Physicspedia

BUKU LENGKAP · VERSI CETAK

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

Buku ini adalah versi cetak dari 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

Cara belajar dengan Physicspedia 5

BAGIAN A · FONDASI

1 Kenapa Fisika? Membaca Aturan Main Alam 9

2 Besaran, Satuan & Pengukuran 30

3 Vektor & Matematika Secukupnya 54

BAGIAN B · GERAK & GAYA

4 Gerak Lurus 75

5 Gerak Parabola & Gerak Relatif 2D 99

6 Hukum Newton tentang Gerak 121

7 Gesekan & Gerak Melingkar 145

8 Usaha, Energi & Daya 170

9 Momentum, Impuls & Tumbukan 194

10 Rotasi & Kesetimbangan Benda Tegar 215

11 Gravitasi & Satelit 236

12 Elastisitas & Getaran Harmonik 258

BAGIAN C · FLUIDA & PANAS

13 Fluida Statis 281

14 Fluida Dinamis 304

15 Suhu, Kalor & Perpindahan Kalor 331

16 Teori Kinetik Gas 356

17 Termodinamika 376

BAGIAN D · GELOMBANG & CAHAYA

18 Gelombang Mekanik 401

19 Bunyi 421

20 Cermin, Lensa & Alat Optik 444

21 Cahaya sebagai Gelombang 471

BAGIAN E · LISTRIK & MAGNET

22 Listrik Statis & Kapasitor 494

23 Listrik Dinamis 513

24 Medan Magnet 539

25 Induksi Elektromagnetik 560

26 Arus Bolak-balik 585

27 Gelombang Elektromagnetik 609

BAGIAN F · FISIKA MODERN

28 Kuantum: Foton & Gelombang Materi 631

29 Model Atom & Spektrum 652

30 Relativitas Khusus 674

31 Inti Atom & Radioaktivitas 695

32 Elektronika & Gerbang Logika 717

BAGIAN G · FISIKA UNTUK INDONESIA & SEMESTA

33 Fisika Bumi & Bencana 742

34 Energi Terbarukan & Perubahan Iklim 767

35 Astrofisika & Alam Semesta 794

LAMPIRAN

Peta Rumus: semua Rumus Hidup 823

Penutup, glosarium & panduan guru 841

Cara Belajar dengan Physicspedia

Kenalan dulu, yuk!

Raka

Anak SMP dari Palembang yang selalu bertanya "kenapa?". Suka menebak cepat, kadang kena jebakan. Justru dari situ ia belajar!

Sari

Teman sekelas Raka dari Makassar. Tidak gampang percaya. Kalimat favoritnya: "Buktinya mana? Ayo kita ukur!"

Kak Nara

Kakak mentor fisika yang humoris. Selalu bawa spidol, selalu punya analogi, dan tidak pernah mengejek pertanyaan "bodoh".

Tarsi si Tarsius

Maskot dari hutan Sulawesi. Matanya sangat besar karena ia ahli **mengamati**, langkah pertama setiap ilmuwan.

Cara belajar di Physicspedia

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

1. Komik pembuka
Masalah nyata dari kehidupan sehari-hari.

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

3. Cerita & analogi
Konsep abstrak dibuat konkret dan lucu.

4. Lab Mini
Simulasi yang bisa kamu atur sendiri.

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

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

7. Awas Jebakan!
Miskonsepsi yang paling sering muncul.

8. Cek Cepat
Tiga pertanyaan untuk menguatkan ingatan.

9. Tantangan Rumah
Eksperimen dengan bahan dapur.

10. Tangga Latihan
Soal dari Pemula sampai Olimpiade.

TIGA MODE BACAAN

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

Pilih jalur belajarmu

🌱 SD – SMP

Bacaan **Dasar**. Mulai dari Bab 1, 2, 4, 6, 8, 13, 15, 19, 20, 23, 33–35.

Lv 1 Lv 2

⚔ SMA · TKA · UTBK

Bacaan **SMA**. Ikuti urutan bab. Fokus pada Rumus Hidup dan contoh bertingkat.

Lv 2 Lv 3

🌍 IGCSE · IB

Bacaan **Lanjut**. Perhatikan kotak 🚀 dan soal berbahasa data, grafik, serta ketidakpastian.

Lv 4 Lv 5

🏆 Olimpiade (OSN)

Bacaan **Lanjut**. Kuasai Bab 3 (vektor & kalkulus), lalu taklukkan Tantangan Olimpiade di Bank Soal.

Lv 5 Lv 6

Tangga 6 level soal

Level	Untuk siapa	Ciri soal
Lv 1 · Pemula	SD – awal SMP	Mengenali konsep, angka sederhana, gambar.
Lv 2 · Penjelajah	SMP (Fase D)	Satu langkah hitungan, membaca grafik sederhana.
Lv 3 · Pejuang	SMA · TKA · UTBK	Beberapa langkah, konteks nyata, analisis.
Lv 4 · IGCSE	Gaya Cambridge IGCSE	Soal terstruktur, data eksperimen, penjelasan dengan kata-kata.
Lv 5 · IB DP	Gaya IB Physics SL/HL	Analisis data, ketidakpastian, model, konsep yang dalam.
Lv 6 · Olimpiade	Gaya OSN · APhO · IPhO	Tidak rutin, butuh ide kreatif, kalkulus, dan pemodelan.

Peta isi buku

Bagian A · Fondasi

1 Kenapa Fisika? Membaca Aturan Main Alam
2 Besaran, Satuan & Pengukuran
3 Vektor & Matematika Secukupnya

Bagian B · Gerak & Gaya

4 Gerak Lurus
5 Gerak Parabola & Gerak Relatif 2D
6 Hukum Newton tentang Gerak
7 Gesekan & Gerak Melingkar
8 Usaha, Energi & Daya
9 Momentum, Impuls & Tumbukan
10 Rotasi & Kesetimbangan Benda Tegar
11 Gravitasi & Satelit
12 Elastisitas & Getaran Harmonik

Bagian C · Fluida & Panas

13 Fluida Statis
14 Fluida Dinamis
15 Suhu, Kalor & Perpindahan Kalor
16 Teori Kinetik Gas
17 Termodinamika

Bagian D · Gelombang & Cahaya

18 Gelombang Mekanik
19 Bunyi
20 Cermin, Lensa & Alat Optik
21 Cahaya sebagai Gelombang

Bagian E · Listrik & Magnet

22 Listrik Statis & Kapasitor
23 Listrik Dinamis
24 Medan Magnet
25 Induksi Elektromagnetik
26 Arus Bolak-balik
27 Gelombang Elektromagnetik

Bagian F · Fisika Modern

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

Bagian G · Fisika untuk Indonesia & Semesta

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

Selaras dengan kurikulum

Kurikulum	Bab yang paling relevan
IPAS SD (Fase B–C)	1 · 4 · 6 · 8 · 19 · 20 · 23 · 35 (bacaan Dasar)
IPA SMP (Fase D)	2 · 4 · 6 · 8 · 13 · 15 · 18 · 19 · 20 · 23 · 24 · 33 · 34 · 35
IPA kelas X (Fase E)	2 (pengukuran) · 3 · 4 · 5 (kinematika, pindahan dari Fase F) · 34 (perubahan iklim & energi alternatif)
Fisika XI–XII (Fase F)	6–12 (gerak & gaya) · 13–14 (fluida) · 15–17 (kalor & termodinamika) · 18–19 (gelombang) · 22–23 (listrik) · 24–27 (elektromagnetik) · 28–31 (fisika modern) · 32 (teori dasar digital)
Cambridge IGCSE Physics	2, 4–10 (gerak, gaya, energi) · 13, 15–17 (termal) · 18–21 (gelombang, cahaya, bunyi) · 22–25 (listrik & magnet) · 31 (nuklir) · 35 (fisika antariksa)
IB Physics DP	Tema A: 4–10, 30 · Tema B: 15–17 · Tema C: 12, 18–21 · Tema D: 11, 22, 24–25 · Tema E: 28, 29, 31
OSN Fisika	Semua bab. Mekanika (3–12) adalah fondasi terpenting.

Rujukan: Capaian Pembelajaran 2025 (Keputusan Kepala BSKAP No. 046/H/KR/2025) dan Panduan Mata Pelajaran Fisika Fase F (2025). Tautan "gaya IGCSE/IB" menunjukkan tingkat dan format soal, bukan soal resmi.

BAB 1 · FONDASI

01 Kenapa Fisika? Membaca Aturan Main Alam

Bayangkan kamu menonton sebuah permainan yang aturannya tidak pernah diberitahukan. Kamu hanya boleh menonton, lalu menebak aturannya. Selamat datang di fisika: permainan terbesar di alam semesta, dan kamu baru saja diundang ikut bermain.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan fisika sebagai usaha **membaca aturan main alam** lewat pengamatan, seperti menebak aturan congklak;
- membandingkan ukuran benda dari kuark sampai galaksi memakai **pangkat sepuluh** dan menaksir **orde besaran**;
- menjalankan **metode ilmiah**: mengamati, bertanya, berhipotesis, bereksperimen dengan **variabel terkendali**, lalu menyimpulkan;
- menyebut cabang-cabang fisika dan **empat gaya dasar** alam;
- mengenali fisika di balik teknologi Indonesia dan sikap ilmiah seorang peneliti.

RAHASIA PAPAN CONGKLAK

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Raka sudah menonton 20 giliran congklak. Setiap kali, biji dibagikan satu-satu sambil memutar. Apakah sekarang Raka pasti sudah tahu semua aturan congklak?

- Ya, 20 kali menonton sudah lebih dari cukup.
- Ya, karena aturan yang sama terus terulang.
- Belum pasti. Ia hanya yakin pada aturan yang sudah terlihat; aturan yang jarang muncul bisa saja belum teramati.
- Tidak, karena aturan permainan tidak mungkin ditebak tanpa membaca buku aturan.

Jawabannya: belum pasti. Aturan "nembak" baru muncul ketika biji terakhir jatuh di lubang kosong milik sendiri, dan itu jarang terjadi. Fisika juga begitu. Hukum Newton cocok dengan pengamatan selama lebih dari 200 tahun, sampai orang meneliti benda yang *sangat cepat* dan *sangat kecil*. Ternyata di sana ada "aturan langka" baru: relativitas dan fisika kuantum. Hukum Newton tidak dibuang. Ia tetap benar untuk kehidupan sehari-hari, hanya saja kini kita tahu batas berlakunya.

1.1 Fisika: membaca aturan main alam

Kata **fisika** berasal dari bahasa Yunani *physis*, artinya "alam". Fisika menyelidiki **materi**, **energi**, **gerak**, serta **ruang dan waktu**, lalu mencari aturan sederhana yang menjelaskan semuanya. Mengapa mangga jatuh? Mengapa langit biru? Mengapa HP bisa menangkap sinyal dari menara yang jauh? Semuanya ditebak, diuji, dan dijelaskan dengan aturan yang sama di mana pun di alam semesta.

Ingat lagi komik tadi. Raka tidak diberi buku aturan congklak. Ia hanya **mengamati**, **menebak** aturan, lalu **menguji** tebakannya pada giliran berikutnya. Begitu pula fisikawan. Alam tidak pernah memberi kita "buku petunjuk". Kita harus membacanya sendiri dari pengamatan.

Di permainan congklak	Di alam semesta
papan dengan 16 lubang	ruang dan waktu, "panggung" tempat semuanya terjadi
biji kerang	materi: atom, elektron, cahaya
aturan membagikan biji	**hukum fisika**, misalnya hukum gerak Newton
total biji selalu 98 (7 lubang × 7 biji × 2 pemain)	**hukum kekekalan**: energi, momentum, dan muatan listrik total tidak berubah
aturan langka "nembak"	peristiwa ekstrem: sangat cepat, sangat kecil, sangat panas
Raka menonton dan menebak	**eksperimen** dan **teori**

Bahasa sederhana · Gampangnya: fisika itu seperti menjadi **detektif alam**. Kita melihat kejadian, menebak "aturan rahasianya", lalu mencoba lagi untuk memastikan tebakan kita benar.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Fisikawan Amerika **Richard Feynman** (1918–1988), peraih Nobel Fisika 1965, punya perumpamaan terkenal. Alam itu seperti permainan catur raksasa yang dimainkan para dewa. Kita penonton yang tidak diberi tahu aturannya. Dengan menonton cukup lama, kita bisa menebak aturan dasarnya. Lalu sesekali muncul langkah aneh yang membuat kita sadar ada aturan yang belum kita ketahui. Di buku ini, catur Feynman kita ganti dengan permainan khas Nusantara: **congklak**.

LAB MINI **Congklak Detektif: tebak aturan rahasianya!**

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

Eksperimen ke-0 **Total biji: 98 (selalu tetap!)**

Ketuk salah satu lubang di barismu (baris bawah) untuk memulai eksperimen.

Pemeriksaan: 0×

Eksperimen	Total biji	Biji di tangan	"Nembak" teramati
0	98 ✓	0	0×

Komputer memakai **aturan rahasia**. Ketuk satu lubang di barismu (baris bawah) untuk "bereksperimen", lalu amati ke mana biji dibagikan. Isi tebakanmu di bawah, kemudian tekan **Periksa tebakanku**. Lumbungmu adalah lumbung yang dicapai tepat setelah barismu; lumbung satunya milik lawan. Perhatikan juga angka **Total biji**. Apakah pernah berubah?

