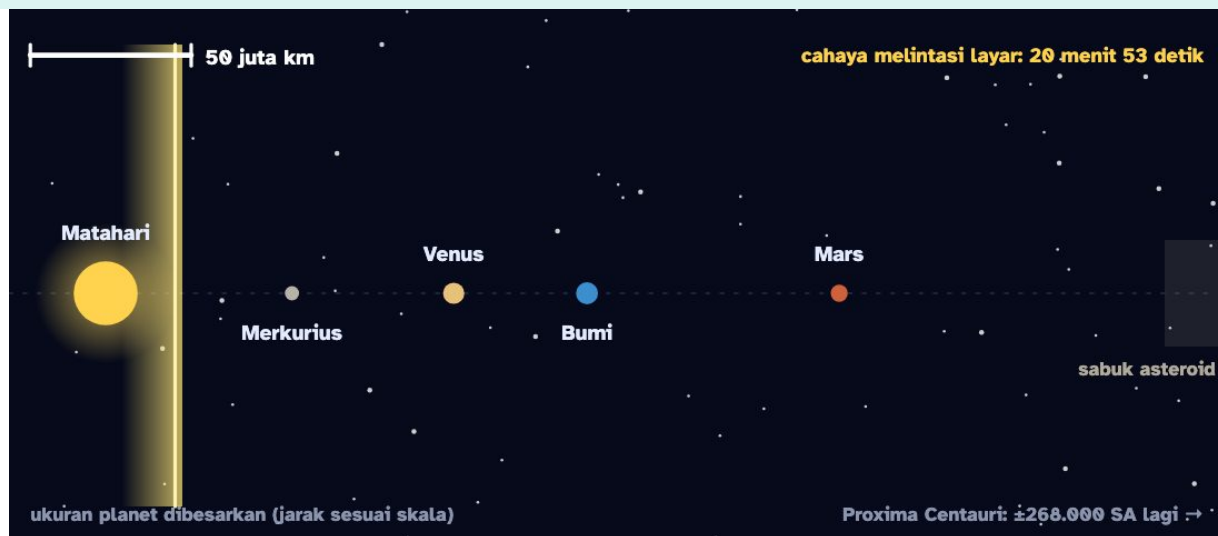
CONTOH Delapan menit masa lalu

Jarak Bumi-Matahari $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ dan cepat rambat cahaya $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Berapa lama cahaya Matahari sampai ke Bumi?

$$1 \quad t = \frac{d}{c} = \frac{1,5 \times 10^{11}}{3 \times 10^8} = 500 \text{ s.}$$

$$2 \quad 500 \text{ s} = 8 \text{ menit } 20 \text{ detik.}$$

8 menit 20 detik. Matahari yang kamu lihat adalah Matahari 8 menit yang lalu!



Lebar layar

2,51 SA = 375,8 juta km

Waktu sejak kilatan

1 menit 12 detik

Cahaya sudah menempuh

21,6 juta km (0,144 SA)

Baru saja melewati

Matahari

Geser **lebar layar** dari sistem Bumi–Bulan sampai seluruh tata surya. Seret kanvas ke kiri atau kanan untuk menggeser. Nyalakan **ukuran asli**: masih kelihatankah planetnya? Lalu kirim kilatan cahaya dari Matahari dan percepat waktunya.

🧪 Bintang ulang tahunmu

Berapa umurmu? Kita cari bintang yang cahayanya berangkat **saat kamu lahir** dan baru tiba di matamu malam ini.

Umurku tahun

★ **τ Ceti** · ±11,9 tahun cahaya (bintang yang mirip Matahari).

Cahaya τ Ceti yang masuk ke matamu malam ini berangkat sekitar tahun **2014**, kira-kira saat kamu lahir! 🎂



MODEL TATA SURYA SEUKURAN LAPANGAN

Jika Matahari sebesar bola sepak (diameter 22 cm), Bumi hanyalah butir merica (±2 mm) sejauh ±24 m, kira-kira sepanjang lapangan tenis. Neptunus berada ±700 m jauhnya. Bintang terdekat, Proxima Centauri, berada ±6.300 km jauhnya: lebih jauh daripada jarak Sabang ke Merauke! Tata surya ternyata hampir seluruhnya ruang kosong.



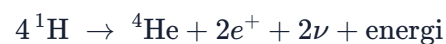
LANJUT • IB

PARALAKS DAN PARSEK

Saat Bumi berpindah dari satu sisi orbitnya ke sisi lain (berjarak 2 SA), bintang dekat tampak bergeser sedikit terhadap bintang-bintang yang jauh. Setengah sudut pergeseran itu disebut sudut paralaks p . Jika p dalam detik busur, jaraknya $d = 1/p$ parsek. Satu **parsek** (pc) $\approx 3,26$ tahun cahaya $\approx 206\,265$ SA. Proxima Centauri memiliki $p \approx 0,77''$, jadi $d \approx 1,3$ pc. Sudut sekecil itu setara melihat koin dari jarak ± 5 km!

35.3 Matahari: reaktor fusi raksasa

Matahari adalah bola gas panas (sebagian besar hidrogen dan helium) yang diameternya ± 109 kali Bumi. Suhu permukaannya ± 5.800 K, sedangkan intinya ± 15 juta K dengan tekanan sangat besar. Di inti itulah terjadi **fusi nuklir**: inti-inti hidrogen bergabung menjadi helium.



Massa satu inti helium $\pm 0,7\%$ lebih kecil daripada massa empat inti hidrogen. Massa yang "hilang" itu berubah menjadi energi sesuai $E = \Delta m c^2$ (Bab 31). Setiap detik Matahari melebur ± 600 juta ton hidrogen dan mengubah ± 4 juta ton massa menjadi energi. Walaupun begitu, selama 4,6 miliar tahun Matahari baru kehilangan $\pm 0,03\%$ massanya.

Mengapa Matahari tidak meledak dan tidak runtuh? Karena **gravitasi** yang menarik ke dalam diimbangi **tekanan gas dan radiasi** yang mendorong ke luar. Keseimbangan ini membuat Matahari stabil selama miliaran tahun.

Bahasa sederhana • Gampangnya: Matahari seperti kompor raksasa yang tidak membakar bensin, melainkan "menempelkan" atom hidrogen menjadi helium. Sedikit massanya berubah menjadi energi yang sangat besar, lalu sampai ke Bumi sebagai cahaya dan kehangatan.

Di jarak Bumi ($d = 1,5 \times 10^{11}$ m), setiap m^2 menerima 1.360 W dari Matahari. Berapa daya total yang dipancarkan Matahari, dan berapa kilogram massa yang berubah menjadi energi setiap detik ($c = 3 \times 10^8$ m/s)?

1 Bayangkan bola berjari-jari d mengelilingi Matahari. Semua cahaya Matahari menembus bola itu, yang luasnya $4\pi d^2$.

2 $L = 1\,360 \times 4\pi(1,5 \times 10^{11})^2 \approx 3,8 \times 10^{26}$ W.

3 Massa per detik: $\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{L}{c^2} = \frac{3,8 \times 10^{26}}{9 \times 10^{16}} \approx 4,3 \times 10^9$ kg/s.

Daya Matahari $\pm 3,8 \times 10^{26}$ W, setara $\pm 4,3$ juta ton massa per detik yang berubah menjadi energi. Inilah jawaban teka-teki Bab 34!



LANJUT • OLIMPIADE

FUSI BUTUH TEROWONGAN KUANTUM

Dua proton saling tolak secara listrik. Agar cukup dekat untuk dilekatkan gaya kuat, menurut fisika klasik diperlukan suhu ± 10 miliar K, padahal inti Matahari "hanya" 15 juta K. Kuncinya adalah **efek terowongan kuantum**: proton punya peluang kecil menembus dinding tolakan itu (Bab 28).

Peluangnya sangat kecil, sehingga fusi di Matahari berjalan pelan dan Matahari bisa bertahan ± 10 miliar tahun. Selain itu, cahaya yang lahir di inti butuh puluhan ribu sampai ratusan ribu tahun untuk "berjalan acak" sampai ke permukaan, lalu hanya ± 8 menit menuju Bumi.



Panel surya = fusi bekas

Listrik dari PLTS sebenarnya berasal dari energi fusi di inti Matahari, yang menempuh perjalanan puluhan ribu tahun di dalam Matahari dan 8 menit di antariksa.



Cuaca antariksa

Badai Matahari dapat mengganggu sinyal GPS, radio, dan satelit. Indonesia memantaunya lewat pusat riset antariksa BRIN.



Jadwal salat

Waktu salat dihitung dari posisi Matahari di langit, misalnya waktu Subuh saat Matahari masih $\pm 20^\circ$ di bawah ufuk.



Tabel pasang surut

Nelayan dan pelabuhan memakai ramalan pasang surut dari posisi Bulan dan Matahari untuk berlayar dengan aman.

35.4 Bintang: terang, warna, dan suhu

Seberapa terang bintang *tampak* dari Bumi (kecerlangan tampak) bergantung pada dua hal: daya pancar sesungguhnya (**luminositas** L) dan jaraknya. Kecerlangan tampak $b = \frac{L}{4\pi d^2}$ mengikuti hukum kuadrat terbalik. Jadi bintang yang tampak redup bisa jadi raksasa yang sangat jauh.

Warna adalah termometer bintang

Ingat besi yang dipanaskan pandai besi (Bab 15): mula-mula merah, lalu oranye, kuning, dan makin panas makin keputihan. Bintang juga begitu. Bintang memancarkan spektrum benda hitam, dan panjang gelombang puncaknya berbanding terbalik dengan suhunya: **hukum pergeseran Wien**.

$$T = \frac{b}{\lambda_{\text{maks}}}$$

Makin pendek panjang gelombang puncaknya, makin panas bintangnya: biru itu panas, merah itu relatif dingin.

 λ_{maks}

Panjang gelombang puncak nm

 T

Suhu permukaan K

SUHU PERMUKAAN

5.773

K

Puncak pancaran di **502** nm berarti suhu permukaan **±5.773** K. Matahari memuncak di **±500** nm (hijau kebiruan) dengan suhu **±5.800** K.

Cek satuan: $b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K} = 2,898 \times 10^6 \text{ nm K}$, jadi $\frac{\text{nm K}}{\text{nm}} = \text{K}$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ASTRO-WIEN



KENAPA TIDAK ADA BINTANG HIJAU?

Matahari justru memancarkan paling banyak cahaya hijau kebiruan! Tetapi bintang memancarkan *semua* warna sekaligus dengan kurva yang lebar. Bintang yang puncaknya di hijau juga memancarkan cukup banyak merah dan biru, sehingga mata kita melihatnya putih. Bintang hanya tampak merah jika ia dingin (puncak di inframerah) atau biru jika sangat panas (puncak di ultraungu).



TRIK KAK NARA: URUTAN KELAS BINTANG

Astronom mengelompokkan bintang dari yang terpanas: **O B A F G K M**. Hafalkan dengan: "Oh, Betapa Asyiknya Fisika: Gampang, Kok, Mantap!" Kelas O biru (>30.000 K), B biru-putih, A putih, F kuning-putih, G kuning (Matahari: G2, ±5.800 K), K oranye, dan M merah (<3.700 K).



TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1900, **Annie Jump Cannon** di Observatorium Harvard mengelompokkan ratusan ribu spektrum bintang dan menyusun urutan OBAFGKM yang masih dipakai sampai sekarang. Tahun 1925, **Cecilia Payne** menunjukkan dalam disertasinya bahwa bintang sebagian besar tersusun dari hidrogen dan helium. Banyak ilmuwan senior awalnya tidak percaya, tetapi data spektrum membuktikan ia benar. Fisika menghargai bukti, bukan nama besar.

Ukuran bintang juga menentukan dayanya. Bintang memancar hampir seperti benda hitam, jadi luminositasnya mengikuti hukum Stefan-Boltzmann: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$. Agar mudah dibandingkan, kita nyatakan dalam satuan Matahari.

RUMUS HIDUP

Daya pancar bintang (Stefan-Boltzmann)

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4$$

Bintang yang besar atau panas bersinar sangat terang. Suhunya dipangkatkan empat: dua kali lebih panas berarti 16 kali lebih terang!

$R/R_{\odot}$

Jari-jari (× jari-jari Matahari)

T

Suhu permukaan K

$L/L_{\odot}$

Luminositas (× Matahari) × Matahari

LUMINOSITAS (× MATAHARI)

1,02

× Matahari

Bintang berjari-jari **1** kali Matahari dengan suhu **5.800 K** memancarkan daya **1,02** kali daya Matahari.

Cek satuan: Rumus aslinya $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ dalam watt. Dibagi dengan nilai Matahari, faktor $4\pi\sigma$ saling meniadakan.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ASTRO-LUMINOSITAS

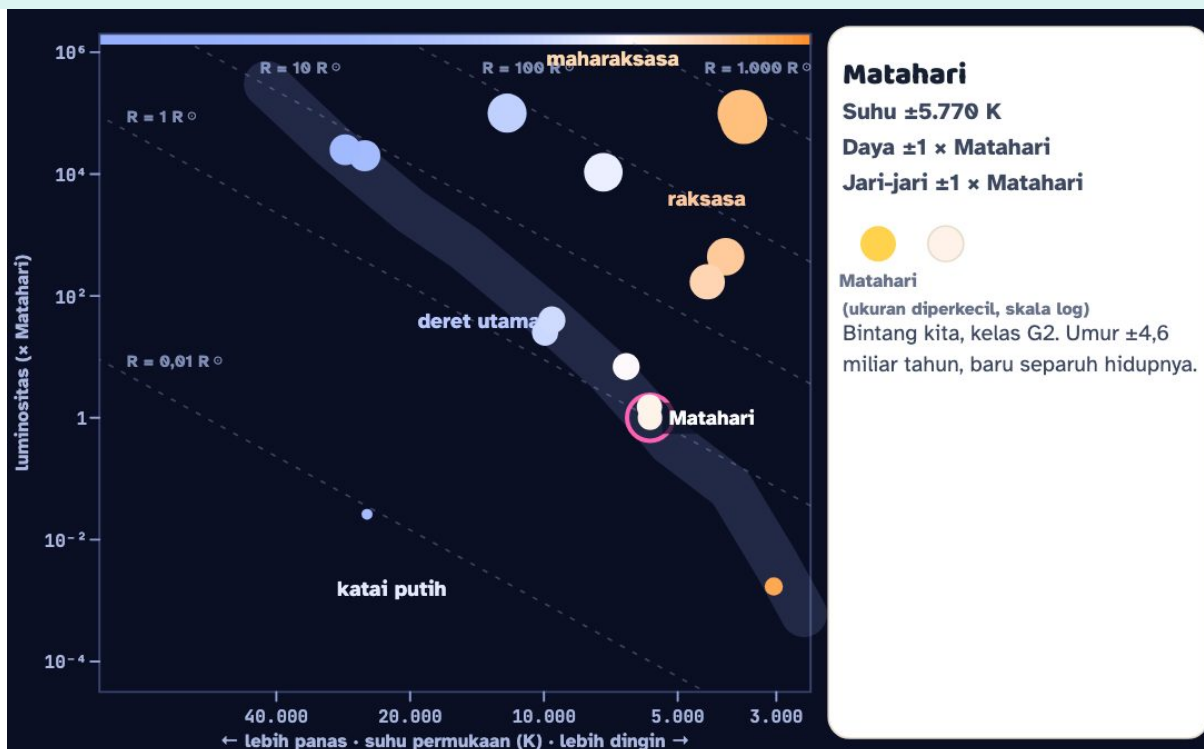
Diagram Hertzsprung–Russell (H-R)

Sekitar tahun 1910, Ejnar Hertzsprung dan Henry Norris Russell menggambar luminositas bintang terhadap suhunya. Hasilnya bukan titik acak, melainkan pola: sebagian besar bintang berada pada pita diagonal yang disebut **deret utama**. Di kanan atas ada **raksasa** dan **maharaksasa** (dingin tetapi sangat terang, jadi pasti sangat besar), dan di kiri bawah ada **katai putih** (panas tetapi redup, jadi sangat kecil). Perhatikan: sumbu suhu dibalik, yang panas di kiri!

LAB MINI

Diagram H-R: kenali bintang dan ikuti hidupnya

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



Bintang / tahap

Matahari

Suhu

5.772 K

Luminositas

1 $\times$ Matahari

Jari-jari

1 $\times$ Matahari

Mode **Bintang terkenal**: ketuk sebuah bintang untuk melihat suhu, luminositas, dan ukurannya. Mode **Siklus hidup**: pilih massa bintang, lalu jalankan atau seret bintangnya sepanjang lintasan hidupnya. Bandingkan bintang 1 dan 20 massa Matahari: mana yang berumur lebih panjang?

Suhu permukaan Betelgeuse ± 3.600 K, sedangkan Rigel ± 12.000 K ($b = 2,9 \times 10^{-3}$ m K). Hitung panjang gelombang puncak masing-masing. Warna apa yang kira-kira kita lihat?

1 Betelgeuse: $\lambda_{\text{maks}} = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{3\,600} \approx 8,1 \times 10^{-7} \text{ m} = 810 \text{ nm}$ (inframerah dekat).

2 Rigel: $\lambda_{\text{maks}} = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{12\,000} \approx 2,4 \times 10^{-7} \text{ m} = 240 \text{ nm}$ (ultraungu).

Betelgeuse memuncak di inframerah, jadi cahaya tampaknya didominasi merah-oranye. Rigel memuncak di ultraungu, jadi tampak biru-putih. Keduanya ada di rasi Orion; coba bandingkan warnanya di langit malam!

Bintang A dan B memiliki luminositas yang sama, tetapi suhu permukaan A dua kali suhu B. Berapa perbandingan jari-jari $R_A : R_B$?

1 $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ sama untuk keduanya, jadi $R_A^2 T_A^4 = R_B^2 T_B^4$.

2 $\frac{R_A}{R_B} = \left(\frac{T_B}{T_A}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$.

$R_A : R_B = 1 : 4$. Bintang yang lebih panas harus jauh lebih kecil agar sama terang. Inilah cara diagram H-R "mengukur" ukuran bintang tanpa menyentuhnya.

MITOS

"Bintang berkelap-kelip karena cahayanya berdenyut."

MITOS

"Bintang Utara (Polaris) adalah bintang paling terang dan selalu jadi penunjuk arah."

FAKTA

Kelap-kelip terjadi karena cahaya bintang melewati udara Bumi yang bergolak dan berbeda-beda suhunya, sehingga arahnya terus dibelokkan sedikit. Dari luar angkasa, bintang tidak berkelap-kelip. Planet jarang berkelip karena tampak sebagai cakram kecil, bukan titik.

FAKTA

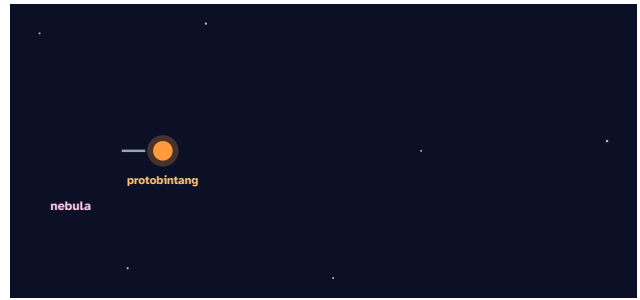
Polaris hanya sekitar bintang ke-50 paling terang. Bintang malam paling terang adalah Sirius. Dari sebagian besar Indonesia (selatan khatulistiwa), Polaris bahkan berada di bawah ufuk. Pelaut Nusantara memakai rasi lain, seperti rasi Pari (Crux) untuk arah selatan.

35.5 Siklus hidup bintang

Bintang lahir, hidup, dan mati. Yang menentukan nasibnya hampir hanya satu hal: **massanya**.



Langkah 1. Bintang lahir di **nebula**, awan raksasa gas dan debu. Bagian yang sedikit lebih padat mulai runtuh karena gravitasinya sendiri.



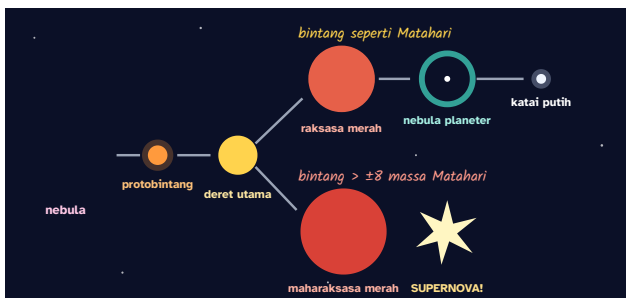
Langkah 2. Gas yang runtuh memanaskan menjadi **protobintang**. Ketika intinya mencapai ± 10 juta K, fusi hidrogen menyala.



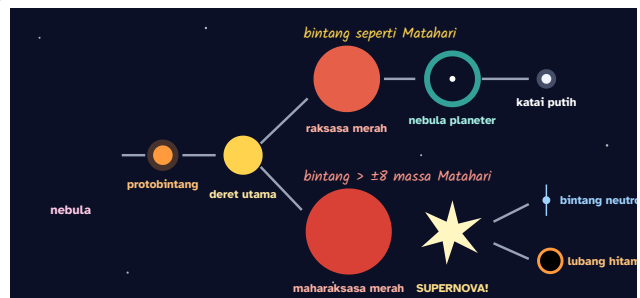
Langkah 3. Bintang memasuki **deret utama**: gravitasi ke dalam seimbang dengan tekanan ke luar. Bintang menghabiskan $\pm 90\%$ hidupnya di sini.



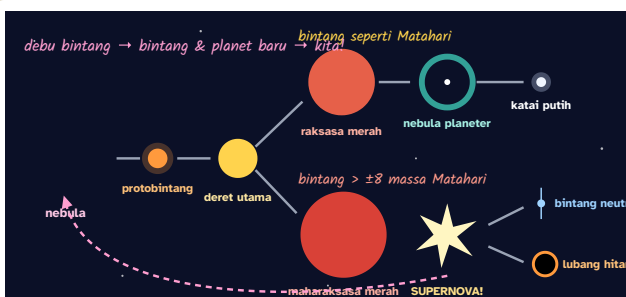
Langkah 4. Bintang seperti Matahari kehabisan hidrogen di intinya, lalu mengembang menjadi **raksasa merah**. Lapisan luarnya terlepas menjadi **nebula planeter**, dan intinya tersisa sebagai **katai putih** seukuran Bumi.