TRIK KAK NARA: RANCANG EKSPERIMENMU

Ingin menguji satu aturan tertentu? Pilih langkah yang **bisa membedakan** tebakan-tebakanmu. Contoh: untuk tahu apakah lumbung lawan dilewati, kamu butuh putaran yang cukup panjang untuk melewatinya. Jadi pilih lubang yang bijinya paling banyak. Fisikawan menyebut ini *merancang eksperimen*.

1.2 Dari kuark sampai galaksi: skala alam semesta

Fisika berlaku untuk benda **sangat kecil** (proton di dalam atom) sampai **sangat besar** (galaksi). Rentangnya luar biasa: dari kira-kira 10^{-18} m sampai 10^{27} m. Menulis angka sebesar itu dengan nol semua bisa bikin pegal. Karena itu fisikawan memakai **pangkat sepuluh**:

$10^3 = 1000$ (tiga nol), $10^6 = 1.000.000$ (enam nol), $10^{-3} = 0{,}001$ (koma bergeser tiga langkah ke kiri).

Tinggi Raka sekitar $1{,}5$ m, jadi "seukuran 10^0 m". Bumi berdiameter $1{,}27 \times 10^7$ m. Atom hidrogen hanya sekitar 1×10^{-10} m. Angka di depan (1,5 atau 1,27) disebut **angka depan**, dan pangkatnya memberi tahu **seberapa raksasa atau mungil** benda itu. Cara menulis ini disebut **notasi ilmiah**; kamu akan memakainya terus di Bab 2.

Benda	Ukuran kira-kira	Pangkat sepuluh
proton (penghuni inti atom)	0,000 000 000 000 001 7 m	$\sim 10^{-15}$ m
atom hidrogen	0,000 000 000 1 m	$\sim 10^{-10}$ m
sel darah merah	0,000 008 m	$\sim 10^{-5}$ m
semut rangrang	0,008 m	$\sim 10^{-2}$ m
Raka	1,5 m	$\sim 10^{0}$ m
Monas	132 m	$\sim 10^{2}$ m
Bumi (diameter)	12.742.000 m	$\sim 10^{7}$ m
galaksi Bimasakti	±100.000 tahun cahaya	$\sim 10^{21}$ m
alam semesta teramati	±93 miliar tahun cahaya	$\sim 10^{27}$ m

RUMUS HIDUP

Skala 10^n: menulis ukuran raksasa dan mungil

$$x = a \times 10^{n}\ \mathrm{m}$$

Angka depan a dikali 10 sebanyak n kali. Pangkat positif berarti raksasa, pangkat negatif berarti mungil.

a Angka depan | n Pangkat sepuluh | x Ukuran m

UKURAN

1,5

m

Angka depan **1,5** dengan pangkat **0** menghasilkan ukuran **1,5** m. Lihat pembandingnya di bawah, lalu coba n = 7 (seukuran Bumi) atau n = –10 (seukuran atom).

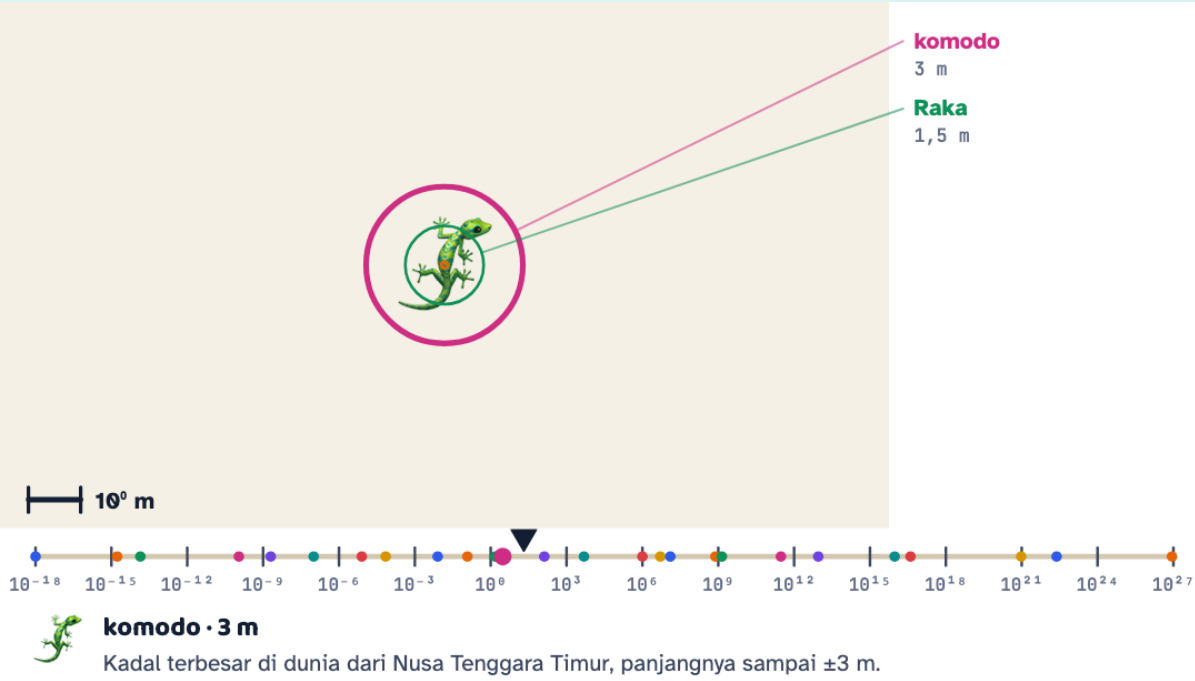
Satuan Nusantara: ≈ 1 × tinggi Raka · ≈ 188 × semut rangrang

Cek satuan: $10^3\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{km}$, $10^{-3}\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{mm}$, $10^{-9}\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{nm}$ (nanometer).

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-SKALA-10N

LAB MINI **Zoom alam semesta: dari kuark sampai galaksi**

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



Lebar layar	Seukuran dengan	Cahaya melintasi layar dalam
20,417 m	komodo	68,1 nanosekon

Geser **pangkat sepuluh** atau tekan **Zoom keluar**. Setiap kenaikan 1 berarti layar menjadi 10 kali lebih lebar. Berapa kali lipat 10 yang memisahkan atom dari Raka? Dari Raka ke Bumi?

TRIK KAK NARA: HITUNG LOMPATAN

Untuk membandingkan dua benda, cukup **kurangkan pangkatnya**. Bumi (10^7 m) dibanding Raka (10^0 m): $7 - 0 = 7$, jadi Bumi sekitar 10^7 = sepuluh juta kali lebih besar daripada Raka. Atom (10^{-10} m) dibanding Raka: $0 - (-10) = 10$, jadi Raka sepuluh miliar kali lebih besar daripada atom!

Cahaya adalah "pelari" tercepat di alam semesta: sekitar 3×10^8 m/s, cukup untuk mengelilingi Bumi 7,5 kali dalam satu detik. Tetapi alam semesta begitu luas sehingga cahaya pun butuh waktu untuk menyeberanginya. Itu sebabnya astronom mengukur jarak dengan **tahun cahaya**: jarak yang ditempuh cahaya dalam satu tahun, sekitar $9{,}46 \times 10^{15}$ m.

RUMUS HIDUP **Waktu tempuh cahaya**

$$t = \frac{d}{c}$$

Cahaya sangat cepat, tetapi tidak instan. Makin jauh jaraknya, makin lama cahaya sampai.

d Jarak m

t Waktu tempuh s

WAKTU TEMPUH

1,28

s

Cahaya menempuh jarak **3,84 × 10⁸** m dalam **1,28** sekon. Artinya, saat kamu melihat benda sejauh itu, kamu sedang melihat masa lalunya!

Satuan Nusantara: ≈ 4,3 × kedipan mata · ≈ 2% dari satu menit

Cek satuan: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{m/s}} = \mathrm{s}$. Di sini $c = 3 \times 10^8$ m/s adalah kecepatan cahaya.

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

CONTOH **Sinar Bulan yang 'terlambat'**

Jarak Bumi–Bulan sekitar $3{,}84 \times 10^8$ m. Berapa lama cahaya Bulan sampai ke matamu?

1. Gunakan $t = d/c$ dengan $c = 3 \times 10^8$ m/s.
2. $t = \frac{3{,}84 \times 10^8}{3 \times 10^8} = 1{,}28$ s. Pangkat sepuluhnya saling menghapus!

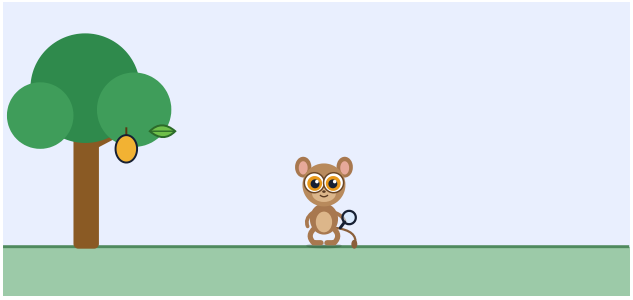
Sekitar 1,3 sekon. Bulan yang kamu lihat malam ini adalah Bulan 1,3 detik yang lalu. Matahari? Kira-kira 8 menit yang lalu!

MENGAPA HARUS TAHU SKALA?

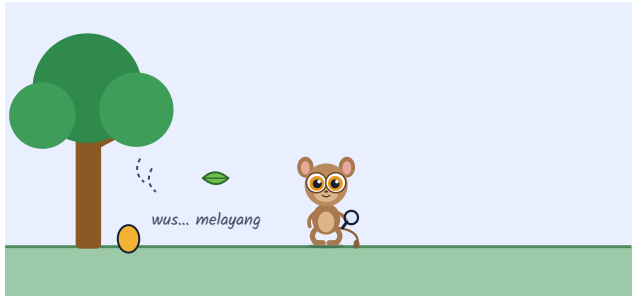
Aturan main alam bisa berbeda di skala yang berbeda. Di skala manusia, hukum Newton juara. Di skala atom (10^{-10} m), berlaku fisika kuantum. Di skala galaksi dan kecepatan mendekati cahaya, berlaku relativitas Einstein. Fisikawan selalu bertanya dulu: "Kita sedang bermain di skala berapa?"

1.3 Metode ilmiah: cara detektif alam bekerja

Menebak aturan alam tidak boleh asal-asalan. Ada urutan langkah yang membuat tebakan kita bisa dipercaya: **metode ilmiah**. Ikuti Tarsi si tarsius yang penasaran pada buah yang jatuh.



Langkah 1. Suatu sore, sebuah mangga dan selembar daun lepas dari dahan pada saat yang sama. Tarsi kebetulan duduk di bawah pohon.



Langkah 2. ① Mengamati. Mangga sampai di tanah lebih dulu. Daun masih melayang-layang. Tarsi mencatat apa yang ia lihat, tanpa menambah-nambahi.

Langkah 3. ② Bertanya. Pengamatan memancing pertanyaan yang bisa diselidiki: "Apakah benda yang lebih berat selalu jatuh lebih cepat?"

Langkah 4. ③ Berhipotesis. Hipotesis adalah *tebakan cerdas yang bisa diuji*. Tarsi menduga daun lambat karena bentuknya lebar sehingga ditahan udara, bukan karena massanya kecil.

Langkah 5. ④ Bereksperimen. Dua lembar kertas yang sama persis (massanya sama!). Satu diremas menjadi bola. Hanya **satu** hal yang diubah, yaitu bentuknya. Yang lain dibuat tetap.

Langkah 6. ⑤ Mengumpulkan dan menganalisis data. Keduanya dilepas dari tinggi yang sama, diulang 5 kali. Bola kertas jatuh dalam ±0,6 s, kertas datar ±1,8 s. Massanya sama, tetapi waktunya jauh berbeda!

Langkah 7. ⑥ Menyimpulkan dan berbagi. Hipotesis didukung: bentuk (hambatan udara) yang membedakan, bukan massa. Tarsi menulis laporan agar teman-temannya bisa mengulang percobaan dan mengujinya sendiri.

Dalam eksperimen yang adil, kita membedakan tiga jenis **variabel**:

Jenis variabel	Artinya	Pada eksperimen kertas Tarsi
Bebas (manipulasi)	yang sengaja **diubah** oleh peneliti	bentuk kertas
Terikat (respons)	yang **diukur** untuk melihat akibatnya	waktu jatuh
Kontrol	yang dibuat **tetap** agar perbandingannya adil	massa kertas, tinggi jatuh, ruangan tanpa kipas angin

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Kalau kamu mengubah **dua** hal sekaligus (misalnya bentuk *dan* massa), lalu hasilnya berubah, kamu tidak bisa tahu mana penyebabnya. Itu seperti mengganti pemain *dan* pelatih sekaligus, lalu menang. Siapa yang berjasa? Tidak ketahuan!

Tebak Dulu!

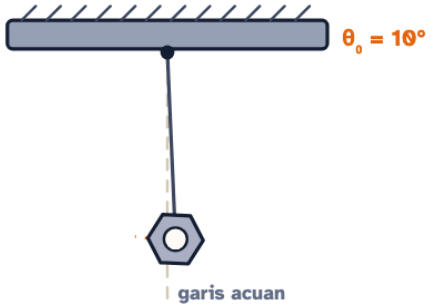
Dua bandul punya tali yang sama panjang. Bandul A memakai mur kecil, bandul B memakai gembok yang 10 kali lebih berat. Keduanya diayun dari sudut kecil yang sama. Bandul mana yang berayun bolak-balik lebih cepat?

- Bandul B, karena benda berat bergerak lebih cepat.
- Bandul A, karena benda ringan lebih lincah.
- Sama saja: waktu satu ayunannya hampir sama.
- Tidak bisa ditebak sama sekali.

Jawabannya: sama saja. Untuk tali yang sama panjang dan sudut kecil, waktu satu ayunan (**periode**) hampir tidak bergantung pada massa beban. Yang menentukan adalah **panjang tali** (dan gravitasi). Jangan percaya begitu saja: buktikan sendiri di Lab Mini berikut!

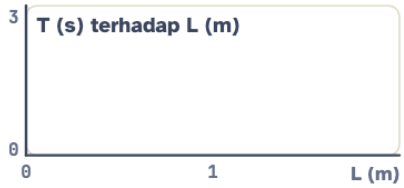
LAB MINI Bandul detektif: apa yang memengaruhi periode?

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



#	L (m)	m (kg)	θ_0 (°)	T (s)

Tabel masih kosong. Tekan "Jalankan" untuk mengukur 10 ayunan.



STOPWATCH · ayunan 1/10

3,6 s

Ayunan dihitung	Stopwatch	Periode T = waktu 10 ayunan ÷ 10
1 / 10	3,6 s	—

Atur satu variabel, lalu tekan **Jalankan**. Stopwatch otomatis mengukur 10 ayunan dan menulis hasilnya di tabel. Sel berwarna oranye menandai variabel yang berubah dari percobaan sebelumnya. Ubah **satu variabel saja** setiap kali. Variabel mana yang benar-benar mengubah periode?

TAMU DARI MASA LALU

Menurut kisah yang terkenal, pada tahun 1583 **Galileo Galilei** yang masih mahasiswa memperhatikan lampu gantung yang berayun di Katedral Pisa. Ia mengukur waktu ayunannya dengan denyut nadinya sendiri, karena jam belum ada! Ayunan besar maupun kecil tampak memakan waktu yang sama. Penemuan ini kelak melahirkan **jam bandul**, jam paling akurat di dunia selama hampir 300 tahun.

KERJAKAN BERSAMA **Mengolah data bandul**

Sari mengukur waktu 10 ayunan. Tali 0,25 m: 10,0 s. Tali 1,00 m: 20,1 s. Massa dan sudut dibuat tetap. Berapa periode masing-masing, dan apa polanya?

1. Periode = waktu satu ayunan penuh. Tali 0,25 m: $T = 10{,}0/10 = 1{,}00$ s.
2. Tali 1,00 m: $T = 20{,}1/10 = 2{,}01$ s.
3. Panjang tali menjadi **4 kali**, periodenya menjadi **±2 kali**. Karena $2 = \sqrt{4}$, periode sebanding dengan akar panjang tali: $T \propto \sqrt{L}$.

$T_1 = 1{,}00$ s dan $T_2 = 2{,}01$ s. Polanya: tali 4 kali lebih panjang membuat ayunan 2 kali lebih lama. Di Bab 2 kamu akan menurunkan rumus lengkapnya, $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, hanya dengan "mencocokkan satuan"!

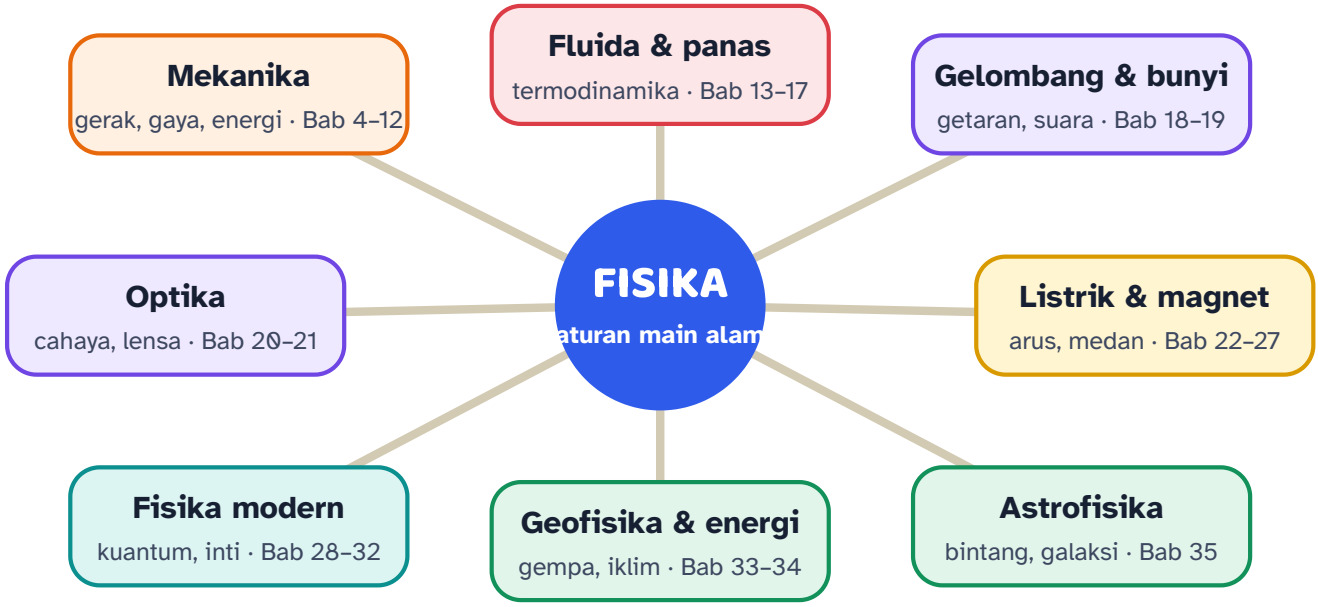
LANJUT · IB & OLIMPIADE

BANDUL TIDAK BENAR-BENAR "SETIA WAKTU"

Galileo mengira periode bandul sama persis untuk semua simpangan (isokron). Ternyata itu hanya berlaku untuk sudut kecil. Rumus yang lebih teliti adalah $T \approx 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left(1 + \frac{\theta_0^2}{16}\right)$ dengan θ_0 dalam radian. Untuk $\theta_0 = 60^\circ$ ($\approx 1{,}05$ rad), periodenya kira-kira 7% lebih panjang daripada untuk sudut kecil. Lab Mini di atas memakai persamaan gerak lengkap $\ddot{\theta} = -\frac{g}{L}\sin\theta$, jadi efek ini bisa kamu "temukan" sendiri. Coba bandingkan 10° dan 70°!

1.4 Cabang fisika dan empat gaya dasar alam

Fisika begitu luas sehingga dibagi menjadi beberapa **cabang**. Peta di bawah ini sekaligus peta buku Physicspedia: setiap cabang punya bab-babnya sendiri.



Cabang-cabang fisika. Ada juga cabang "perbatasan" seperti biofisika, fisika medis, dan fisika material.

Hebatnya, semua kejadian di alam semesta, dari apel jatuh sampai bintang meledak, ternyata hanya digerakkan oleh **empat gaya dasar**:

Gaya dasar	Kekuatan relatif (kira-kira)	Jangkauan	Contoh
💪 **Gaya kuat**	1 (paling kuat)	sangat pendek, $\sim 10^{-15}$ m	merekatkan proton dan neutron di inti atom
⚡ **Gaya elektromagnetik**	10^{-2}	tak terbatas	listrik, magnet, cahaya, gesekan, gaya normal, ikatan kimia
☢️ **Gaya lemah**	10^{-13}	sangat pendek, $\sim 10^{-18}$ m	peluruhan radioaktif; membantu Matahari "membakar" hidrogen
🍎 **Gravitasi**	10^{-39} (paling lemah)	tak terbatas	mangga jatuh, Bulan mengelilingi Bumi, galaksi berputar

Aneh, bukan? Gravitasi yang paling lemah justru paling terasa dalam hidup kita. Rahasianya: gravitasi selalu **menarik** dan jangkauannya tak terbatas, jadi tarikan dari seluruh atom Bumi terkumpul. Gaya listrik bisa menarik *dan* menolak, sehingga muatan positif dan negatif biasanya saling menetralkan. Coba gosokkan penggaris plastik ke rambut, lalu dekatkan ke sobekan kertas. Penggaris kecil itu bisa mengalahkan tarikan gravitasi **seluruh Bumi** pada kertas!

Bahasa sederhana · Ada empat "tangan" yang menggerakkan alam: **gravitasi** (menarik semua benda), **listrik-magnet** (petir, magnet kulkas, cahaya), dan dua gaya yang hanya bekerja di dalam inti atom: **gaya kuat** dan **gaya lemah**.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MIMPI BESAR: MENYATUKAN SEMUA GAYA

Dulu listrik dan magnet dianggap dua gaya terpisah, sampai James Clerk Maxwell menyatukannya pada 1860-an (sekaligus menemukan bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik). Pada 1970-an, gaya elektromagnetik dan gaya lemah terbukti dua wajah dari satu gaya *elektrolemah* (Nobel 1979 untuk Glashow, Salam, dan Weinberg). Menyatukan gaya kuat, lalu gravitasi, masih menjadi teka-teki terbesar fisika. Angka "kekuatan relatif" di tabel hanyalah gambaran kasar, karena nilainya bergantung pada jarak dan cara membandingkannya.

1.5 Fisika dan teknologi Indonesia

Setiap kali aturan main alam terbaca, lahirlah teknologi baru. Hukum gerak melahirkan mesin dan roket. Listrik-magnet melahirkan generator, radio, dan HP. Fisika kuantum melahirkan transistor, laser, dan panel surya. Indonesia juga punya kisah fisikanya sendiri.

Satelit SATRIA-1

Diluncurkan Juni 2023 ke orbit geostasioner ±36.000 km. Satelit ini membawa internet ke puluhan ribu sekolah, puskesmas, dan kantor desa di daerah terpencil.

Listrik dari panas bumi

Indonesia penghasil listrik panas bumi (PLTP) terbesar kedua di dunia. PLTP pertama dibangun di Kamojang, Garut. Fisika kalor mengubah uap panas dari perut Bumi menjadi listrik.

Kereta cepat

Kereta cepat Jakarta–Bandung melaju sampai 350 km/jam. Rel, rem, aerodinamika, dan motor listriknya adalah fisika terapan.

Peringatan dini gempa

BMKG memakai seismometer, alat yang "mendengar" getaran Bumi, untuk memperkirakan lokasi gempa dan risiko tsunami dalam hitungan menit.

Mata ke langit

Observatorium Bosscha di Lembang berdiri sejak 1923. Observatorium Nasional Timau di NTT, dengan teleskop 3,8 m, menjadi yang terbesar di Asia Tenggara.

Fisika di rumah sakit

Rontgen (sinar-X), USG (gelombang bunyi), dan MRI (magnet superkuat) semuanya alat fisika yang menyelamatkan nyawa.

FISIKA INDONESIA

B.J. Habibie (1936–2019) adalah insinyur dirgantara yang terkenal di dunia. Ia mengembangkan cara menghitung **perambatan retak** (*crack progression*) pada badan pesawat, sehingga retak halus pada logam bisa diperkirakan sebelum berbahaya. Di dunia penerbangan, nama ini dikenal sebagai "Faktor Habibie". **Yohanes Surya** membina Tim Olimpiade Fisika Indonesia sejak 1990-an. Sejak itu siswa-siswi Indonesia rutin membawa pulang medali emas olimpiade fisika internasional. Pada 2006, Jonathan Pradana Mailoa bahkan menjadi juara umum dunia. Lembaga riset nasional kini bernaung di **BRIN** (Badan Riset dan Inovasi Nasional), tempat fisikawan Indonesia meneliti dari nuklir sampai antariksa.

MITOS

"Fisika itu cuma menghafal rumus."

FAKTA

Rumus hanyalah cara singkat menuliskan cerita alam. Yang penting adalah memahami ceritanya: mengapa terjadi, kapan berlaku, dan bagaimana mengujinya. Fisikawan malah sering **menurunkan** rumusnya sendiri.

MITOS

"Teori ilmiah itu cuma tebakan, jadi belum tentu benar."

FAKTA

Tebakan awal disebut **hipotesis**. **Teori** adalah penjelasan yang sudah diuji ribuan kali dan cocok dengan banyak data, misalnya teori gravitasi dan teori atom. Teori tetap terbuka untuk diperbaiki jika muncul data baru.

MITOS

"Fisika tidak ada hubungannya dengan hidupku."

FAKTA

HP, listrik PLN, kendaraan, kompor, internet, sampai ramalan cuaca semuanya bekerja berkat fisika. Bahkan berjalan kaki pun memakai hukum Newton!