Langkah 5. Bintang yang lebih dari ± 8 kali massa Matahari menjadi **maharaksasa merah** dan membuat unsur sampai besi di intinya. Besi tidak bisa lagi menghasilkan energi lewat fusi, sehingga inti runtuh dalam sekejap dan memantul: **supernova!**



Langkah 6. Sisa intinya menjadi **bintang neutron** (diameter ± 20 km) atau, jika terlalu masif, **lubang hitam** yang gravitasinya bahkan menahan cahaya.



Langkah 7. Ledakan menyebarkan unsur-unsur berat ke nebula baru. Dari debu bintang itu lahir bintang dan planet generasi berikutnya, termasuk Bumi dan tubuhmu!

$$t \approx 10^{10} \text{ tahun} \times \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2,5}$$

*Bintang raksasa punya bahan bakar lebih banyak, tetapi memborosnya jauh lebih cepat.
Yang besar justru berumur pendek!*

 $M/M_{\odot}$

Massa bintang (× massa Matahari)

 t

Umur di deret utama tahun

UMUR DI DERET UTAMA

 1×10^{10}

tahun

Bintang bermassa **1** kali Matahari menyala di deret utama sekitar **1×10^{10}** tahun.

Matahari: ±10 miliar tahun, dan kini baru berumur 4,6 miliar tahun.

Cek satuan: Bahan bakar sebanding M , sedangkan luminositas kira-kira $L \propto M^{3,5}$. Jadi umur $\propto M/L \propto M^{-2,5}$. Ini perkiraan kasar.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ASTRO-UMUR



Tebak Dulu!

Seandainya Matahari tiba-tiba diganti lubang hitam bermassa sama persis, apa yang terjadi pada orbit Bumi?

Bumi langsung tersedot ke dalam lubang hitam.

Bumi terlempar keluar dari tata surya.

Orbit Bumi tetap sama (walaupun Bumi menjadi gelap dan membeku).

Bumi mengorbit lebih cepat karena lubang hitam lebih kuat.

Orbitnya tetap sama! Gaya gravitasi hanya bergantung pada massa dan jarak (Bab 11): $F = GMm/r^2$. Massa sama dan jarak sama berarti gaya sama. Lubang hitam baru "mengerikan" jika kamu sangat dekat dengannya. Lubang hitam bermassa Matahari hanya berjari-jari ± 3 km. Masalah sebenarnya bagi Bumi: tidak ada lagi cahaya dan kehangatan.



AWAS JEBAKAN: LUBANG HITAM BUKAN PENYEDOT DEBU KOSMIK

Lubang hitam bukan "lubang" atau terowongan, dan tidak menyedot semua benda di alam semesta. Lubang hitam adalah massa yang sangat padat, sehingga di dekatnya kecepatan lepas melebihi kecepatan cahaya. Dari jauh, tarikan gravitasinya sama saja dengan benda lain bermassa sama.



LANJUT • OLIMPIADE

JARI-JARI SCHWARZSCHILD

Kecepatan lepas dari permukaan benda bermassa M berjari-jari R adalah $v = \sqrt{2GM/R}$ (Bab 11). Samakan dengan c : $R_s = \frac{2GM}{c^2}$. Perhitungan Newton ini kebetulan memberi hasil yang sama dengan relativitas umum. Untuk Matahari $R_s \approx 3$ km; untuk Bumi hanya ± 9 mm, sebesar kelereng! Di dekat lubang hitam, beda tarikan antara kaki dan kepala sangat besar, sehingga benda ditarik memanjang seperti mi ("spagetifikasi").



TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1930, **Subrahmanyan Chandrasekhar**, pemuda India berusia 19 tahun, menghitung di atas kapal menuju Inggris bahwa katai putih tidak bisa lebih berat dari $\pm 1,4$ massa Matahari (batas Chandrasekhar). Idenya sempat ditertawakan, tetapi kemudian terbukti dan ia meraih Nobel 1983. Tahun 1967, mahasiswa **Jocelyn Bell Burnell** menemukan denyut radio yang sangat teratur: pulsar, bintang neutron yang berputar. Tahun 2019, jaringan teleskop radio di seluruh dunia (*Event Horizon Telescope*) memotret bayangan lubang hitam untuk pertama kalinya.



KAMU TERBUAT DARI DEBU BINTANG

Hidrogen di dalam air yang kamu minum terbentuk tak lama setelah Big Bang, $\pm 13,8$ miliar tahun lalu. Karbon di sel-selmu dan oksigen yang kamu hirup ditempa di dalam bintang. Besi di darahmu dan kalsium di tulangmu berasal dari bintang yang meledak, dan sebagian emas di bumi diduga lahir dari tabrakan bintang neutron. Jadi, secara harfiah, kamu adalah debu bintang yang bisa belajar fisika!

35.6 Galaksi dan alam semesta yang mengembang

Matahari hanyalah satu dari 100–400 miliar bintang di galaksi kita, **Bimasakti**, piringan raksasa berdiameter ± 100.000 tahun cahaya. Tata surya berada ± 26.000 tahun cahaya dari pusatnya dan mengitarinya sekali dalam ± 230 juta tahun. Dari Indonesia, pusat Bimasakti (di arah rasi Sagitarius) tampak tinggi di langit sekitar Juni–Agustus. Galaksi besar terdekat, **Andromeda**, berjarak $\pm 2,5$ juta tahun cahaya dan bisa dilihat dengan mata telanjang di langit yang gelap. Di alam semesta teramati ada ratusan miliar galaksi atau lebih.

Pergeseran merah: galaksi-galaksi menjauh

Ingat garis spektrum unsur (Bab 29) dan efek Doppler (Bab 19)? Garis-garis spektrum galaksi jauh selalu bergeser ke arah **merah** (panjang gelombang lebih panjang). Artinya galaksi-galaksi itu menjauh dari kita. Untuk kecepatan yang jauh lebih kecil dari cahaya:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c}$$

Spektrum hidrogen di laboratorium (diam)



H β 486 nm

H α 656 nm

Spektrum galaksi jauh ($z = 0,05$)



bergeser ke merah

380 nm

H α 656 $\rightarrow$ 689 nm, H β 486 $\rightarrow$ 510 nm: $v \approx 0,05c \approx 15.000$ km/s

750 nm

Pola garisnya sama (sidik jari hidrogen), tetapi semuanya bergeser dengan faktor yang sama $1 + z$. Itulah tanda galaksi menjauh.

Tahun 1929, **Edwin Hubble** menemukan pola mengejutkan: makin jauh sebuah galaksi, makin cepat ia menjauh. Ini dikenal sebagai **hukum Hubble–Lemaître**.

$$v = H_0 d$$

Makin jauh sebuah galaksi, makin cepat ia menjauh dari kita.

 H_0

Konstanta Hubble km/s/Mpc

 d

Jarak galaksi Mpc

 v

Kecepatan menjauh km/s

KECEPATAN MENJAUH

7.000

km/s

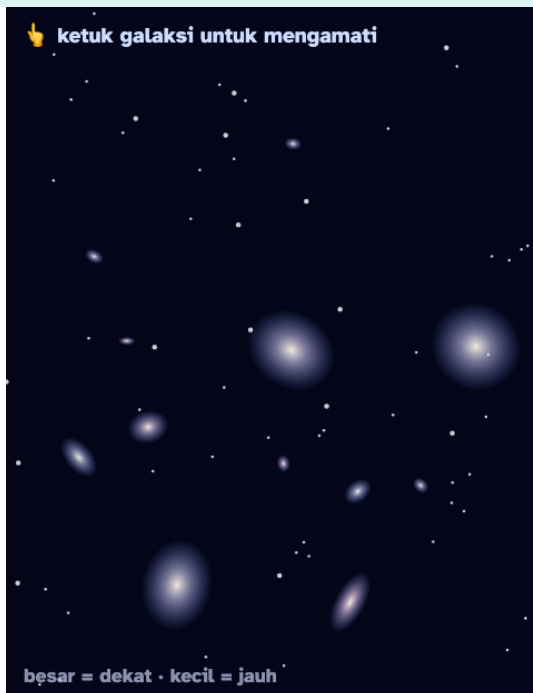
Galaksi sejauh **100** Mpc menjauh dengan kecepatan ± 7.000 km/s. Umur alam semesta kira-kira $1/H_0 \approx 978/70$ miliar tahun.

$$\text{Cek satuan: } \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}} \times \text{Mpc} = \text{km/s.}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ASTRO-HUBBLE

Apakah berarti kita berada di pusat alam semesta? Tidak! Bayangkan adonan roti kismis yang mengembang di oven. Dari kismis mana pun, kismis lain tampak menjauh, dan yang jauh menjauh lebih cepat. Alam semesta tidak mengembang *ke dalam* ruang kosong; **ruang itu sendiri** yang meregang. Jika diputar mundur, semuanya pernah sangat panas dan padat $\pm 13,8$ miliar tahun lalu: **Big Bang**.

👉 ketuk galaksi untuk mengamati



besar = dekat • kecil = jauh

Spektrum: pilih sebuah galaksi dulu



H α lab 656,3 nm



Galaksi diukur

0

H $_0$ garismu

50 km/s/Mpc

Umur $\approx 1/H_0$

19,6 miliar tahun

H $_0$ terbaik dari data

butuh ≥ 3 galaksi

Ketuk galaksi untuk mengamati spektrumnya. Pergeseran garis H α memberi kecepatan, dan "lilin standar" memberi jaraknya. Kumpulkan minimal 4 galaksi, lalu **seret garis** agar paling cocok dengan titik-titik data. Kemiringannya adalah H_0 . Berapa umur alam semesta menurut datamu?

KERJAKAN BERSAMA

Dari spektrum ke jarak

Garis H α (656,3 nm) pada spektrum sebuah galaksi teramati di 669,4 nm. Dengan $H_0 = 70$ km/s/Mpc dan $c = 3 \times 10^5$ km/s, berapa kecepatan menjauh dan jarak galaksi itu?

$$1 \quad z = \frac{669,4 - 656,3}{656,3} = \frac{13,1}{656,3} \approx 0,020.$$

$$2 \quad v \approx zc = 0,020 \times 3 \times 10^5 \approx 6\,000 \text{ km/s.}$$

$$3 \quad d = \frac{v}{H_0} = \frac{6\,000}{70} \approx 86 \text{ Mpc} \approx 280 \text{ juta tahun cahaya.}$$

Galaksi itu menjauh ± 6.000 km/s dan berjarak ± 86 Mpc. Cahaya yang kita lihat berangkat ± 280 juta tahun lalu, bahkan sebelum dinosaurus pertama muncul di Bumi!

COBA SENDIRI Umur alam semesta dari satu angka

Jika galaksi selalu menjauh dengan kecepatan tetap, waktu sejak semuanya berimpit adalah $t = d/v = 1/H_0$. Hitung $1/H_0$ untuk $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$ dalam miliar tahun (1 Mpc = $3,086 \times 10^{19} \text{ km}$, 1 tahun = $3,156 \times 10^7 \text{ s}$).

1 $\frac{1}{H_0} = \frac{3,086 \times 10^{19} \text{ km}}{70 \text{ km/s}} \approx 4,41 \times 10^{17} \text{ s}.$

2 Dibagi detik per tahun: $\frac{4,41 \times 10^{17}}{3,156 \times 10^7} \approx 1,40 \times 10^{10} \text{ tahun}.$

± 14 miliar tahun, sangat dekat dengan umur hasil pengukuran modern (13,8 miliar tahun). Perhitungan sederhana ini mengabaikan perubahan laju pengembangan, tetapi menebak angka yang benar!