1.6 Ilmuwan dan sikap ilmiah

Alat paling penting seorang fisikawan bukanlah laboratorium mahal, melainkan **sikapnya**. Inilah enam sikap ilmiah yang akan kamu latih di sepanjang buku:

Sikap	Artinya	Siapa contohnya

🔍 **Ingin tahu**	berani bertanya "kenapa?" tentang hal sehari-hari	Raka, selalu
🤨 **Skeptis**	tidak langsung percaya; minta bukti dan data	Sari: "Buktinya mana?"
📏 **Teliti**	mengukur dengan hati-hati dan mengulang pengukuran	Tarsi yang mengulang 5 kali
🤞 **Jujur**	melaporkan data apa adanya, termasuk yang tidak sesuai harapan	Kepler (lihat di bawah)
💪 **Berani salah**	salah tebak itu wajar; yang penting mau memperbaiki	semua ilmuwan besar
🤝 **Terbuka & bekerja sama**	membagikan hasil agar diuji orang lain	laporan Tarsi

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Johannes Kepler (1571–1630) bertahun-tahun mencoba menjelaskan gerak planet Mars dengan orbit berbentuk lingkaran. Model terbaiknya hanya meleset sedikit sekali dari data pengamatan Tycho Brahe, sekitar 8 menit busur (kira-kira seperempat lebar Bulan purnama di langit). Banyak orang mungkin akan berkata "sudah cukup dekat". Kepler jujur pada data, membuang modelnya, dan akhirnya menemukan bahwa orbit planet berbentuk **elips**.

Berani menaksir: perkiraan Fermi

Fisikawan Italia **Enrico Fermi** terkenal pandai menaksir jawaban soal yang tampak mustahil dengan beberapa asumsi masuk akal. Hasilnya memang tidak tepat, tetapi **pangkat sepuluhnya** (**orde besaran**) biasanya benar. Contoh: berapa butir beras yang dimakan seluruh penduduk Indonesia dalam sehari?

RUMUS HIDUP

Perkiraan Fermi: butir beras Indonesia per hari

$$N = \frac{P \times 10^6 \times m_h}{m_b}$$

Jumlah butir = jumlah orang × beras per orang, lalu dibagi massa sebutir beras.

- P Penduduk juta orang
- m_h Beras per orang per hari g
- m_b Massa sebutir beras g
- N Butir beras per hari butir

BUTIR BERAS PER HARI

$3{,}5 \times 10^{12}$

butir

280 juta orang × **250** g ÷ **0,02** g ≈ **$3{,}5 \times 10^{12}$** butir setiap hari! Perhatikan pangkat sepuluhnya untuk menaksir orde besaran jawabanmu.

Cek satuan: $\frac{\text{orang} \times \text{g/orang}}{\text{g/butir}} = \text{butir}$. Satuan gram saling menghapus.

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

COBA SENDIRI

Detak jantung seumur hidup

Taksir orde besaran jumlah detak jantung seseorang yang hidup 70 tahun. Anggap jantung berdetak 70 kali per menit.

1. Detak per hari: $70 \times 60 \times 24 \approx 1{,}0 \times 10^5$.
2. Detak per tahun: $1{,}0 \times 10^5 \times 365 \approx 3{,}7 \times 10^7$.
3. Selama 70 tahun: $3{,}7 \times 10^7 \times 70 \approx 2{,}6 \times 10^9$.
4. Karena 2,6 lebih kecil dari $\sqrt{10} \approx 3{,}16$, orde besarnya 10^9.

Sekitar 2–3 miliar detak, orde besaran 10^9. Jantungmu adalah mesin yang sangat tekun!

LANJUT · OLIMPIADE

ATURAN MEMBULATKAN ORDE BESARAN

Orde besaran adalah pangkat 10 terdekat *dalam skala logaritma*. Tulis $x = a \times 10^n$. Jika $a < \sqrt{10} \approx 3{,}16$, orde besarnya 10^n; jika $a \geq 3{,}16$, orde besarnya 10^{n+1}. Jadi $3{,}5 \times 10^{12}$ butir beras berorde 10^{13}, bukan 10^{12}. Dalam soal olimpiade, kunci perkiraan Fermi adalah **menuliskan asumsi dengan jelas** agar orang lain bisa memeriksanya.

Cek Cepat

Raka mengubah panjang tali dan massa beban bandul sekaligus, lalu periodenya berubah. Apa yang dapat ia simpulkan?

- Panjang tali memengaruhi periode.
- Massa beban memengaruhi periode.
- Belum bisa disimpulkan, karena dua variabel diubah bersamaan.
- Bandulnya rusak.

Cahaya dari Bulan sampai ke Bumi dalam waktu sekitar...

- 1,3 sekon
- 8 menit
- 1 jam
- 4 tahun

Gaya dasar yang merekatkan proton-proton di dalam inti atom adalah...

- gravitasi
- gaya elektromagnetik
- gaya lemah
- gaya kuat

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: bandul mur

Bahan: benang jahit ±1 m, 3 buah mur yang sama, selotip, penggaris, stopwatch HP

1. Ikat satu mur di ujung benang, lalu tempelkan ujung lainnya di tepi meja dengan selotip. Atur panjang benang 25 cm (dari selotip sampai tengah mur).
2. Simpangkan mur sedikit (sekitar selebar telapak tangan), lalu lepaskan. Ukur waktu **10 ayunan penuh**. Ulangi 3 kali, lalu hitung rata-ratanya.
3. Ulangi untuk panjang 50 cm dan 100 cm.
4. Kembali ke 50 cm, lalu ganti beban dengan 3 mur sekaligus. Apakah waktunya berubah?

Pertanyaan: Variabel mana yang mengubah periode? Jika panjang tali dibuat 4 kali, periodenya menjadi berapa kali? Mengapa mengukur 10 ayunan lebih baik daripada 1 ayunan?

RINGKASAN KILAT — Bab 1 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan fisika sebagai usaha **membaca aturan main alam** lewat pengamatan, seperti menebak aturan congklak
- membandingkan ukuran benda dari kuark sampai galaksi memakai **pangkat sepuluh** dan menaksir **orde besaran**
- menjalankan **metode ilmiah**: mengamati, bertanya, berhipotesis, bereksperimen dengan **variabel terkendali**, lalu menyimpulkan
- menyebut cabang-cabang fisika dan **empat gaya dasar** alam
- mengenali fisika di balik teknologi Indonesia dan sikap ilmiah seorang peneliti

Istilah kunci

fisika · pangkat sepuluh · notasi ilmiah · tahun cahaya · metode ilmiah · variabel · periode · orde besaran

Rumus penting

$$x = a \times 10^{n}\ \mathrm{m}$$

Skala 10^n: menulis ukuran raksasa dan mungil. Angka depan a dikali 10 sebanyak n kali. Pangkat positif berarti raksasa, pangkat negatif berarti mungil.

$$t = \frac{d}{c}$$

Waktu tempuh cahaya. Cahaya sangat cepat, tetapi tidak instan. Makin jauh jaraknya, makin lama cahaya sampai.

$$N = \frac{P \times 10^6 \times m_h}{m_b}$$

Perkiraan Fermi: butir beras Indonesia per hari. Jumlah butir = jumlah orang × beras per orang, lalu dibagi massa sebutir beras.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Kalau kamu mengubah dua hal sekaligus (misalnya bentuk dan massa), lalu hasilnya berubah, kamu tidak bisa tahu mana penyebabnya.

⛰️ 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=1

🧩 Teka-teki untuk Bab 2

Jembatan antarnegara dibangun dari dua sisi sekaligus. Tim Indonesia memakai penggaris dan patokan mereka sendiri, tim negara tetangga memakai milik mereka. Kalau ukuran "satu meter" atau titik nol keduanya berbeda sedikit saja, apa yang terjadi saat kedua ujung jembatan bertemu di tengah?

▼ **Intip petunjuk**

Ini pernah benar-benar terjadi! Pada 2003, jembatan di Laufenburg yang menghubungkan Jerman dan Swiss meleset 54 cm di tengah karena kedua negara memakai titik nol ketinggian yang berbeda, lalu koreksinya diterapkan ke arah yang salah. Karena itulah dunia butuh **satuan baku** dan **standar yang sama**. Bab 2 akan membahas semuanya.

BAB 2 · FONDASI

02 Besaran, Satuan & Pengukuran: Seni Membandingkan

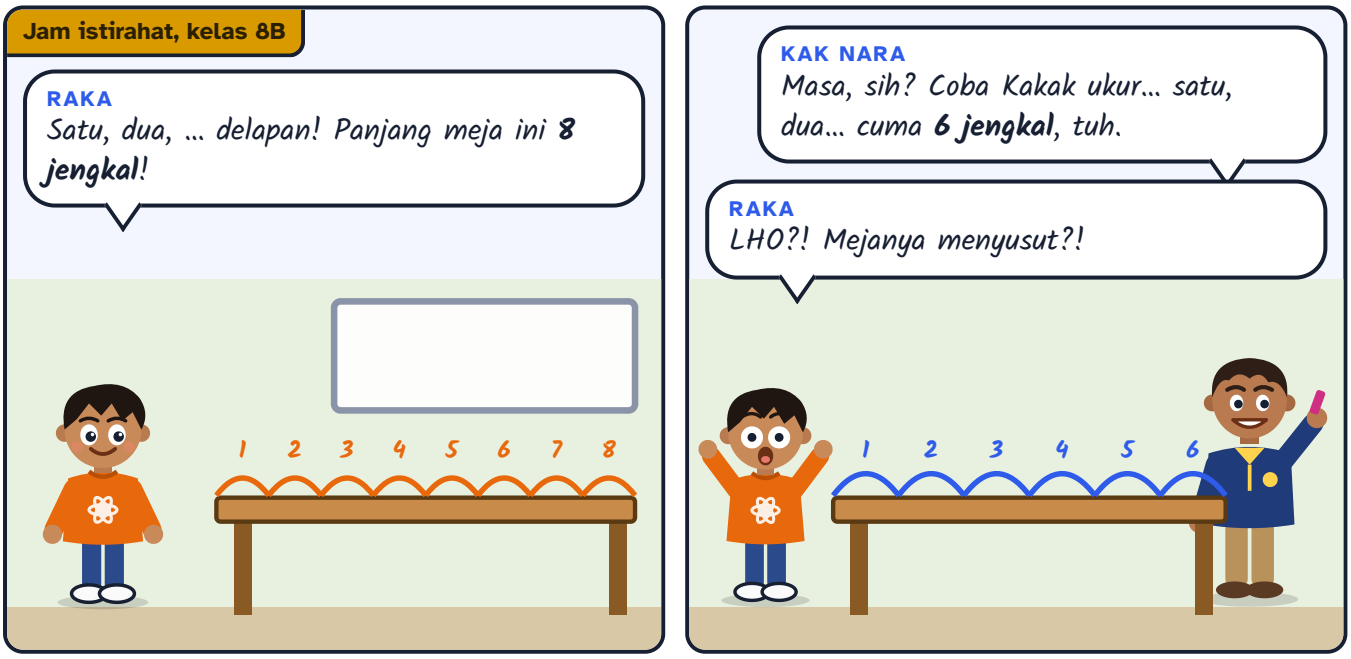
"Mejanya 8 jengkal!" kata Raka. "Cuma 6 jengkal," kata Kak Nara. Dua-duanya jujur, tetapi angkanya beda! Di bab ini kamu belajar mengukur seperti ilmuwan: dengan satuan yang disepakati dunia, alat yang tepat, dan kejujuran tentang seberapa yakin hasilmu.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan bahwa **mengukur = membandingkan** dengan satuan baku, serta menyebut 7 besaran pokok SI;
- memakai **awalan** (piko sampai tera), **notasi ilmiah**, dan trik **"kalikan 1"** untuk konversi satuan;
- memeriksa dan menurunkan rumus dengan **analisis dimensi**;
- membaca **mistar**, **jangka sorong**, dan **mikrometer sekrup**;
- menulis hasil ukur dengan **angka penting** dan **ketidakpastian**, serta membedakan **presisi** dan **akurasi**.

JENGKAL SIAPA YANG BENAR?

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Raka mengukur meja dan mendapat 8 jengkal. Kak Nara mengukur meja yang sama dan mendapat 6 jengkal. Siapa yang benar?

- Raka, karena angkanya lebih besar sehingga lebih teliti.
- Kak Nara, karena orang dewasa lebih pandai mengukur.
- Keduanya benar, tetapi "jengkal" mereka berbeda panjangnya, jadi angkanya tidak bisa langsung dibandingkan.
- Tidak ada yang benar, karena meja tidak bisa diukur dengan tangan.

Jawabannya: keduanya benar, tetapi satuannya berbeda. Hasil ukur selalu terdiri atas **angka** dan **satuan**. "8 jengkal Raka" dan "6 jengkal Kak Nara" sama-sama sepanjang 120 cm. Masalahnya, jengkal tiap orang berbeda, sehingga angkanya membingungkan orang lain. Karena itulah manusia menyepakati **satuan baku** yang sama untuk semua orang.

2.1 Mengukur = membandingkan

Mengukur adalah membandingkan sesuatu dengan sesuatu lain yang sejenis yang dijadikan **patokan**. Patokan itu disebut **satuan**. Ketika Sari berkata "meja ini 120 cm", artinya meja itu sama panjang dengan 120 buah "1 cm"

yang dijajarkan.

Hasil ukur = **angka** × **satuan**. Contoh: 120 cm = 120 × (1 cm).

Angka tanpa satuan tidak ada artinya. "Rumahku jauhnya 5." Lima apa? Lima meter, lima kilometer, atau lima menit naik angkot? Sesuatu yang bisa diukur dan dinyatakan dengan angka serta satuan disebut **besaran**: panjang, massa, waktu, suhu, kecepatan. "Kecantikan" atau "kepintaran" bukan besaran fisika, karena tidak ada satuan baku untuk mengukurnya.

Bahasa sederhana · Gampangnya: mengukur itu seperti bertanya "berapa kali patokannya muat?" Kalau patokannya beda-beda, jawabannya juga beda-beda. Karena itu semua orang di dunia sepakat memakai patokan yang sama, misalnya meter dan kilogram.

Nenek moyang kita juga punya satuan. Sayangnya, kebanyakan memakai ukuran tubuh, sehingga berbeda dari orang ke orang dan dari daerah ke daerah:

Satuan tradisional	Mengukur	Patokannya	Kira-kira
jengkal	panjang	ujung ibu jari sampai ujung kelingking saat jari direntangkan	±20 cm (orang dewasa)
hasta	panjang	siku sampai ujung jari tengah	±45 cm
depa	panjang	ujung jari kiri sampai ujung jari kanan saat kedua lengan direntangkan	±1,7 m
tumbak	luas tanah (Jawa Barat)	kebiasaan setempat	±14 m^2
bahu (bau)	luas sawah (Jawa)	kebiasaan setempat	±7.000 m^2 (0,7 ha)
kati dan pikul	massa (perdagangan lama)	1 pikul = 100 kati	1 kati ±0,6 kg
"liter" beras di pasar	volume (bukan massa!)	takaran kaleng 1 liter	±0,8 kg beras, tergantung jenisnya

FISIKA INDONESIA

Di Indonesia, standar ukuran nasional dijaga oleh **Badan Standardisasi Nasional (BSN)**. Timbangan pedagang di pasar, pompa bensin di SPBU, sampai meteran listrik dan air wajib **ditera ulang** secara berkala (umumnya setahun sekali) oleh petugas metrologi legal di kabupaten atau kota. Timbangan yang lolos diberi **cap tanda tera**. Jadi kalau kamu membeli 1 kg gula, kamu benar-benar mendapat 1 kg, bukan "1 kg menurut si pedagang".

2.2 Sistem Internasional (SI): 7 besaran pokok

Sejak 1960, hampir seluruh dunia memakai **Sistem Internasional** (SI, dari bahasa Prancis *Système International d'Unités*). SI memilih **7 besaran pokok**. Satuannya ditetapkan dengan sangat teliti, dan semua besaran lain diturunkan dari ketujuhnya.

Besaran pokok	Satuan SI	Simbol satuan	Dimensi
panjang	meter	m	[L]
massa	kilogram	kg	[M]
waktu	sekon	s	[T]
kuat arus listrik	ampere	A	[I]
suhu	kelvin	K	[Θ]
jumlah zat	mol	mol	[N]
intensitas cahaya	kandela	cd	[J]

✏️ **TRIK KAK NARA: HAFAL 7 BESARAN POKOK**

"**P**ak **M**amat **W**ajib **K**irim **S**urat **J**am **I**msak": **P**anjang, **M**assa, **W**aktu, **K**uat arus, **S**uhu, **J**umlah zat, **I**ntensitas cahaya.

Besaran turunan adalah besaran yang dibentuk dari besaran-besaran pokok:

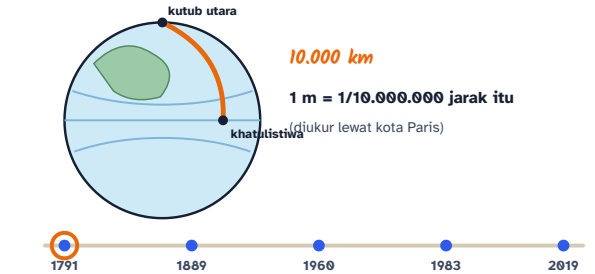
Besaran turunan	Rumus	Satuan SI	Nama khusus
luas	panjang × lebar	m^2	–
volume	panjang × lebar × tinggi	m^3	–
massa jenis	massa ÷ volume	kg/m^3	–
kecepatan	perpindahan ÷ waktu	m/s	–
percepatan	perubahan kecepatan ÷ waktu	m/s^2	–
gaya	massa × percepatan	$kg{\cdot}m/s^2$	newton (N)
energi, usaha	gaya × perpindahan	$kg{\cdot}m^2/s^2$	joule (J)

daya	energi ÷ waktu	$kg \cdot m^2/s^3$	watt (W)
tekanan	gaya ÷ luas	$kg/(m \cdot s^2)$	pascal (Pa)

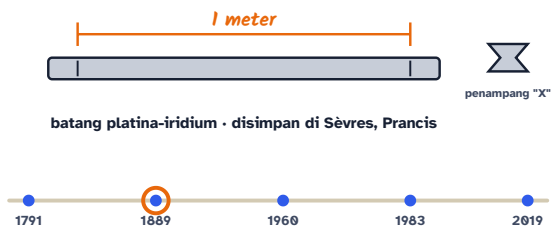
⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Timbangan badan yang menunjukkan "50 kg" mengukur **massa**, bukan berat. Dalam fisika, **berat** adalah gaya tarik gravitasi, satuannya newton (N). Orang bermassa 50 kg beratnya sekitar 490 N di Bumi, tetapi hanya sekitar 80 N di Bulan. Massanya? Tetap 50 kg di mana pun! (Detailnya di Bab 6.)

Bagaimana dunia menyepakati panjang "satu meter" yang persis sama? Ceritanya panjang dan seru:

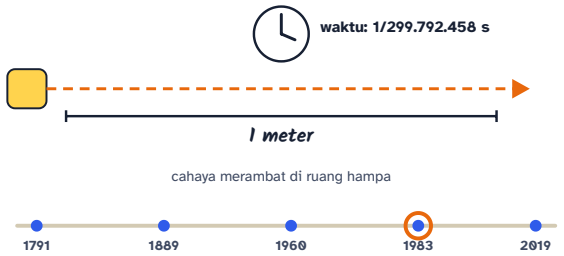


Langkah 1. 1791. Ilmuwan Prancis ingin satuan "milik semua orang", bukan jengkal raja. Satu meter ditetapkan sebagai sepersepuluh juta jarak dari kutub utara ke khatulistiwa. Akibat lucunya: keliling Bumi menjadi hampir tepat 40.000 km!



Langkah 2. 1889. Mengukur Bumi itu repot. Dibuatlah batang logam platina-iridium yang sangat awet dan disimpan di Sèvres dekat Paris. Satu meter adalah jarak dua goresan pada batang itu (pada suhu 0 °C). Salinannya dibagikan ke banyak negara.

Langkah 3. 1960. Logam bisa memuai dan aus. Meter didefinisikan ulang memakai cahaya jingga dari atom kripton-86: 1 m = 1.650.763,73 kali panjang gelombangnya. Cahaya tidak bisa aus!



Langkah 4. 1983. Kecepatan cahaya ditetapkan tepat 299.792.458 m/s. Jadi 1 meter adalah jarak yang ditempuh cahaya di ruang hampa selama $\frac{1}{299\,792\,458}$ sekon.

Langkah 5. 2019. Sejak 20 Mei 2019, semua satuan pokok SI, termasuk kilogram, ditetapkan lewat konstanta alam. Siapa pun di mana pun, bahkan alien di galaksi lain, bisa membuat ulang satuan yang sama persis.

TAMU DARI MASA LALU

Selama 130 tahun (1889–2019), satu kilogram didefinisikan sebagai massa sebuah silinder platina-iridium seukuran bola pingpong yang dijuluki **"Le Grand K"**. Silinder itu disimpan di bawah tiga sungkup kaca di dalam brankas di dekat Paris. Masalahnya, ketika dibandingkan dengan salinan-salinannya, massanya tampak bergeser sekitar 50 mikrogram (seberat sebutir debu). Kini kilogram didefinisikan lewat **konstanta Planck** h, dan Le Grand K pun "pensiun".

2.3 Awalan dan notasi ilmiah

Menulis kapasitas penyimpanan HP "128.000.000.000 byte" itu melelahkan. Karena itu SI punya **awalan** (prefiks) yang mewakili pangkat sepuluh:

Awalan	Simbol	Nilai	Contoh sehari-hari
tera	T	10^{12}	hard disk 1 TB
giga	G	10^{9}	memori HP 128 GB, Wi-Fi 2,4 GHz
mega	M	10^{6}	PLTA berdaya 700 MW, kamera 50 MP
kilo	k	10^{3}	1 km = 1.000 m, 1 kg = 1.000 g
hekto	h	10^{2}	1 hektare (ha) = 100 are
desi	d	10^{-1}	1 L = 1 dm^3
senti	c	10^{-2}	penggaris 30 cm
mili	m	10^{-3}	obat sirop 5 mL, kawat 1 mm
mikro	µ	10^{-6}	sel darah merah 8 µm
nano	n	10^{-9}	virus ±100 nm, transistor chip HP beberapa nm
piko	p	10^{-12}	kapasitor 22 pF di papan elektronik

TRIK KAK NARA: NAIK-TURUN TANGGA 1.000

Yang besar: "**K**akak **M**akan **G**ado-gado **T**erus" → kilo, mega, giga, tera. Yang kecil: "**m**ama **m**inta **n**asi **p**adang" → mili, mikro, nano, piko. Setiap anak tangga berarti **× 1.000** (naik) atau **÷ 1.000** (turun). Jadi 1 GB = 1.000 MB, dan 1 mm = 1.000 µm.

Untuk angka yang sangat besar atau sangat kecil, kita memakai **notasi ilmiah**: $a \times 10^n$ dengan $1 \leq a < 10$ dan n bilangan bulat.

- Jarak Bumi–Bulan 384.000 km = 384.000.000 m = $3{,}84 \times 10^8$ m (koma bergeser 8 langkah ke kiri).
- Diameter sel darah merah 0,000008 m = 8×10^{-6} m (koma bergeser 6 langkah ke kanan).
- Mengalikan pangkat: $10^a \times 10^b = 10^{a+b}$. Membagi: $10^a \div 10^b = 10^{a-b}$.

2.4 Konversi satuan: trik "kalikan dengan 1"

Tebak Dulu!

Ojek melaju 36 km/jam. Raka bersepeda menuruni bukit dengan kelajuan 10 m/s. Siapa yang lebih cepat?

- Ojek, karena 36 lebih besar daripada 10.
- Raka, karena sepeda di turunan selalu lebih cepat.
- Sama cepat.
- Tidak bisa dibandingkan, karena satuannya berbeda.

Jawabannya: sama cepat! $36\ \mathrm{km/jam} = 36 \times \dfrac{1000\ \mathrm{m}}{3600\ \mathrm{s}} = 10$ m/s. Angka 36 terlihat lebih besar hanya karena satuannya berbeda. Jangan pernah membandingkan angka sebelum satuannya disamakan. Dan pilihan "tidak bisa dibandingkan" juga keliru: bisa, asalkan dikonversi dulu!

Rahasia konversi: kalikan dengan pecahan yang **nilainya 1**. Karena 1 km = 1.000 m, pecahan $\dfrac{1000\ \mathrm{m}}{1\ \mathrm{km}}$ bernilai 1. Mengalikan dengan 1 tidak mengubah besarnya, hanya mengubah "bajunya" (satuannya). Satuan yang tidak diinginkan dicoret seperti angka dalam pecahan.

$$72\ \frac{\cancel{\mathrm{km}}}{\cancel{\mathrm{jam}}} \times \frac{1000\ \mathrm{m}}{1\ \cancel{\mathrm{km}}} \times \frac{1\ \cancel{\mathrm{jam}}}{3600\ \mathrm{s}} = 20\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

RUMUS HIDUP **Konversi km/jam → m/s**

$$v_{\mathrm{m/s}} = \frac{v_{\mathrm{km/jam}}}{3{,}6}$$

Cukup bagi dengan 3,6, karena 1 km/jam = 1.000 m ÷ 3.600 s = 1/3,6 m/s.

$v_{\mathrm{km/jam}}$ Kelajuan km/jam

$v_{\mathrm{m/s}}$ Kelajuan m/s

KELAJUAN
20
m/s

72 km/jam = **20** m/s. Artinya, setiap detik kamu berpindah sejauh **20** meter.

Satuan Nusantara: ≈ 1,8 × ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 21% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 14 × jalan kaki santai

Cek satuan: $1\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{jam}} = \frac{1000\,\mathrm{m}}{3600\,\mathrm{s}} = \frac{1}{3{,}6}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Sebaliknya, m/s × 3,6 = km/jam.

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

CONTOH **Ojek di jalan kota**

Ojek melaju 54 km/jam. Berapa kelajuannya dalam m/s?