Bukti Big Bang tidak hanya pergeseran merah. Tahun 1965, Arno Penzias dan Robert Wilson menangkap **radiasi latar gelombang mikro kosmik**: "sisa cahaya" Big Bang yang kini dingin, $\pm 2,7 \text{ K}$, dengan puncak di panjang gelombang $\pm 1 \text{ mm}$ (hukum Wien lagi!). Sebagian kecil "semut" di layar TV analog lama berasal dari radiasi ini. Bukti ketiga: perbandingan hidrogen dan helium di alam semesta ($\pm 3 : 1$ menurut massa) cocok dengan perhitungan fusi pada menit-menit pertama.



TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1912, **Henrietta Leavitt** menemukan bahwa bintang Cepheid yang berdenyut lebih lambat ternyata lebih terang. Penemuannya menjadi "penggaris" untuk mengukur jarak galaksi. Tahun 1927, pastor sekaligus fisikawan Belgia **Georges Lemaître** sudah menurunkan bahwa alam semesta mengembang. Dua tahun kemudian, Hubble memakai Cepheid untuk membuktikannya dengan data. Sejak 2018, para astronom menamainya hukum Hubble–Lemaître.

MITOS

"Big Bang adalah ledakan bom di satu titik di ruang angkasa."

MITOS

"Di luar angkasa tidak ada gravitasi."

FAKTA

Big Bang bukan ledakan *di dalam* ruang, melainkan pengembangan ruang itu sendiri, terjadi di mana-mana sekaligus. Tidak ada "pusat ledakan" yang bisa ditunjuk.

FAKTA

Gravitasi ada di mana-mana dan menahan Bulan, planet, serta galaksi. Astronot di stasiun luar angkasa melayang karena terus-menerus jatuh mengelilingi Bumi (Bab 11), bukan karena gravitasinya nol.



LANJUT · IB

PERGESERAN MERAH KOSMOLOGIS

Untuk galaksi sangat jauh, z bisa lebih dari 1, dan rumus $v = zc$ tidak lagi berlaku. Pergeseran merah kosmologis sebenarnya adalah peregangan panjang gelombang oleh ruang yang mengembang: $1 + z = \frac{a_{\text{sekarang}}}{a_{\text{dulu}}}$, dengan a faktor skala alam semesta. Galaksi dengan $z = 1$ memancarkan cahayanya ketika alam semesta berukuran setengah ukuran sekarang. Laju menjauh galaksi yang sangat jauh bahkan bisa melebihi c tanpa melanggar relativitas, karena yang bergerak adalah ruangnya.

Satu misteri besar masih tersisa: materi biasa (atom) hanya $\pm 5\%$ isi alam semesta. Sekitar 27% adalah **materi gelap** yang tak terlihat tetapi gravitasinya terasa, dan $\pm 68\%$ adalah **energi gelap** yang mempercepat pengembangan alam semesta. Belum ada yang tahu apa sebenarnya keduanya.

35.7 Astronomi Indonesia: dari pelaut Bugis sampai Timau

Jauh sebelum ada teleskop, nenek moyang kita sudah membaca langit dengan cermat.



FISIKA INDONESIA: LANGIT SEBAGAI KALENDER DAN KOMPAS

Pranata mangsa adalah kalender pertanian Jawa yang membagi tahun Matahari menjadi 12 mangsa. Petani mengamati tanda alam dan bintang, misalnya kemunculan rasi *Waluku* (sabuk Orion, berbentuk bajak) sebagai tanda waktu mengolah sawah. Sistem ini dibakukan di Kasunanan Surakarta pada abad ke-19. Para **pelaut Bugis-Makassar** mengarungi Nusantara dengan perahu pinisi memakai bintang sebagai kompas, misalnya gugus Bintang Tujuh (Pleiades), yang mereka sebut *worong-porong*, dan rasi Pari (Crux, di Jawa disebut *gubuk penceng*) untuk mencari arah selatan.

Rukyatul hilal adalah pengamatan bulan sabit tipis pertama sesudah Matahari terbenam untuk menentukan awal bulan Hijriah, misalnya awal Ramadan dan Syawal. Fisiknya menarik: hilal sangat tipis (bagian yang tersinari $\pm 1\%$), letaknya rendah di ufuk barat, dan harus terlihat di langit senja yang masih terang. Karena itu, Indonesia bersama negara tetangga memakai kriteria berbasis perhitungan astronomi (*hisab*), yaitu tinggi hilal minimal 3° dan jarak sudut Bulan–Matahari (elongasi) minimal $6,4^\circ$. Hisab dan rukyat sama-sama memakai ilmu gerak Bulan dan Matahari. Di dekat khatulistiwa, hilal senja sering tampak seperti perahu atau senyuman karena sisi terangnya menghadap Matahari yang sudah di bawah ufuk.

Observatorium Bosscha di Lembang, Jawa Barat, dibangun tahun 1920-an dan kini dikelola ITB. Teleskop refraktor gandanya berlensa 60 cm dan masih dipakai untuk meneliti bintang ganda. Sayangnya, lampu kota Bandung yang makin terang mengancam langit gelapnya. Karena itu, pemerintah melalui LAPAN (kini BRIN) membangun **Observatorium Nasional Timau** di Kupang, Nusa Tenggara Timur, yang langitnya kering dan gelap, dengan teleskop berdiameter 3,8 m, terbesar di Asia Tenggara. Indonesia juga pernah menjadi tuan rumah Olimpiade Astronomi dan Astrofisika Internasional (IOAA) 2008 di Bandung.



Kalender Hijriah

Satu bulan Hijriah mengikuti satu siklus fase Bulan ($\pm 29,5$ hari), sehingga setahun Hijriah ± 11 hari lebih pendek dari tahun Masehi.



Navigasi tanpa GPS

Rasi Pari (gubuk penceng) menunjuk ke arah selatan. Nelayan tradisional masih memakainya untuk pulang ke pelabuhan.



Lampu jalan menghadap ke bawah

Lampu bertudung mengurangi polusi cahaya, menghemat listrik, dan mengembalikan bintang-bintang ke langit kota.



GPS di ponselmu

GPS memakai jam atom di satelit dan butuh koreksi relativitas (Bab 30). Astrofisika ada di sakumu!

MITOS

"Astronomi tidak ada gunanya untuk kehidupan sehari-hari."

MITOS

"Bulan hanya muncul pada malam hari."

FAKTA

Kalender, jadwal salat, navigasi, tabel pasang surut, GPS, prakiraan cuaca antariksa, sampai sensor kamera ponsel (dikembangkan untuk kamera wahana antariksa) semuanya berasal dari astronomi dan riset antariksa.

FAKTA

Bulan sering terlihat siang hari! Bulan kuartal pertama terbit sekitar tengah hari dan bisa dilihat sore hari di langit biru. Bulan kuartal akhir terlihat pagi hari.



Cek Cepat

Saat purnama, posisi Bumi, Bulan, dan Matahari adalah...

Bulan berada di antara Bumi dan Matahari

ketiganya membentuk sudut siku-siku

Bumi berada di antara Matahari dan Bulan (hampir segaris)

Matahari berada di antara Bumi dan Bulan

Bintang A tampak biru-putih dan bintang B tampak merah. Pernyataan yang benar adalah...

suhu permukaan A lebih tinggi daripada B

A pasti lebih dekat ke Bumi daripada B

B lebih panas karena merah adalah warna api

keduanya pasti bersuhu sama

Bukti utama bahwa alam semesta mengembang adalah...

bintang berkelap-kelip di malam hari

Matahari terbit dari timur

adanya gerhana Matahari total

spektrum galaksi jauh bergeser ke merah, makin jauh makin besar

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D



Tantangan Rumah: mengukur Matahari dengan lubang jarum

Bahan: 2 lembar karton, aluminium foil, jarum pentul, selotip, penggaris, kertas putih

1. Lubangi karton pertama (sekitar 3 cm × 3 cm), tutup dengan foil, lalu tusuk foil dengan jarum hingga ada lubang kecil yang bulat.
2. Berdirilah membelakangi Matahari. Arahkan sinar Matahari melewati lubang jarum ke kertas putih di karton kedua. Kamu akan melihat **bayangan bulat Matahari**.
3. Atur jarak L antara lubang dan kertas, misalnya 1 m. Ukur diameter bayangan Matahari d dalam milimeter.
4. **Keselamatan: jangan pernah** melihat Matahari secara langsung atau lewat lubang jarum. Lihat hanya bayangannya di kertas.

Pertanyaan: Hitung d/L . Hasilnya seharusnya sekitar $1/108$. Jika jarak Matahari 150 juta km, berapa diameter Matahari menurut pengukuranmu? Bonus: saat gerhana Matahari sebagian, bentuk bayangannya ikut menjadi sabit!



RINGKASAN KILAT

Bab 35 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan siang-malam, **musim**, **fase Bulan**, **gerhana**, dan **pasang surut** dari gerak Bumi, Bulan, dan Matahari
- memakai satuan astronomi dan **tahun cahaya**, lalu menghitung waktu tempuh cahaya
- menjelaskan Matahari sebagai **reaktor fusi** dan menebak suhu bintang dari warnanya (**hukum Wien**)
- membaca **diagram H-R** dan menelusuri siklus hidup bintang sampai katai putih, bintang neutron, atau lubang hitam
- menjelaskan bukti **alam semesta mengembang** (hukum Hubble) dan menghargai tradisi astronomi Nusantara



Istilah kunci

musim

Gerhana Matahari

gerhana Bulan

gaya pasang surut

Satuan astronomi (SA)

Tahun cahaya

fusi nuklir

luminositas

hukum pergeseran Wien

deret utama

Bimasakti

hukum Hubble-Lemaître

Big Bang



Rumus penting

$$t = \frac{d}{c}$$

Waktu tempuh cahaya. Cahaya super cepat, tetapi alam semesta super luas. Melihat jauh berarti melihat masa lalu.

$$T = \frac{b}{\lambda_{\text{maks}}}$$

Suhu bintang dari warnanya (hukum Wien).

Makin pendek panjang gelombang puncaknya, makin panas bintangnya: biru itu panas, merah itu relatif dingin.

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4$$

Daya pancar bintang (Stefan-Boltzmann).

Bintang yang besar atau panas bersinar sangat terang. Suhunya dipangkatkan empat: dua kali lebih panas berarti 16 kali lebih terang!

$$t \approx 10^{10} \text{ tahun} \times \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2,5}$$

Umur bintang di deret utama. Bintang raksasa punya bahan bakar lebih banyak, tetapi memborosnya jauh lebih cepat. Yang besar justru berumur pendek!

$$v = H_0 d$$

Hukum Hubble-Lemaître. Makin jauh sebuah galaksi, makin cepat ia menjauh dari kita.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Sinar Matahari saat gerhana tidak "beracun".
- Lubang hitam bukan "lubang" atau terowongan, dan tidak menyedot semua benda di alam semesta.