1. Pakai trik: km/jam ÷ 3,6 = m/s.
2. $54 \div 3{,}6 = 15$ m/s.

15 m/s. Setiap detik ojek berpindah 15 meter, kira-kira sepanjang tiga angkot yang berbaris.

⚠️ **AWAS JEBAKAN: LUAS DAN VOLUME**

1 m = 100 cm, tetapi **1 m² ≠ 100 cm²**! Persegi 1 m × 1 m sama dengan 100 cm × 100 cm = **10.000 cm²**. Untuk volume, faktornya dipangkatkan tiga: 1 m³ = 100 × 100 × 100 cm³ = **1.000.000 cm³** = 1.000 liter. Jadi kalau meteran air PDAM-mu bertambah 1 m³, keluargamu sudah memakai 1.000 liter air, kira-kira 53 galon air minum!

KERJAKAN BERSAMA **Membaca meteran PDAM**

Bulan lalu meteran air rumah Sari menunjukkan 1.234 m³. Bulan ini 1.252 m³. Berapa liter air yang dipakai, dan setara berapa galon 19 liter?

1. Pemakaian: $1.252 - 1.234 = 18$ m³.
2. Kalikan 1: $18\,\cancel{\text{m}^3} \times \dfrac{1000\text{ L}}{1\,\cancel{\text{m}^3}} = 18.000$ L.
3. Jumlah galon: $18.000 \div 19 \approx 947$ galon.

18.000 liter, setara sekitar 947 galon. Rata-rata 600 liter per hari untuk satu keluarga: mandi, mencuci, dan memasak.

2.5 Dimensi dan analisis dimensi

Dimensi menunjukkan dari besaran pokok apa saja sebuah besaran tersusun, tanpa peduli satuannya. Kecepatan bisa dalam m/s, km/jam, atau knot, tetapi dimensinya selalu "panjang dibagi waktu": $[L][T]^{-1}$.

Besaran	Satuan SI	Dimensi
luas	m²	$[L]^2$
massa jenis	kg/m³	$[M][L]^{-3}$
kecepatan	m/s	$[L][T]^{-1}$
percepatan	m/s²	$[L][T]^{-2}$
gaya	N = kg·m/s²	$[M][L][T]^{-2}$
energi	J = kg·m²/s²	$[M][L]^2[T]^{-2}$
tekanan	Pa = kg/(m·s²)	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$

Analisis dimensi punya dua kegunaan hebat.

1. Memeriksa rumus. Kamu tidak bisa menjumlahkan apel dengan jeruk. Begitu pula di fisika: suku-suku yang dijumlahkan harus berdimensi **sama**, dan ruas kiri harus berdimensi sama dengan ruas kanan (prinsip **homogenitas dimensi**). Contoh: $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$. Ruas kiri $[L]$. Suku pertama $[L][T]^{-1}[T] = [L]$. Suku kedua $[L][T]^{-2}[T]^2 = [L]$. Semua cocok! (Angka ½ tidak berdimensi, jadi diabaikan.)

2. Menurunkan rumus. Ingat bandul di Bab 1? Kita bisa menebak rumus periodenya hanya dengan mencocokkan dimensi!

KERJAKAN BERSAMA **Menurunkan rumus bandul tanpa eksperimen**

Periode bandul T mungkin bergantung pada massa beban m, panjang tali L, dan percepatan gravitasi g. Tentukan bentuk rumusnya.

1. Tebak bentuk umum: $T = k\, m^a L^b g^c$, dengan k angka tanpa dimensi.
2. Tulis dimensinya: $[T] = [M]^a\, [L]^b\, ([L][T]^{-2})^c = [M]^a [L]^{b+c} [T]^{-2c}$.
3. Cocokkan pangkat. Untuk [M]: $a = 0$. Untuk [T]: $-2c = 1$, jadi $c = -\frac{1}{2}$. Untuk [L]: $b + c = 0$, jadi $b = \frac{1}{2}$.
4. Hasilnya $T = k\, L^{1/2} g^{-1/2} = k\sqrt{\dfrac{L}{g}}$. Massa **tidak ikut**, persis seperti temuan di Lab Mini Bab 1!
5. Analisis dimensi tidak bisa memberi tahu nilai k. Eksperimen menunjukkan $k = 2\pi$.

$T = 2\pi\sqrt{L/g}$. **Pola "tali 4 kali lebih panjang, periode 2 kali" dari Bab 1 kini terjelaskan:** $\sqrt{4} = 2$.

RUMUS HIDUP **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!

L Panjang tali m | g Percepatan gravitasi m/s² | T Periode s

PERIODE
2,01
s

Bandul bertali **1** m di tempat dengan g = **9,8** m/s² berayun bolak-balik sekali dalam **2,01** sekon.

Satuan Nusantara: ≈ 6,7 × kedipan mata · ≈ 3% dari satu menit

Cek satuan: $\sqrt{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{m/s^2}}} = \sqrt{\mathrm{s^2}} = \mathrm{s}$. Satuannya cocok!

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

BATAS KEMAMPUAN ANALISIS DIMENSI

Analisis dimensi tidak bisa (1) menemukan angka tanpa dimensi seperti 2π atau ½; (2) menurunkan rumus yang berisi penjumlahan, sinus, atau logaritma; (3) membedakan besaran yang dimensinya sama, misalnya usaha dan torsi (keduanya $[M][L]^2[T]^{-2}$). Jadi analisis dimensi adalah detektor kesalahan yang hebat, tetapi tetap butuh eksperimen.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ANALISIS DIMENSI MERAMAL KECEPATAN TSUNAMI

Di laut dalam, kecepatan gelombang tsunami hanya bergantung pada percepatan gravitasi g dan kedalaman laut h. Misalkan $v = k\,g^a h^b$: $[L][T]^{-1} = [L]^a[T]^{-2a}[L]^b$. Dari [T]: $a = \frac{1}{2}$. Dari [L]: $a + b = 1$, jadi $b = \frac{1}{2}$. Hasilnya $v = k\sqrt{gh}$, dengan $k = 1$ menurut teori gelombang air dangkal. Di Samudra Hindia sedalam 4.000 m: $v = \sqrt{9{,}8 \times 4000} \approx 198$ m/s ≈ 710 km/jam, secepat pesawat jet! Saat mendekati pantai (h mengecil), gelombang melambat dan menumpuk menjadi tinggi. Inilah fisika di balik tsunami Aceh 2004.

2.6 Alat ukur: dari mistar sampai mikrometer

Setiap alat ukur punya **nilai skala terkecil** (nst): jarak antara dua garis skala yang berdekatan. Makin kecil nst, makin teliti alatnya. Pilih alat sesuai benda yang diukur: kamu tidak mengukur tebal rambut dengan meteran tukang!

Alat	Nilai skala terkecil	Cocok untuk
meteran gulung	1 mm	lebar pintu, panjang kamar
mistar (penggaris)	1 mm	panjang buku, pensil
jangka sorong	0,1 mm (ada juga 0,05 mm dan 0,02 mm)	diameter kelereng, diameter dalam pipa, kedalaman lubang
mikrometer sekrup	0,01 mm	tebal kertas, diameter kawat
stopwatch digital	0,01 s	waktu lari 100 m (tetapi waktu reaksi manusia ±0,2 s!)
neraca tiga lengan	0,1 g	massa batu, buah

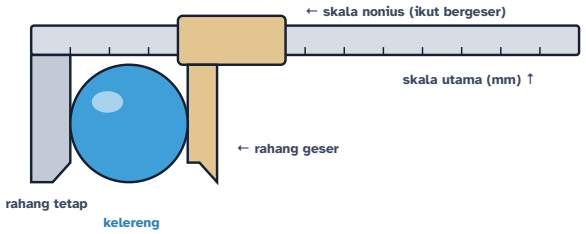
AWAS JEBAKAN: PARALAKS

Saat membaca skala, mata harus tegak lurus di atas garis yang dibaca. Kalau melirik dari samping, bacaanmu bergeser. Kesalahan ini disebut **paralaks**. Itulah sebabnya penumpang di samping sopir sering membaca spidometer berbeda dengan sopirnya.

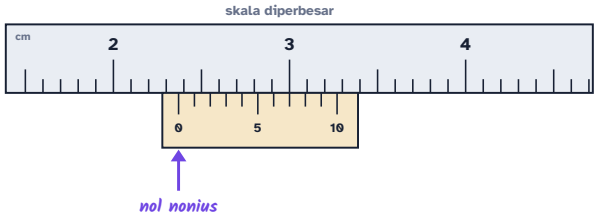
Jangka sorong: penggaris yang punya "kaca pembesar" rahasia

Jangka sorong punya dua skala: **skala utama** (dalam mm, di batang) dan **skala nonius** (di rahang yang bisa digeser). Pada jangka sorong biasa, 10 skala nonius panjangnya hanya 9 mm, sehingga jarak antargaris nonius

0,9 mm. Selisih kecil 0,1 mm inilah "kaca pembesar" rahasianya: garis nonius ke-n yang lurus dengan garis skala utama menunjukkan tambahan $n \times 0{,}1$ mm.



Langkah 1. Jepit benda (misalnya kelereng) di antara **rahang tetap** dan **rahang geser** sampai pas, tidak terlalu kencang.



Langkah 2. Perbesar skalanya. Cari angka **nol pada skala nonius**. Di mana ia berada pada skala utama?

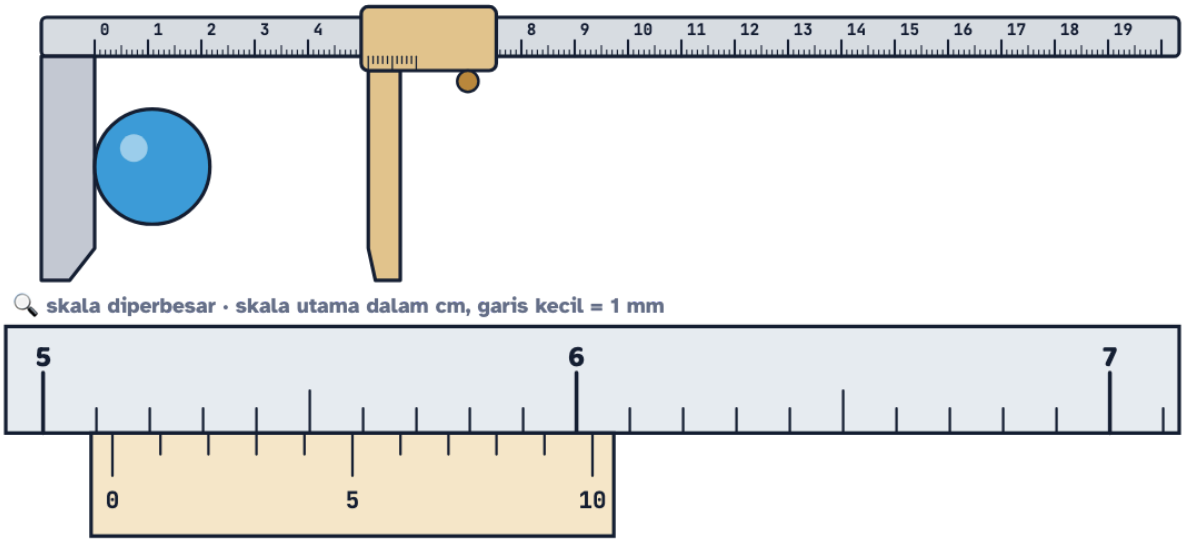
Langkah 3. Baca **skala utama**: garis terakhir *sebelum* nol nonius adalah 23 mm (2,3 cm).

Langkah 4. Cari satu garis nonius yang **paling lurus** (berimpit) dengan sebuah garis skala utama. Di sini garis ke-7, jadi tambahannya $7 \times 0{,}1 = 0{,}7$ mm.

Langkah 5. Jumlahkan: $23 + 0{,}7 = 23{,}7$ mm = 2,37 cm. Dengan ketidakpastian setengah nst, hasilnya ditulis $(23{,}70 \pm 0{,}05)$ mm.

LAB MINI **Jangka sorong virtual: jepit, baca, periksa!**

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



Baca: garis skala utama sebelum nol nonius, lalu cari garis nonius yang paling lurus.

↔ seret rahang di gambar atas atau di skala perbesaran

Benda	Rahang	Bacaan tepat
kelereng	belum menjepit	0 dari 0

Seret rahang geser (di gambar atas atau di skala perbesaran), atau tekan **Jepit benda**. Baca skala utama dan nonius, lalu ketik hasilmu dalam mm. Masih bingung? Nyalakan **Bantuan Tarsi**. Coba juga jangka sorong 0,05 mm yang punya 20 garis nonius.

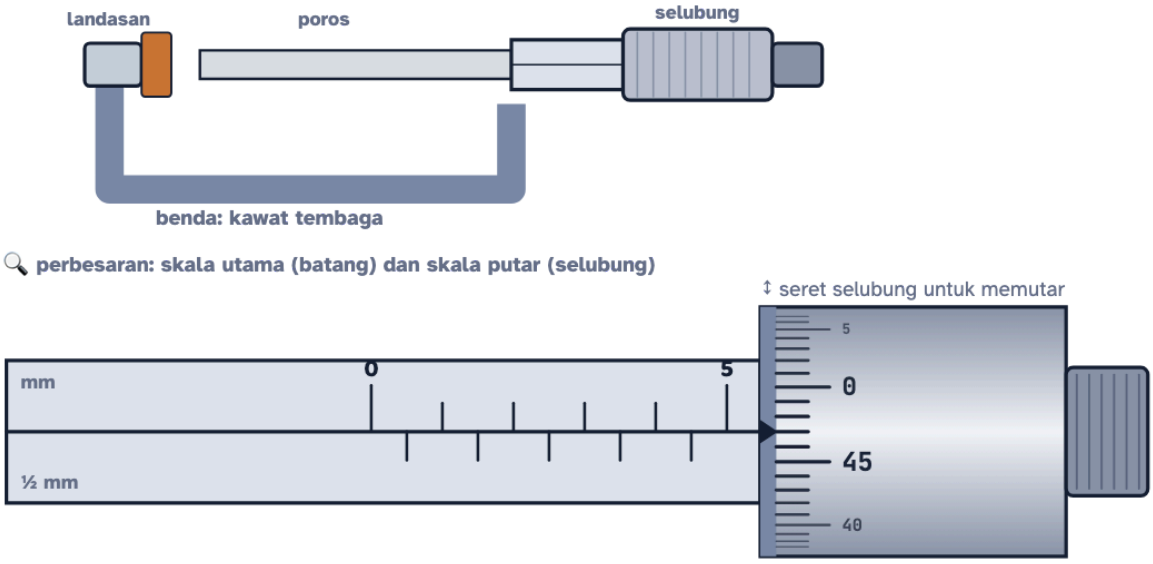
Mikrometer sekrup: memutar sekrup demi 0,01 mm

Mikrometer memakai sekrup yang sangat halus. Satu putaran penuh selubung (*thimble*) memajukan poros sejauh 0,5 mm. Selubung itu dibagi 50 garis, jadi satu garis = $0{,}5 \div 50 = 0{,}01$ mm. Cara membacanya:

1. **Skala utama** pada batang: garis di atas garis tengah menunjukkan milimeter utuh, garis di bawahnya menunjukkan setengah milimeter. Baca garis terakhir yang terlihat.
2. **Skala putar**: cari garis selubung yang lurus dengan garis tengah batang, lalu kalikan 0,01 mm.
3. Jumlahkan keduanya.

LAB MINI Mikrometer sekrup virtual

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



Baca garis terakhir di batang, lalu angka selubung yang lurus dengan garis tengah.

Benda	Poros	Bacaan tepat
kawat tembaga	belum menjepit	0 dari 0

Seret selubung ke atas atau ke bawah untuk memutarnya, seret batang ke kiri atau kanan, atau tekan **Putar sampai menjepit**. Perhatikan apakah garis setengah milimeter (di bawah garis tengah) sudah terlihat!

KERJAKAN BERSAMA Membaca mikrometer

Pada skala utama mikrometer terlihat garis 5 mm dan garis setengah milimeter sesudahnya. Garis selubung ke-28 lurus dengan garis tengah. Berapa hasil pengukurannya?

1. Skala utama: 5 mm ditambah setengah milimeter = 5,5 mm.
2. Skala putar: $28 \times 0{,}01 = 0{,}28$ mm.
3. Hasil: $5{,}5 + 0{,}28 = 5{,}78$ mm.

5,78 mm, atau $(5{,}780 \pm 0{,}005)$ mm. Lupa menambahkan setengah milimeter adalah kesalahan paling sering!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KESALAHAN NOL DAN KONVENSI KETIDAKPASTIAN

Jika rahang jangka sorong atau mikrometer ditutup rapat tetapi skala tidak menunjukkan nol, alat itu punya **kesalahan nol**. Misalnya mikrometer menunjukkan +0,03 mm saat tertutup. Semua bacaan harus dikurangi 0,03 mm: hasil = bacaan − kesalahan nol. Ini contoh galat sistematis. Tentang konvensi: banyak buku SMA di Indonesia memakai ketidakpastian ½ nst untuk alat analog. Dalam IB, alat bernonius dan alat digital biasanya diberi ketidakpastian ±1 nst. Yang penting, tuliskan konvensimu dengan jelas.

2.7 Angka penting, ketidakpastian, presisi, dan akurasi

Tidak ada pengukuran yang sempurna. Jujur tentang seberapa yakin kita adalah ciri ilmuwan. Caranya ada dua: menulis **angka penting** yang tepat, dan menyertakan **ketidakpastian**.

Angka penting (AP)

Angka penting adalah angka hasil pengukuran: semua angka pasti ditambah satu angka terakhir yang ditaksir. Aturannya:

Aturan	Contoh	Jumlah AP
Semua angka bukan nol adalah AP.	2,47	3
Nol di antara angka bukan nol adalah AP.	2,047	4
Nol di depan angka bukan nol pertama **bukan** AP.	0,0052	2
Nol di ujung belakang angka desimal adalah AP.	3,0 dan 2,500	2 dan 4
Nol di ujung bilangan bulat meragukan, jadi pakai notasi ilmiah.	$1{,}5 \times 10^3$ atau $1{,}50 \times 10^3$	2 atau 3

Saat berhitung: hasil **penjumlahan/pengurangan** mengikuti jumlah angka di belakang koma yang **paling sedikit** (12,52 + 3,1 = 15,62 → **15,6**). Hasil **perkalian/pembagian** mengikuti jumlah AP yang **paling sedikit** (2,5 × 3,14 = 7,85 → **7,9**).

Ketidakpastian

Hasil ukur ditulis $x = (\bar{x} \pm \Delta x)$ satuan. Untuk **pengukuran tunggal** dengan alat berskala, $\Delta x = \frac{1}{2}$ nst (mistar: ±0,5 mm). Untuk alat digital, Δx = nst. Untuk **pengukuran berulang**, $\bar{x}$ adalah rata-ratanya dan Δx bisa ditaksir dari setengah rentang data (nilai terbesar dikurangi terkecil, dibagi 2).

RUMUS HIDUP **Ketidakpastian relatif**

$$\mathrm{KR} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

Seberapa besar 'keraguan' dibanding hasil ukurnya. Makin kecil persennya, makin teliti pengukuranmu.

x Hasil ukur mm | Δx Ketidakpastian mm | KR Ketidakpastian relatif %

KETIDAKPASTIAN RELATIF

0,208

%

Hasil (**24** ± **0,05**) mm punya ketidakpastian relatif **0,208**%. Patokan: sekitar 10% → 2 angka penting, 1% → 3 AP, 0,1% → 4 AP.

Cek satuan: $\frac{\mathrm{mm}}{\mathrm{mm}}$ tidak bersatuan, lalu dikali 100% agar menjadi persen.

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

Ketidakpastian juga "merambat" ke hasil hitungan:

- **Penjumlahan/pengurangan**: ketidakpastian **absolut** dijumlahkan. $(5{,}0 \pm 0{,}1) + (3{,}0 \pm 0{,}1) = 8{,}0 \pm 0{,}2$.
- **Perkalian/pembagian**: ketidakpastian **relatif** dijumlahkan.
- **Pangkat** x^n: ketidakpastian relatif dikali n. Volume kubus $V = s^3$ punya ketidakpastian relatif 3 kali milik s .

COBA SENDIRI **Luas pelat dengan ketidakpastian**

Panjang pelat $(12{,}0 \pm 0{,}1)$ cm dan lebarnya $(5{,}0 \pm 0{,}1)$ cm. Tuliskan luasnya lengkap dengan ketidakpastian.

1. Luas: $A = 12{,}0 \times 5{,}0 = 60$ cm².
2. Ketidakpastian relatif: $\frac{0{,}1}{12{,}0} + \frac{0{,}1}{5{,}0} = 0{,}008 + 0{,}020 = 0{,}028$ (2,8%).
3. Ketidakpastian absolut: $\Delta A = 0{,}028 \times 60 \approx 1{,}7$ cm², dibulatkan menjadi 2 cm².

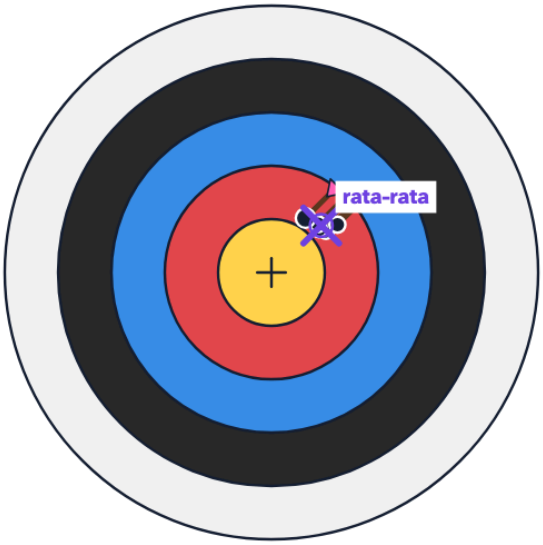
$A = (60 \pm 2)$ **cm². Perhatikan: lebar yang pendek menyumbang ketidakpastian relatif terbesar. Untuk memperbaiki hasil, ukur lebarnya dengan alat yang lebih teliti!**

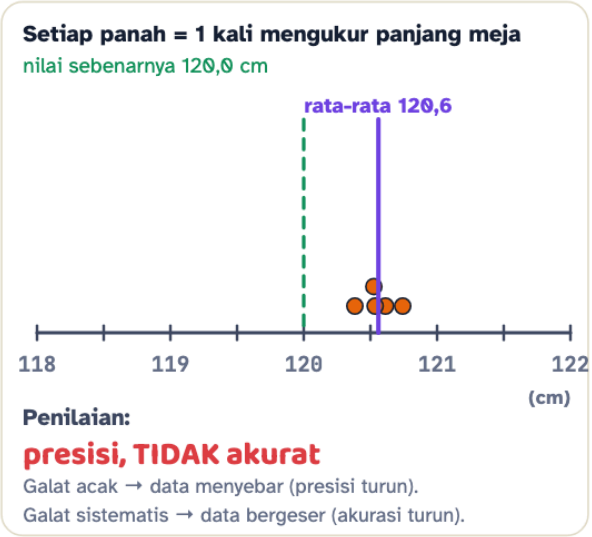
Presisi dan akurasi: dua hal yang berbeda

Presisi berarti hasil pengukuran berulang **saling berdekatan**. **Akurasi** berarti hasilnya **dekat dengan nilai sebenarnya**. Timbangan pasar yang setiap kali menunjukkan 0,5 kg kurang dari seharusnya itu presisi (konsisten), tetapi tidak akurat. **Galat acak** (tangan gemetar, angin) membuat data menyebar dan merusak presisi. **Galat sistematis** (kesalahan nol, alat belum dikalibrasi) menggeser semua data ke satu arah dan merusak akurasi.

LAB MINI Lomba panahan: presisi atau akurat?

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





Anak panah	Rata-rata ukur	Sebaran (±)	Penilaian
5 / 10	120,56 cm	0,13 cm	presisi, TIDAK akurat

Setiap anak panah adalah satu kali pengukuran panjang meja yang sebenarnya 120,0 cm. Atur **galat acak** dan **galat sistematis**, lalu lepaskan 10 anak panah. Bisakah kamu membuat hasil yang presisi tetapi tidak akurat? Apakah merata-rata banyak data bisa menghapus galat sistematis?

MITOS

"Presisi dan akurat itu sama saja."

FAKTA

Presisi
: hasil berulang saling berdekatan.
Akurat
: dekat dengan nilai sebenarnya. Jam dinding yang selalu terlambat tepat 5 menit itu presisi, tetapi tidak akurat.

MITOS

"Menulis 3,0 cm sama saja dengan menulis 3 cm."

FAKTA

3,0 cm berarti diukur sampai persepuluhan cm (2 angka penting). 3 cm hanya sampai satuan cm (1 angka penting). Angka nol di belakang koma itu membawa informasi!

MITOS

"Makin banyak angka di layar kalkulator, makin teliti hasilnya."

FAKTA

Hasil hitungan tidak bisa lebih teliti daripada data ukurnya. 10,0 ÷ 3,0 = 3,3333333 di kalkulator, tetapi karena datanya hanya 3 dan 2 AP, tulis 3,3.

Meteran listrik PLN

Token listrik dijual dalam kWh, satuan energi. 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ joule, cukup untuk menyalakan lampu LED 10 W selama 100 jam.

Meteran air PDAM

Pemakaian air dihitung dalam m^3. Angka merah di meteran menunjukkan pecahan meter kubik, yaitu ratusan dan puluhan liter.

Pompa SPBU

Pompa bensin ditera agar "1 liter" di layar benar-benar 1 liter. Dinas metrologi rutin mengujinya dengan bejana ukur standar.

Timbangan pasar

Timbangan pedagang yang sudah ditera diberi cap tanda tera. Pembeli berhak meminta penimbangan ulang jika ragu.

GPS di HP

Satelit GPS membawa jam atom. Kesalahan waktu sepersejuta detik saja membuat posisimu meleset sekitar 300 m, karena sinyalnya merambat secepat cahaya.