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=35

🧩 Teka-teki terakhir: alam semesta menunggumu

Kalsium di tulangmu ditempa di dalam bintang yang meledak miliaran tahun lalu, dan cahaya galaksi terjauh berangkat sebelum Matahari lahir. Kita bisa mengukur semua itu hanya dengan cahaya dan fisika. Tetapi ±95% isi alam semesta, yaitu materi gelap dan energi gelap, masih misteri. Belum ada satu manusia pun yang tahu jawabannya. Pertanyaannya: **siapa yang akan memecahkannya, dan dengan cara apa?**

▼ Intip petunjuk

Caranya sama dengan cara Raka menebak aturan main congklak di [Bab 1](#): amati, tebak aturannya, uji, lalu ulangi. Kamu sudah menempuh 35 bab, dari gerak angkot sampai tepi alam semesta. Sekarang uji seluruh kemampuanmu di [Bank Soal](#), lalu kembalilah ke Bab 1 dan bacalah lagi dengan mata seorang fisikawan. Siapa tahu, nama penemu jawaban misteri itu adalah namamu. 🎮



ALAT BELAJAR

Peta Rumus & Koleksi Kartu

Semua Rumus Hidup di buku ini, dikelompokkan per bagian. Rumus yang sudah kamu taklukkan berubah menjadi kartu koleksi berwarna.



TRIK KAK NARA

Rumus bukan untuk dihafal seperti mantra. Setiap rumus adalah **kalimat** tentang alam. Coba baca kalimat di bawah setiap kartu dengan suara keras. Kalau kamu bisa menceritakan rumusnya, kamu sudah paham.

Koleksimu: **0/143** kartu rumus. Buka bab, mainkan Rumus Hidup, lalu jawab "🎯 Tantang aku" untuk mendapatkan kartunya.

Bagian A • Fondasi

Bab 1 • #1

Skala 10^n : menulis ukuran raksasa dan mungil

$$x = a \times 10^n \text{ m}$$

Angka depan a dikali 10 sebanyak n kali. Pangkat positif berarti raksasa, pangkat negatif berarti mungil.

Bab 1 • #2

Waktu tempuh cahaya

$$t = \frac{d}{c}$$

Cahaya sangat cepat, tetapi tidak instan. Makin jauh jaraknya, makin lama cahaya sampai.

Bab 1 • #3

Perkiraan Fermi: butir beras Indonesia per hari

$$N = \frac{P \times 10^6 \times m_h}{m_b}$$

Jumlah butir = jumlah orang $\times$ beras per orang, lalu dibagi massa sebutir beras.

Bab 2 • #4

Konversi km/jam $\rightarrow$ m/s

$$v_{\text{m/s}} = \frac{v_{\text{km/jam}}}{3,6}$$

Cukup bagi dengan 3,6, karena $1 \text{ km/jam} = 1.000 \text{ m} \div 3.600 \text{ s} = 1/3,6 \text{ m/s}$.

Bab 2 • #5

Periode bandul (hasil analisis dimensi + eksperimen)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Tali makin panjang, ayunan makin lambat. Gravitasi makin kuat, ayunan makin cepat. Massa? Tidak ikut!

Bab 2 • #6

Ketidakpastian relatif

$$KR = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

Seberapa besar 'keraguan' dibanding hasil ukurnya. Makin kecil persennya, makin teliti pengukuranmu.

Bab 3 • #7

Resultan dua vektor

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos \theta}$$

Searah ($\theta = 0^\circ$) paling besar, berlawanan ($\theta = 180^\circ$) paling kecil, tegak lurus ($\theta = 90^\circ$) jadi Pythagoras.

Bab 3 • #8

Komponen mendatar sebuah vektor

$$A_x = A \cos \theta$$

Bayangan vektor di lantai saat disinari dari atas. Sudut kecil berarti bayangannya panjang, sudut 90° berarti bayangannya hilang.

Bab 3 • #9

Usaha sebagai perkalian titik

$$W = F \cdot s = F s \cos \theta$$

Hanya bagian gaya yang searah perpindahan yang 'dihitung'. Gaya tegak lurus gerak tidak melakukan usaha sama sekali!

Bab 3 • #10

Kemiringan garis singgung (turunan)

$$v = \frac{d}{dt} (k t^2) = 2 k t$$

Untuk gerak $x = k t^2$, kemiringan grafik makin curam seiring waktu: motornya makin ngebut!

Bagian B • Gerak & Gaya

Bab 4 • #1

Kecepatan pada GLBB

$$v = v_0 + a t$$

Kecepatan akhir = kecepatan awal + (tambahan kecepatan setiap detik $\times$ lamanya).

Bab 4 • #2

Perpindahan pada GLBB

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

Jarak = bagian 'seandainya tetap secepat awal' + bonus dari percepatan, yang tumbuh sebanding dengan kuadrat waktu.

Bab 4 • #3

Jarak henti kendaraan

$$d = v t_r + \frac{v^2}{2a}$$

Jarak henti = jarak selama bereaksi (belum direm) + jarak pengereman. Bagian kedua tumbuh sebanding kuadrat kecepatan!

Bab 4 • #4

Kecepatan jatuh bebas

$$v = \sqrt{2gh}$$

Makin tinggi tempat jatuhnya, makin cepat benda tiba di bawah. Tetapi tidak sebanding: 4× lebih tinggi hanya 2× lebih cepat.

Bab 5 • #5

Jangkauan lemparan di tanah datar

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

Jangkauan sebanding dengan kuadrat kecepatan awal. Sudut 45° paling jauh, dan sudut θ serta $90^\circ - \theta$ memberi jangkauan yang sama.

Bab 5 • #6

Tinggi maksimum

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g}$$

Hanya komponen tegak yang mengangkat bola. Makin curam sudutnya, makin tinggi puncaknya.

Bab 5 • #7

Jarak jatuh benda yang dilempar mendatar

$$x = v \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Waktu jatuh hanya ditentukan oleh ketinggian. Jarak mendatar = kecepatan mendatar × waktu jatuh itu.

Bab 5 • #8

Sudut miring payung

$$\tan \theta = \frac{v_{\text{orang}}}{v_{\text{hujan}}}$$

Makin cepat kamu berjalan dibandingkan hujannya, makin miring hujan menurutmu, dan makin miring payungmu harus dicondongkan ke depan.

Bab 6 • #9

Hukum I Newton (syarat diam atau GLB)

$$\Sigma F = 0 \iff v = \text{tetap}$$

Gaya total nol $\iff$ kecepatan tidak berubah (diam tetap diam, bergerak tetap bergerak).

Bab 6 • #10

Hukum II Newton

$$a = \frac{\Sigma F}{m}$$

Percepatan = gaya total dibagi massa. Didorong makin kuat, makin ngebut. Makin berat, makin susah dipercepat.

Bab 6 • #11

Angka timbangan di dalam lift

$$N = m(g + a)$$

Lift dipercepat ke atas → timbangan menekan lebih kuat (terasa berat). Dipercepat ke bawah → terasa ringan.

Bab 6 • #12

Sistem meja–katrol (dengan gesekan)

$$a = \frac{m_B g - \mu m_A g}{m_A + m_B}$$

Yang menarik: berat balok B. Yang menghambat: gesekan pada balok A. Yang dipercepat: kedua balok sekaligus.

Bab 6 • #13

Akselerometer pengharum mobil

$$\tan \theta = \frac{a}{g}$$

Makin besar percepatan angkot, makin miring pengharumnya. Pengharum itu sebenarnya alat ukur percepatan!

Bab 7 • #14

Gesekan statis maksimum

$$f_{s,\text{maks}} = \mu_s N = \mu_s m g$$

Gesekan statis bisa bernilai berapa saja dari nol sampai batas ini. Dorongan harus melebihi batas ini agar benda mulai bergeser (di bidang datar, $N = mg$).

Bab 7 • #15

Sudut kritis bidang miring

$$\tan \theta_c = \mu_s$$

Kemiringan saat benda tepat akan meluncur hanya bergantung pada koefisien gesek, tidak pada massa benda!

Bab 7 • #16

Percepatan sentripetal

$$a_s = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

Makin cepat dan makin tajam tikungannya (r kecil), makin besar percepatan ke pusat yang dibutuhkan. Kecepatan $2\times \rightarrow$ percepatan $4\times$!

Bab 7 • #17

Kecepatan maksimum di tikungan datar

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{\mu_s g r}$$

Di tikungan datar, hanya gesekan ban yang menarik kendaraan ke pusat. Jalan licin (μ kecil) atau tikungan tajam (r kecil) berarti harus pelan!

Bab 7 • #18

Kecepatan minimum di tong setan

$$v_{\text{min}} = \sqrt{\frac{g r}{\mu_s}}$$

Makin cepat motor, makin keras dinding mendorongnya, makin besar gesekan yang menahannya agar tidak merosot. Terlalu pelan? Motor merosot ke dasar.

Bab 8 • #19

Usaha oleh gaya tetap

$$W = F s \cos \theta$$

Usaha = gaya × perpindahan × kosinus sudut di antara keduanya. Hanya bagian gaya yang searah gerak yang 'dihitung'.

Bab 8 • #20

Energi kinetik

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Energi gerak = setengah × massa × kecepatan kuadrat. Kecepatan dua kali lipat → energi empat kali lipat!

Bab 8 • #21

Kelajuan setelah turun setinggi h (tanpa gesekan)

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

Energi potensial yang 'dicairkan' saat turun setinggi h berubah menjadi tambahan energi kinetik. Massa tidak berpengaruh!

Bab 8 • #22

Daya saat naik tangga

$$P = \frac{mgh}{t}$$

Daya = energi yang dipakai untuk naik (mgh) dibagi waktu. Naik secepat kilat = daya besar.

Bab 9 • #23

Gaya rata-rata saat benda dihentikan

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv}{\Delta t}$$

Gaya penghenti = momentum yang harus dihapus dibagi waktu menghapusnya. Perpanjang waktunya, gayanya mengecil!

Bab 9 • #24

Kecepatan bersama setelah tumbukan menempel

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Kedua benda menempel dan bergerak bersama. Momentum total sebelum dibagi massa total sesudah.

Bab 9 • #25

Tinggi pantulan ke-n

$$h_n = h e^{2n}$$

Setiap kali memantul, tinggi bola dikali e^2 . Bola dengan $e = 0,8$ kehilangan 36% energinya pada setiap pantulan.

Bab 10 • #26

Torsi pada pintu

$$\tau = r F \sin \theta$$

Efek memutar = jarak dari engsel × gaya × sinus sudut. Dorong jauh dari engsel dan tegak lurus daun pintu.

Bab 10 · #27

Kelajuan di dasar lereng (menggeling tanpa selip)

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+k}}$$

Mirip $v = \sqrt{2gh}$, tetapi dibagi $(1+k)$ karena sebagian energi dipakai untuk berputar.

Bab 10 · #28

Kekekalan momentum sudut

$$\omega_2 = \frac{I_1 \omega_1}{I_2}$$

Rapatkan tangan (I kecil), putaran makin kencang.
Rentangkan tangan (I besar), putaran melambat.

Bab 11 · #29

Hukum gravitasi Newton

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gaya tarik = $G \times$ massa pertama $\times$ massa kedua, dibagi kuadrat jarak pusat ke pusat. Jarak dijadikan dua kali, gayanya tinggal seperempat!

Bab 11 · #30

Percepatan gravitasi di ketinggian h

$$g_h = g_0 \left(\frac{R}{R+h} \right)^2$$

Makin tinggi, makin lemah tarikan Bumi. Tetapi turunnya pelan: di ketinggian ISS masih tersisa hampir 90%.

Bab 11 · #31

Kecepatan lepas dari permukaan planet

$$v_{\text{lepas}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Kecepatan minimum agar benda lolos dari tarikan planet selamanya. Massa benda yang dilempar tidak berpengaruh!

Bab 11 · #32

Kecepatan orbit satelit Bumi

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}$$

Makin rendah orbitnya, makin kencang satelit harus melaju. Massa satelit tidak berpengaruh sama sekali.

Bab 11 · #33

Periode satelit (berapa jam sekali putar)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}}$$

Makin tinggi orbitnya, makin lama satu putaran: jalannya lebih jauh DAN lajunya lebih pelan.

Bab 12 · #34

Hukum Hooke

$$F = kx$$

Gaya pegas = konstanta pegas $\times$ pertambahan panjang. Tarik dua kali lebih jauh, pegas melawan dua kali lebih kuat.

Bab 12 · #35

Pertambahan panjang kawat atau batang

$$\Delta L = \frac{F L_0}{\frac{\pi}{4} d^2 E}$$

Kawat makin panjang dan gaya makin besar → makin melar. Kawat makin tebal dan bahan makin kaku → makin sedikit melar.

Bab 12 · #36

Periode sistem pegas-beban

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Beban berat bergetar lambat, pegas kaku bergetar cepat. Amplitudo sama sekali tidak berpengaruh!

Bab 12 · #37

Periode bandul sederhana

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Tali makin panjang, ayunan makin lambat. Di Bulan yang gravitasinya lemah, ayunan jauh lebih lambat. Massa beban tidak berpengaruh.

Bab 12 · #38

Energi total getaran pegas

$$E = \frac{1}{2} k A^2$$

Energi getaran sebanding dengan kuadrat amplitudo. Simpangan dua kali lebih besar berarti energi empat kali!

Bagian C · Fluida & Panas

Bab 13 · #1

Tekanan

$$P = \frac{F}{A}$$

Gaya yang sama terasa jauh lebih 'menusuk' jika bidang tekannya kecil.

Bab 13 · #2

Tekanan hidrostatik

$$P_h = \rho g h$$

Tekanan zat cair = massa jenis × gravitasi × kedalaman. Di air laut, setiap 10 m menambah ±1 atmosfer.

Bab 13 · #3

Dongkrak hidrolik

$$F_2 = F_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

Diameter piston besar 10 kali piston kecil → luasnya 100 kali → gayanya 100 kali!

Bab 13 · #4

Gaya apung (gaya Archimedes)

$$F_A = \rho_f V g$$

Gaya apung = berat fluida yang 'didesak' benda. Fluida makin rapat atau bagian tercelup makin besar → dorongan makin kuat.

Bab 13 · #5

Bagian benda terapung yang tercelup

$$\frac{V_c}{V} = \frac{\rho_b}{\rho_f}$$

Persentase yang tenggelam = massa jenis benda dibagi massa jenis fluida. Gunung es di laut: ±90% tersembunyi di bawah air!

Bab 14 · #6

Debit aliran

$$Q = A v = \frac{\pi d^2}{4} v$$

Debit = luas penampang × kelajuan. Pipa lebih gemuk atau air lebih ngebut → lebih banyak air lewat tiap detik.

Bab 14 · #7

Persamaan kontinuitas (pipa lingkaran)

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

Diameter mengecil setengahnya → luas jadi seperempat → kelajuan jadi empat kali. Debit tetap sama.

Bab 14 · #8

Teorema Torricelli

$$v = \sqrt{2gh}$$

Kelajuan pancaran sama dengan kelajuan benda yang jatuh bebas dari permukaan air ke lubang.

Bab 14 · #9

Venturimeter tanpa raksa

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{n^2 - 1}}, \quad n = \frac{A_1}{A_2}$$

Beda tinggi air di dua tabung manometer → kelajuan air di bagian pipa yang lebar.

Bab 14 · #10

Kecepatan terminal (hukum Stokes)

$$v_t = \frac{2r^2(\rho_b - \rho_f)g}{9\eta}$$

Bola dua kali lebih besar jatuh empat kali lebih cepat. Fluida dua kali lebih kental membuatnya dua kali lebih lambat.

Bab 15 · #11

Termometer skala apa saja

$$X = X_b + \frac{t_c}{100} (X_d - X_b)$$

Cari dulu 'berapa persen perjalanan' dari titik beku ke titik didih, lalu terapkan pada skala lain.

Bab 15 · #12

Pemuaian panjang

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Pertambahan panjang = koefisien muai × panjang awal × kenaikan suhu. Kecil, tetapi bisa membengkokkan rel!

Bab 15 · #13

Kalor untuk menaikkan suhu

$$Q = mc\Delta T$$

Kalor = massa × kalor jenis × kenaikan suhu. Air yang banyak dan 'rakus kalor' butuh energi besar.

Bab 15 · #14

Suhu campuran air panas + air dingin

$$T_c = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2}$$

Untuk zat sejenis, suhu campuran adalah rata-rata suhu yang 'ditimbang' dengan massa.

Bab 15 · #15

Hukum pergeseran Wien

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{b}{T}$$

Makin panas benda, makin pendek panjang gelombang 'favoritnya': dari inframerah, ke merah, kuning, sampai biru.

Bab 16 · #16

Persamaan gas ideal

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Lebih banyak gas atau lebih panas → tekanan naik.
Ruang lebih lega → tekanan turun.

Bab 16 · #17

Tekanan ban motor saat siang hari (volume dianggap tetap)

$$P_2 + 14,7 = (P_1 + 14,7) \frac{t_2 + 273}{t_1 + 273}$$

Ubah ke tekanan mutlak dan kelvin dulu, pakai Gay-Lussac, lalu kembalikan ke angka alat ukur.

Bab 16 · #18

Energi kinetik rata-rata satu molekul

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} k T$$

Suhu mutlak dua kali → energi kinetik rata-rata dua kali. Jenis gasnya tidak berpengaruh!

Bab 16 · #19

Kecepatan rms molekul gas

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Gas makin panas → makin cepat. Molekul makin berat → makin lambat (sebanding $1/\sqrt{M}$).

Bab 17 · #20

Usaha gas pada tekanan tetap

$$W = P (V_2 - V_1)$$

Usaha gas = tekanan × perubahan volume. Memuai → positif, dimampatkan → negatif.

Bab 17 · #21

Hukum I termodinamika

$$\Delta U = Q - W$$

Perubahan energi dalam = kalor yang masuk – usaha yang dikeluarkan gas.

Bab 17 · #22

Efisiensi maksimum (mesin Carnot)

$$\eta_C = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Efisiensi terbaik yang mungkin hanya ditentukan suhu. Hitung dalam kelvin: $T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$.

Bab 17 · #23

COP maksimum kulkas atau AC

$$\text{COP}_C = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

Makin kecil beda suhu dalam dan luar, makin mudah kalor dipompa.

Bagian D • Gelombang & Cahaya

Bab 18 • #1

Cepat rambat gelombang

$$v = \lambda f$$

Cepat rambat = panjang satu gelombang × banyak gelombang per detik.

Bab 18 • #2

Simpangan gelombang berjalan

$$y = A \sin \left(2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) \right)$$

Masukkan posisi dan waktu, keluarlah simpangan titik itu. Sudut sinus dalam radian.

Bab 18 • #3

Cepat rambat gelombang pada tali

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Tali yang kencang dan ringan → gelombang ngebut.
Tali yang kendur dan berat → gelombang lambat.

Bab 19 • #4

Jarak petir dari selisih waktu

$$s = vt, \quad v \approx 331 + 0,6T$$

Hitung detik dari kilat sampai guruh, kalikan dengan cepat rambat bunyi.

Bab 19 • #5

Taraf intensitas: banyak sumber dan jarak

$$\beta = \beta_1 + 10 \log n - 20 \log \frac{r}{r_1}$$

Gandakan jumlah sumber: +3 dB. Gandakan jarak: -6 dB.

Bab 19 • #6

Frekuensi nada dawai

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Dawai pendek, kencang, dan ringan → nada tinggi. $n = 1$ adalah nada dasar.

Bab 19 • #7

Efek Doppler

$$f_p = \frac{v + v_p}{v - v_s} f_s$$

Kecepatan positif berarti bergerak MENDEKATI yang lain; negatif berarti menjauh.

Bab 20 • #8

Rumus cermin lengkung & lensa tipis

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \implies s' = \frac{sf}{s - f}$$

Dekatkan benda ke titik fokus, bayangannya kabur menjauh. Lewati fokus, bayangannya melompat ke sisi lain dan menjadi maya. Geser f ke nilai negatif untuk cermin cembung atau lensa cekung: bayangannya selalu maya, tegak, dan diperkecil.

Bab 20 · #9

Hukum Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Masuk ke medium yang lebih 'lambat', sinar menunduk mendekati normal. Keluar ke medium yang lebih 'cepat', sinar menjauhi normal.

Bab 20 · #10

Kedalaman semu

$$h' = \frac{h}{n}$$

Dilihat dari udara, benda di dalam air tampak lebih dangkal: kedalamannya seolah dibagi indeks bias.

Bab 20 · #11

Kacamata untuk mata minus (miopi)

$$P = -\frac{100}{PR}$$

Makin dekat titik jauh matamu, makin besar minus kacamataunya.

Bab 21 · #12

Lebar pita interferensi celah ganda

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d}$$

Cahaya merah (λ panjang) dan layar jauh membuat pita melebar. Celah yang makin rapat juga membuat pita melebar.

Bab 21 · #13

Sudut terang pada kisi difraksi

$$\sin \theta = m \lambda N$$

Kisi yang makin rapat dan cahaya yang makin merah dibelokkan makin jauh. Orde yang lebih tinggi dibelokkan lebih jauh lagi.

Bab 21 · #14

Jarak terjauh dua lampu masih tampak terpisah

$$L_{\text{maks}} = \frac{x D}{1,22 \lambda}$$

Lubang yang lebih lebar (D besar) dan cahaya yang lebih biru (λ kecil) mampu memisahkan benda yang lebih jauh.

Bab 21 · #15

Hukum Malus

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Searah (0°): lolos semua. Miring 45° : lolos setengahnya. Tegak lurus (90°): padam.

Bagian E • Listrik & Magnet

Bab 22 • #1

Hukum Coulomb

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Muatan makin besar, gaya makin kuat. Jarak dua kali lipat, gaya tinggal seperempat.

Bab 22 • #2

Kuat medan listrik muatan titik

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

Medan paling kuat di dekat muatan, lalu melemah cepat sebanding $1/r^2$.

Bab 22 • #3

Kapasitas kapasitor keping sejajar

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

Keping lebih luas dan lebih rapat menampung lebih banyak muatan. Isolator di antaranya (dielektrik) melipatgandakan kapasitasnya.

Bab 22 • #4

Energi kapasitor

$$W = \frac{1}{2} C V^2$$

Tegangan dua kali lipat, energinya empat kali lipat. Itulah sebabnya kilat lampu kamera dan alat pacu jantung memakai tegangan tinggi.

Bab 23 • #5

Hukum Ohm

$$I = \frac{V}{R}$$

Arus = tegangan dibagi hambatan. Dorongan makin kuat, arus makin deras. Jalan makin sempit, arus makin kecil.

Bab 23 • #6

Hambatan kawat

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Hambatan = hambatan jenis bahan × panjang ÷ luas penampang. Panjang menambah, tebal mengurangi.

Bab 23 • #7

Dua hambatan paralel

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Untuk dua hambatan paralel: hasil kali dibagi hasil jumlah. Hasilnya selalu lebih kecil daripada hambatan yang terkecil.

Bab 23 • #8

Daya listrik

$$P = V I$$

Daya = tegangan × arus. Energi per coulomb dikali banyaknya coulomb per detik = energi per detik.

Bab 23 · #9

Biaya listrik sebuah alat

$$\text{Biaya} = \frac{P t n}{1000} \times \text{tarif}$$

Biaya = daya (kW) × jam per hari × jumlah hari × harga per kWh.

Bab 24 · #10

Medan magnet di sekitar kawat lurus

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Medan makin kuat jika arus makin besar, dan makin lemah jika kita makin jauh dari kawat. Jarak dua kali lipat, medan tinggal separuh.

Bab 24 · #11

Medan di dalam solenoid

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L}$$

Makin banyak lilitan, makin besar arus, dan makin rapat gulungannya (L kecil), medan di dalam solenoid makin kuat.

Bab 24 · #12

Gaya Lorentz pada kawat berarus

$$F = B I L \sin \theta$$

Gaya = kuat medan × arus × panjang kawat dalam medan × sin sudut antara kawat dan medan.

Bab 24 · #13

Jari-jari lintasan muatan

$$r = \frac{m v}{q B}$$

Partikel yang berat dan cepat sulit dibelokkan (lingkarannya besar). Muatan besar dan medan kuat membelokkannya tajam (lingkarannya kecil).

Bab 25 · #14

Fluks magnet

$$\Phi = B A \cos \theta$$

Fluks = kuat medan × luas bidang × cos sudut antara medan dan garis normal bidang. Bidang tegak lurus medan menangkap fluks paling banyak.

Bab 25 · #15

Hukum Faraday

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

GGL induksi = jumlah lilitan × laju perubahan fluks. Tanda minus adalah hukum Lenz: arus induksi melawan perubahan.

Bab 25 · #16

GGL gerak

$$\varepsilon = B \ell v$$

GGL = kuat medan × panjang batang × kecepatan. Batang tidak perlu kumparan: cukup memotong garis-garis medan.

Bab 25 · #17

GGL maksimum generator

$$\epsilon_{\text{maks}} = N B A (2\pi f)$$

Tambah lilitan, perkuat magnet, perbesar kumparan, atau putar lebih cepat, maka GGL puncaknya naik.

Bab 25 · #18

Persamaan transformator

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p}$$

Tegangan sekunder = tegangan primer × perbandingan lilitan. Lilitan sekunder lebih banyak berarti tegangan naik (step-up). Lebih sedikit berarti tegangan turun (step-down).

Bab 25 · #19

Rugi daya di kabel transmisi

$$P_{\text{rugi}} = I^2 R = \left(\frac{P}{V} \right)^2 R$$

Rugi daya sebanding dengan kuadrat arus. Gandakan tegangan, maka arus tinggal separuh dan rugi daya tinggal seperempat.

Bab 26 · #20

Nilai efektif (rms) tegangan AC

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

Tegangan efektif = tegangan puncak dibagi akar dua, kira-kira 0,707 kali puncaknya.

Bab 26 · #21

Reaktansi kapasitif

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Makin tinggi frekuensinya atau makin besar kapasitornya, makin mudah arus AC melewati kapasitor.

Bab 26 · #22

Impedansi rangkaian RLC seri

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Hambatan total AC: R dan selisih reaktansi dijumlahkan seperti sisi-sisi segitiga siku-siku. Pythagoras lagi!

Bab 26 · #23

Frekuensi resonansi penala radio

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Setiap pasangan kumparan dan kapasitor punya satu nada favorit. Radio mengubah C supaya nada favoritnya sama dengan frekuensi stasiun.

Bab 26 · #24

Daya nyata pada rangkaian AC

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \varphi$$

Daya yang benar-benar terpakai = tegangan × arus × faktor daya. Kalau arus dan tegangan tidak kompak, sebagian energi hanya mondar-mandir.

Bab 27 · #25

Kecepatan gelombang EM dari Maxwell

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

Kecepatan cahaya ditentukan oleh dua sifat ruang: seberapa mudah ruang dimasuki medan magnet dan medan listrik.

Bab 27 · #26

Medan listrik dan medan magnet dalam gelombang EM

$$E = cB$$

Medan listrik = kecepatan cahaya × medan magnet. Karena c sangat besar, medan magnet gelombang EM selalu terlihat mungil.

Bab 27 · #27

Panjang gelombang pemancar

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Panjang gelombang = kecepatan cahaya dibagi frekuensi. Makin tinggi frekuensinya, makin pendek gelombangnya.

Bab 27 · #28

Intensitas dari sumber titik

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Intensitas = daya dibagi luas permukaan bola. Menjauh dua kali, sinyal tinggal seperempat.

Bagian F · Fisika Modern

Bab 28 · #1

Energi satu foton

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Energi satu butir cahaya ditentukan warnanya: makin pendek gelombangnya (makin ke arah biru dan ungu), makin besar energinya.

Bab 28 · #2

Persamaan fotolistrik Einstein

$$E_{k,\text{maks}} = hf - \phi$$

Energi gerak elektron tercepat = energi satu foton dikurangi ongkos keluar dari logam.

Bab 28 · #3

Panjang gelombang de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Setiap benda yang bergerak punya panjang gelombang. Makin ringan dan makin lambat bendanya, makin panjang gelombangnya.

Bab 29 · #4

Tingkat energi atom hidrogen (model Bohr)

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV} \cdot Z^2}{n^2}$$

Makin tinggi anak tangga n , makin mendekati nol energinya. Tanda minus berarti elektron masih 'terikat' pada inti.

Bab 29 · #5

Panjang gelombang garis spektrum hidrogen

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{(n_1 + k)^2} \right)$$

Pilih tingkat tujuan n_1 dan seberapa jauh elektron jatuh (k anak tangga). Jatuh makin jauh, foton makin berenergi, panjang gelombangnya makin pendek.

Bab 29 · #6

Ukuran orbit Bohr (perkiraan ukuran atom)

$$r_n = 0,0529 \text{ nm} \times \frac{n^2}{Z}$$

Jari-jari orbit tumbuh sebanding n kuadrat: tangga ke-2 empat kali lebih jauh, tangga ke-3 sembilan kali lebih jauh dari tangga pertama.

Bab 30 · #7

Faktor Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

Gamma adalah 'faktor peregang' waktu. Pada v kecil hampir tepat 1, lalu melonjak tanpa batas saat v mendekati c .

Bab 30 · #8

Dilatasi waktu

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Waktu yang dialami penumpang roket (Δt_0) terukur lebih lama oleh pengamat di Bumi (Δt).

Bab 30 · #9

Kontraksi panjang

$$L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

Panjang benda yang bergerak terukur lebih pendek, dengan faktor $1/\gamma$, hanya pada arah geraknya.

Bab 30 · #10

Kesetaraan massa dan energi

$$E = mc^2$$

Massa dan energi adalah dua wujud dari hal yang sama. Kurs tukarnya c^2 — sangat mahal!

Bab 31 · #11

Energi dari massa yang hilang

$$E = N \cdot \Delta m c^2$$

Setiap reaksi inti 'menghilangkan' sedikit massa Δm . Kalikan dengan c^2 dan dengan banyaknya reaksi N , dan kamu mendapat energi totalnya.

Bab 31 · #12

Sisa zat radioaktif setelah waktu t

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

Setiap satu waktu paruh berlalu, sisa zat radioaktif tinggal separuhnya.

Bab 31 · #13

Aktivitas sumber radioaktif

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N$$

Makin banyak inti dan makin pendek waktu paruhnya, makin 'ramai' peluruhannya setiap detik.

Bab 32 · #14

Tegangan DC dari penyearah

$$V_{dc} \approx \sqrt{2} V_{rms} - 0,7 n$$

Tegangan puncak AC dikurangi 'tiket masuk' 0,7 volt untuk setiap dioda yang dilewati arus.

Bab 32 · #15

Resistor pelindung LED

$$R = \frac{V_s - V_{LED}}{I}$$

Sisa tegangan yang tidak dipakai LED harus 'ditanggung' resistor, supaya arusnya pas.

Bab 32 · #16

Transistor sebagai penguat arus

$$I_C = \beta I_B$$

Arus basis yang mungil mengatur arus kolektor yang puluhan sampai ratusan kali lebih besar.

Bab 32 · #17

Biner (8 bit) → desimal

$$N = \sum_{k=0}^7 b_k \cdot 2^k = 128b_7 + 64b_6 + \dots + 2b_1 + b_0$$

Setiap bit yang menyala menyumbang nilai tempatnya. Jumlahkan saja!

Bagian G · Fisika untuk Indonesia & Semesta

Bab 33 · #1

Jarak pusat gempa dari jeda S-P

$$d = \Delta t \frac{v_P v_S}{v_P - v_S}$$

Makin lama jeda antara getaran kecil (P) dan guncangan besar (S), makin jauh pusat gempa.

Bab 33 · #2

Perbandingan energi dua gempa

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{1,5(M_2 - M_1)}$$

Naik satu magnitudo, energinya sekitar 32 kali lipat.
Naik dua magnitudo, seribu kali!

Bab 33 · #3

Cepat rambat tsunami

$$v = \sqrt{gh}$$

Makin dalam lautnya, makin ngebut tsunaminya. Di laut dangkal ia melambat, tetapi meninggi.

Bab 34 · #4

Suhu planet tanpa selimut gas rumah kaca

$$T = \left(\frac{S_0 (1 - \alpha)}{4\sigma d^2} \right)^{1/4}$$

Energi Matahari yang diserap sama dengan energi panas yang dipancarkan. Makin jauh dari Matahari atau makin terang permukaannya, makin dingin planetnya.

Bab 34 · #5

Daya panel surya

$$P = \eta I A$$

Daya listrik = efisiensi × intensitas cahaya × luas panel.

Bab 34 · #6

Daya turbin angin

$$P = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) v^3 \eta$$

Angin dua kali lebih kencang membawa daya delapan kali lebih besar!

Bab 34 · #7

Jejak karbon perjalanan

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{d}{e} \times 2,3 \div n$$

Setiap liter bensin yang dibakar melepas ±2,3 kg CO₂, lalu dibagi rata ke semua penumpang.

Bab 35 · #8

Waktu tempuh cahaya

$$t = \frac{d}{c}$$

Cahaya super cepat, tetapi alam semesta super luas. Melihat jauh berarti melihat masa lalu.

Bab 35 · #9

Suhu bintang dari warnanya (hukum Wien)

$$T = \frac{b}{\lambda_{\text{maks}}}$$

Makin pendek panjang gelombang puncaknya, makin panas bintangnya: biru itu panas, merah itu relatif dingin.

Bab 35 · #10

Daya pancar bintang (Stefan–Boltzmann)

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4$$

Bintang yang besar atau panas bersinar sangat terang. Suhunya dipangkatkan empat: dua kali lebih panas berarti 16 kali lebih terang!

Bab 35 · #11

Umur bintang di deret utama

$$t \approx 10^{10} \text{ tahun} \times \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2,5}$$

Bintang raksasa punya bahan bakar lebih banyak, tetapi memborosnya jauh lebih cepat. Yang besar justru berumur pendek!

Bab 35 · #12

Hukum Hubble–Lemaître

$$v = H_0 d$$

Makin jauh sebuah galaksi, makin cepat ia menjauh dari kita.



PENUTUP

Sampai jumpa di puncak berikutnya!

Glosarium istilah penting, panduan untuk guru dan orang tua, serta informasi tentang buku ini.

Panduan untuk guru & orang tua

- **Mulai dari tebakan.** Minta anak memilih jawaban "Tebak Dulu" *sebelum* membaca. Tebakan yang salah lalu dibuktikan sendiri akan diingat jauh lebih lama daripada jawaban yang langsung diberikan.
- **Biarkan mereka bermain.** Rumus Hidup dan Lab Mini sengaja dibuat untuk diutak-atik. Tanyakan: "Kalau massanya dua kali lipat, apa yang terjadi?" Biarkan mereka menebak lalu mengecek.
- **Tangga latihan.** Untuk SD-SMP cukup Lv 1-2. Untuk SMA dan TKA, targetkan Lv 3. Lv 4-5 untuk siswa IGCSE/IB, dan Lv 6 untuk peserta olimpiade.
- **Tantangan Rumah** memakai bahan dapur yang aman. Dampingi anak, terutama untuk percobaan yang memakai air panas atau listrik.
- **Mode Dasar • SMA • Lanjut** di kanan atas menyesuaikan kedalaman bacaan tanpa mengganti buku.
- **Progres** (XP, kartu, soal yang sudah benar) tersimpan di perangkat. Jika dibuka di aurumgen.my.id, hasil latihan juga direkam secara anonim untuk menghitung statistik "berapa persen pembaca menjawab benar".

Glosarium

A • Fondasi

Istilah	Arti singkat
Besaran pokok	Tujuh besaran dasar SI: panjang (m), massa (kg), waktu (s), suhu (K), kuat arus (A), intensitas cahaya (cd), jumlah zat (mol).
Dimensi	Cara menyatakan besaran dalam besaran pokok, mis. kecepatan = $[L][T]^{-1}$. Berguna untuk mengecek rumus.
Angka penting	Angka hasil pengukuran yang dapat dipercaya, termasuk satu angka taksiran terakhir.
Presisi vs akurasi	Presisi = hasil berulang saling berdekatan. Akurasi = hasil dekat dengan nilai sebenarnya.
Vektor	Besaran yang punya besar dan arah (perpindahan, kecepatan, gaya).

Turunan & integral

Turunan = laju perubahan (kemiringan grafik). Integral = jumlahan kecil-kecil (luas di bawah grafik).

B • Gerak & Gaya

Istilah	Arti singkat
Perpindahan	Perubahan posisi lengkap dengan arah. Berbeda dengan jarak tempuh.
Percepatan	Laju perubahan kecepatan, $a = \Delta v / \Delta t$.
GLB / GLBB	Gerak lurus beraturan (kecepatan tetap) / gerak lurus berubah beraturan (percepatan tetap).
Kelembaman (inersia)	Kecenderungan benda mempertahankan keadaan geraknya. Ukurannya adalah massa.
Gaya normal	Gaya dorong permukaan yang tegak lurus permukaan itu.
Diagram benda bebas	Gambar satu benda beserta semua gaya yang bekerja padanya.
Gaya gesek	Gaya sejajar permukaan yang melawan gerak atau kecenderungan gerak.
Gaya sentripetal	Gaya total yang mengarah ke pusat lingkaran pada gerak melingkar.
Usaha	Gaya $\times$ perpindahan searah gaya, $W = Fs \cos \theta$.
Energi kinetik / potensial	Energi karena gerak ($\frac{1}{2}mv^2$) / karena posisi atau keadaan (mgh , $\frac{1}{2}kx^2$).
Daya	Laju usaha atau energi, $P = W/t$, satuan watt.
Momentum & impuls	Momentum $p = mv$. Impuls = gaya $\times$ selang waktu = perubahan momentum.
Koefisien restitusi	Perbandingan kecepatan relatif sesudah dan sebelum tumbukan (0 sampai 1).
Torsi	Efek putar gaya, $\tau = rF \sin \theta$.
Momen inersia	Ukuran kelembaman rotasi. Bergantung pada massa dan sebarannya terhadap sumbu.

Momentum sudut	$L = I\omega$. Kekal jika tidak ada torsi luar (penari, gasing).
Kecepatan lepas	Kecepatan minimum agar benda lepas dari tarikan gravitasi planet.
Getaran harmonik sederhana	Gerak bolak-balik dengan gaya pemulih sebanding simpangan, $F = -kx$.
Resonansi	Getaran membesar saat frekuensi pemaksa sama dengan frekuensi alami.

C • Fluida & Panas

Istilah	Arti singkat
Tekanan hidrostatik	Tekanan akibat berat zat cair, $P = \rho gh$.
Gaya apung (Archimedes)	Gaya ke atas yang sama dengan berat fluida yang dipindahkan.
Kontinuitas	Debit fluida tetap: $A_1v_1 = A_2v_2$.
Asas Bernoulli	Pada aliran yang lebih cepat, tekanan fluida lebih kecil.
Kalor jenis	Kalor untuk menaikkan suhu 1 kg zat sebesar 1 K.
Kalor laten	Kalor untuk mengubah wujud tanpa mengubah suhu.
Konduksi, konveksi, radiasi	Tiga cara perpindahan kalor: lewat sentuhan, lewat aliran fluida, dan lewat gelombang elektromagnetik.
Gas ideal	Model gas berupa partikel kecil yang hanya berinteraksi lewat tumbukan, $PV = nRT$.
Energi dalam	Jumlah energi kinetik dan potensial seluruh partikel dalam sistem.
Efisiensi mesin kalor	Perbandingan usaha berguna dengan kalor yang diserap. Batas maksimumnya efisiensi Carnot.
Entropi	Ukuran ketidakteraturan atau banyaknya cara susunan mikroskopis. Cenderung bertambah.

D • Gelombang & Cahaya

Istilah	Arti singkat
Panjang gelombang & frekuensi	Jarak satu gelombang penuh (λ) dan banyaknya gelombang tiap detik (f), dengan $v = \lambda f$.
Gelombang transversal / longitudinal	Arah getar tegak lurus / sejajar arah rambat.
Interferensi	Perpaduan dua gelombang yang saling menguatkan atau melemahkan.
Gelombang stasioner	Gelombang "diam" dengan simpul dan perut, hasil pantulan yang berpadu.
Desibel	Skala logaritmik taraf intensitas bunyi.
Efek Doppler	Perubahan frekuensi yang terdengar karena sumber atau pendengar bergerak.
Indeks bias	Perbandingan cepat rambat cahaya di vakum dengan di medium, $n = c/v$.
Pemantulan total	Cahaya terpantul seluruhnya saat sudut datang melebihi sudut kritis (prinsip serat optik).
Fokus & dioptri	Titik kumpul sinar sejajar. Daya lensa $P = 1/f$ (f dalam meter).
Difraksi	Pembelokan gelombang di tepi celah atau penghalang.
Polarisasi	Penyaringan arah getar gelombang transversal (kacamata polaroid).

E • Listrik & Magnet

Istilah	Arti singkat
Muatan listrik	Sifat partikel (positif atau negatif). Satuannya coulomb, dan nilainya selalu kelipatan muatan elektron.
Medan listrik	Gaya per satuan muatan uji, $E = F/q$.
Potensial listrik	Energi potensial per satuan muatan. Satuannya volt.

Kapasitor	Komponen penyimpan muatan dan energi, $C = Q/V$.
Arus listrik	Laju aliran muatan, $I = Q/t$, satuan ampere.
Hambatan & hukum Ohm	$V = IR$ untuk penghantar ohmik.
Hukum Kirchhoff	Arus masuk = arus keluar di titik cabang. Jumlah tegangan dalam loop tertutup = 0.
kWh	Kilowatt-jam, satuan energi listrik pada tagihan dan token: 1 kWh = 3,6 MJ.
Medan magnet	Daerah tempat gaya magnet bekerja. Satuannya tesla.
Gaya Lorentz	Gaya pada muatan atau kawat berarus dalam medan magnet.
Induksi elektromagnetik	Timbulnya GGL saat fluks magnet berubah (hukum Faraday & Lenz).
Transformator	Pengubah tegangan AC: $V_s/V_p = N_s/N_p$.
Nilai rms	Nilai efektif arus atau tegangan bolak-balik. Listrik rumah 220 V adalah nilai rms.
Spektrum elektromagnetik	Rentang gelombang EM: radio, gelombang mikro, inframerah, cahaya tampak, UV, sinar X, gamma.

F • Fisika Modern

Istilah	Arti singkat
Foton	Paket energi cahaya, $E = hf$.
Efek fotolistrik	Lepasnya elektron dari logam yang disinari cahaya berfrekuensi cukup tinggi.
Gelombang de Broglie	Partikel juga bersifat gelombang, $\lambda = h/p$.
Tingkat energi	Energi elektron dalam atom yang hanya boleh bernilai tertentu (terkuantisasi).
Dilatasi waktu	Jam yang bergerak cepat berdetak lebih lambat menurut pengamat diam.

Isotop	Atom unsur sama dengan jumlah neutron berbeda.
Waktu paruh	Waktu sampai separuh inti radioaktif meluruh.
Fisi & fusi	Pembelahan inti berat / penggabungan inti ringan. Keduanya melepaskan energi.
Semikonduktor	Bahan dengan daya hantar di antara konduktor dan isolator (silikon).
Gerbang logika	Rangkaian digital yang mengolah masukan 0/1 (AND, OR, NOT, dll.).

G • Indonesia & Semesta

Istilah	Arti singkat
Gelombang P & S	Gelombang gempa primer (longitudinal, lebih cepat) dan sekunder (transversal).
Magnitudo	Ukuran logaritmik energi gempa. Naik 1 berarti energinya ± 32 kali.
Tsunami	Gelombang laut panjang akibat gangguan dasar laut, cepat rambatnya $\approx \sqrt{gh}$.
Efek rumah kaca	Gas seperti CO ₂ menahan radiasi inframerah sehingga Bumi lebih hangat.
Energi terbarukan	Energi dari sumber yang terus diperbarui alam: surya, angin, air, panas bumi, biomassa.
Tahun cahaya	Jarak tempuh cahaya dalam setahun, $\pm 9,46 \times 10^{15}$ m.
Lubang hitam	Daerah dengan gravitasi begitu kuat sehingga cahaya pun tidak bisa lolos.

Versi cetak (PDF) & versi offline

Semua bagian Physicspedia juga tersedia sebagai PDF siap cetak untuk kelas tanpa internet: buku lengkap, LKPD (siswa & guru), bank soal (siswa & guru), dan paket ujian (siswa & guru). Untuk dibaca di HP atau laptop tanpa sinyal, simpan buku ini di perangkatmu, atau unduh **berkas offline** yang bisa dibagikan lewat WhatsApp dan flashdisk. Komik, Rumus Hidup, Lab Mini, dan bank soalnya tetap berjalan.

Tentang buku ini

Physicspedia • Fisika Itu Asyik! adalah buku fisika interaktif berbahasa Indonesia. Alur belajarnya terinspirasi dari pengamatan terhadap cara guru-guru fisika terbaik mengajar: cerita pembuka, analogi yang konkret, tabel yang ditulis bertahap, peringatan miskonsepsi, contoh bertingkat, dan latihan harian. Alur ini dipadukan dengan prinsip Pembelajaran Mendalam (berkesadaran, bermakna, menggembirakan) dan Capaian Pembelajaran 2025.

Semua soal adalah karya asli. Label "gaya IGCSE", "gaya IB", dan "gaya olimpiade" menunjukkan tingkat kesulitan dan format, bukan salinan soal ujian resmi.

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.