"Liter" beras

Di pasar tradisional, beras sering dijual per liter (volume), bukan per kg (massa). Satu liter beras kira-kira 0,8 kg.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SIMPANGAN BAKU DAN PENJUMLAHAN KUADRAT

Untuk data acak, ketidakpastian rata-rata yang lebih teliti adalah **galat baku** $\sigma_{\bar{x}} = \dfrac{\sigma}{\sqrt{N}}$, dengan $\sigma = \sqrt{\dfrac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$. Mengulang pengukuran 4 kali lebih banyak hanya memperkecil ketidakpastian menjadi setengahnya. Jika galat-galat saling bebas, ketidakpastian relatif hasil perkalian lebih tepat dijumlahkan secara kuadrat: $\dfrac{\Delta f}{f} = \sqrt{\left(\dfrac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\dfrac{\Delta y}{y}\right)^2}$. Ujian IB umumnya cukup memakai penjumlahan biasa (aturan "kasus terburuk") seperti di atas. Untuk grafik, ketidakpastian kemiringan ditaksir dari garis paling curam dan paling landai yang masih melewati semua *error bar*.

Cek Cepat

Kelajuan 54 km/jam sama dengan...

- 54 m/s
- 15 m/s
- 150 m/s
- 5,4 m/s

Banyaknya angka penting pada hasil ukur 0,00420 kg adalah...

- 6
- 5
- 3
- 2

Dimensi gaya (N = kg·m/s²) adalah...

$[M][L]^2[T]^{-2}$

$[M][L][T]^{-1}$

$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$

$[M][L][T]^{-2}$

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. D

Tantangan Rumah: tebal selembar kertas tanpa mikrometer

Bahan: buku tulis tebal atau satu rim kertas, penggaris 30 cm, meteran jahit

1. Ukur tebal setumpuk 100 lembar kertas dengan penggaris. Hati-hati: 1 lembar = 2 halaman!
2. Bagi hasilnya dengan 100. Bandingkan dengan tebal kertas HVS yang biasanya sekitar 0,1 mm.
3. Bonus "satuan tubuhku": ukur jengkal, hasta, dan depamu dalam cm. Bandingkan dengan milik anggota keluarga lain.

Pertanyaan: Mengapa mengukur 100 lembar sekaligus jauh lebih teliti daripada mengukur 1 lembar dengan penggaris? Berapa ketidakpastian tebal satu lembar jika ketidakpastian penggaris ±0,5 mm?

RINGKASAN KILAT **Bab 2 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan bahwa **mengukur = membandingkan** dengan satuan baku, serta menyebut 7 besaran pokok SI
- memakai **awalan** (piko sampai tera), **notasi ilmiah**, dan trik **"kalikan 1"** untuk konversi satuan
- memeriksa dan menurunkan rumus dengan **analisis dimensi**
- membaca **mistar**, **jangka sorong**, dan **mikrometer sekrup**
- menulis hasil ukur dengan **angka penting** dan **ketidakpastian**, serta membedakan **presisi** dan **akurasi**

Istilah kunci

Mengukur · satuan · besaran · Sistem Internasional · Besaran turunan · awalan · notasi ilmiah · Dimensi · homogenitas dimensi · nilai skala terkecil · angka penting · ketidakpastian · Presisi · Akurasi

Rumus penting

$$v_{\mathrm{m/s}} = \frac{v_{\mathrm{km/jam}}}{3{,}6}$$

Konversi km/jam → m/s. Cukup bagi dengan 3,6, karena 1 km/jam = 1.000 m ÷ 3.600 s = 1/3,6 m/s.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Periode bandul (hasil analisis dimensi + eksperimen). Tali makin panjang, ayunan makin lambat. Gravitasi makin kuat, ayunan makin cepat. Massa? Tidak ikut!

$$\mathrm{KR} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

Ketidakpastian relatif. Seberapa besar 'keraguan' dibanding hasil ukurnya. Makin kecil persennya, makin teliti pengukuranmu.

Jangan sampai terjebak

- Timbangan badan yang menunjukkan "50 kg" mengukur massa, bukan berat.
- 1 m = 100 cm, tetapi 1 m^2 ≠ 100 cm^2!
- Saat membaca skala, mata harus tegak lurus di atas garis yang dibaca.

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=2

Teka-teki untuk Bab 3

Raka dan Sari menarik sebuah kardus dengan tali. Raka menarik 3 N dan Sari 4 N. Raka yakin gaya totalnya pasti 7 N. Sari bilang gaya totalnya bisa 5 N, bahkan bisa hanya 1 N. Siapa yang benar?

▼ **Intip petunjuk**

Yang menentukan adalah **arah** tarikan! Jika searah, 3 + 4 = 7 N. Jika berlawanan, tinggal 1 N. Jika tegak lurus? Gaya adalah besaran yang punya besar *dan* arah: **vektor**. Cara menjumlahkannya ada di Bab 3.

BAB 3 · FONDASI

03 Vektor & Matematika Secukupnya: Panah, Peta, dan Kemiringan

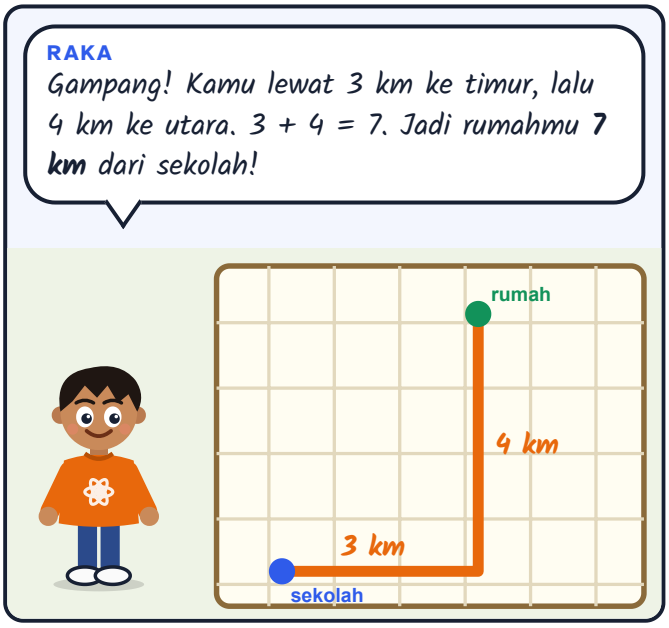
Aplikasi ojek bilang kamu sudah menempuh 7 km, padahal rumahmu hanya 5 km dari sekolah. Siapa yang salah? Tidak ada! Di bab ini kamu belajar "bahasa panah" (vektor) dan sedikit matematika ajaib, yaitu turunan dan integral, yang dipakai fisikawan setiap hari.

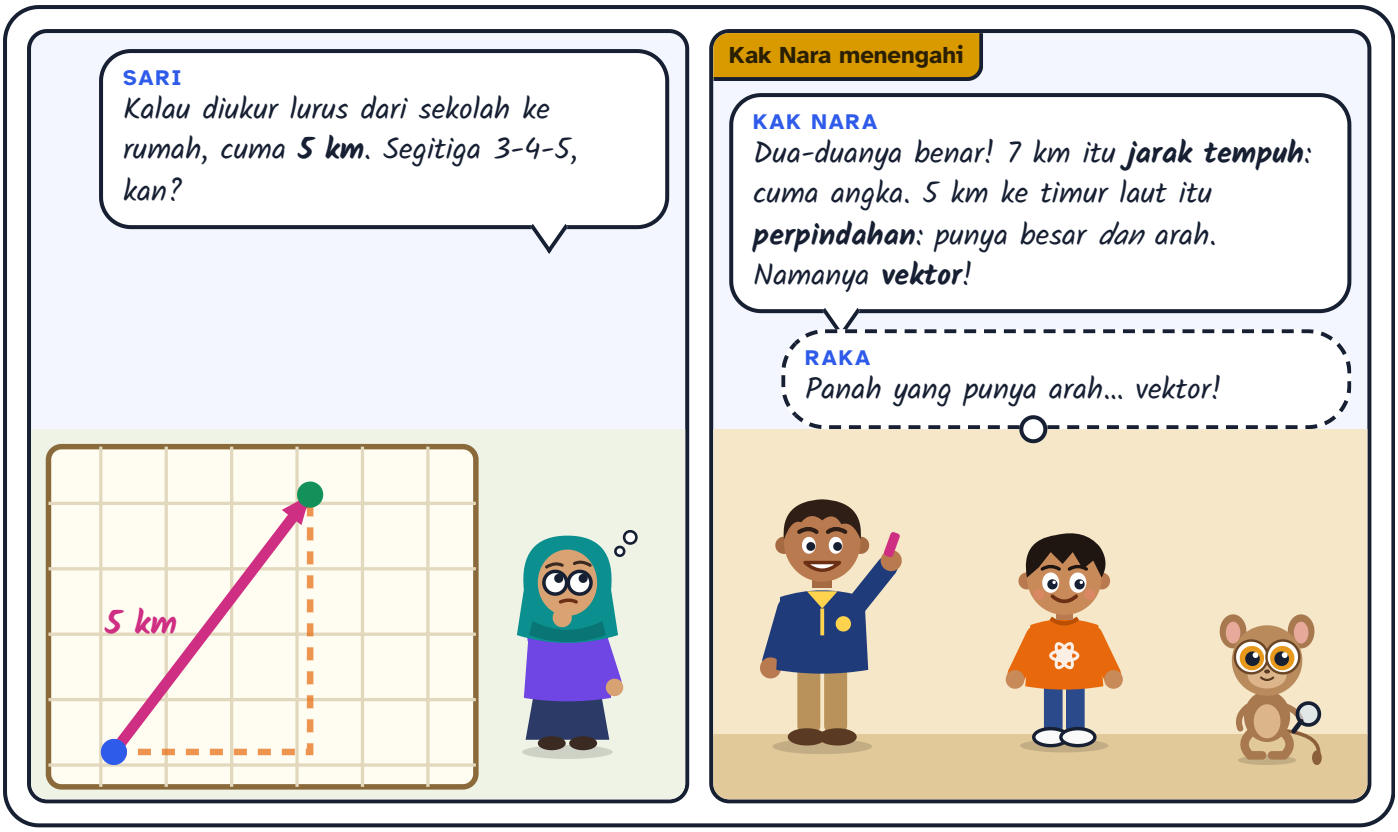
Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan besaran **skalar** dan **vektor**, juga **jarak** dan **perpindahan**;
- menjumlahkan dan mengurangkan vektor secara **grafis** (segitiga, jajaran genjang) dan **analitis**;
- **menguraikan** vektor dengan sin dan cos, serta memakai **vektor satuan** $\hat{\imath}, \hat{\jmath}, \hat{k}$;
- menghitung **perkalian titik** dan **perkalian silang**, serta mengenali maknanya (usaha dan torsi);
- membaca **kemiringan grafik**, lalu memahami **turunan** sebagai laju perubahan dan **integral** sebagai luas.

OJEK DAN JARAK YANG MENIPU

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Raka menarik sebuah kardus dengan gaya 3 N, Sari menarik kardus yang sama dengan gaya 4 N. Berapa gaya total pada kardus?

- Pasti 7 N, karena 3 + 4 = 7.
- Pasti 5 N, karena segitiga 3-4-5.
- Bisa berapa saja antara 1 N dan 7 N, tergantung arah tarikan mereka.
- Pasti 1 N, karena gayanya saling melawan.

Jawabannya: tergantung arah! Jika mereka menarik searah, totalnya 7 N. Jika berlawanan, tinggal 1 N. Jika saling tegak lurus, 5 N. Sudut lain memberi nilai di antaranya. Gaya adalah **vektor**, jadi tidak bisa dijumlahkan seperti menjumlahkan uang jajan. Kamu akan membuktikannya sendiri di Lab Mini 3.2.

3.1 Skalar dan vektor

Besaran **skalar** cukup dinyatakan dengan angka dan satuan: massa 50 kg, suhu 30 °C, waktu 2 jam. Besaran **vektor** juga butuh **arah**: perpindahan 5 km ke timur laut, gaya 10 N ke bawah, kecepatan 60 km/jam ke selatan. Tanpa arah, informasinya tidak lengkap. Bayangkan petunjuk "jalan 200 m" tanpa tahu ke mana!

Skalar (besar saja)	Vektor (besar + arah)
jarak tempuh: 7 km	perpindahan: 5 km ke timur laut
laju (kelajuan): 40 km/jam	kecepatan: 40 km/jam ke utara
massa, waktu, suhu, energi	gaya, berat, percepatan, momentum

Vektor digambar sebagai **panah**. Panjang panah menyatakan **besar**, arah panah menyatakan **arah**. Ditulis dengan tanda panah di atas hurufnya, $\vec{A}$, atau dengan huruf tebal **A**. Besarnya ditulis $|\vec{A}|$ atau cukup A.

- **Vektor sama**: besar dan arahnya sama, walaupun letaknya berbeda. Panah boleh digeser asal tidak diputar dan tidak diubah panjangnya.
- **Vektor negatif** $-\vec{A}$: besarnya sama, arahnya berlawanan.
- **Vektor nol**: besarnya nol. Contoh: perpindahanmu setelah lari satu putaran penuh di lapangan.
- **Vektor satuan**: vektor yang besarnya tepat 1, hanya untuk menunjukkan arah (lihat 3.4).

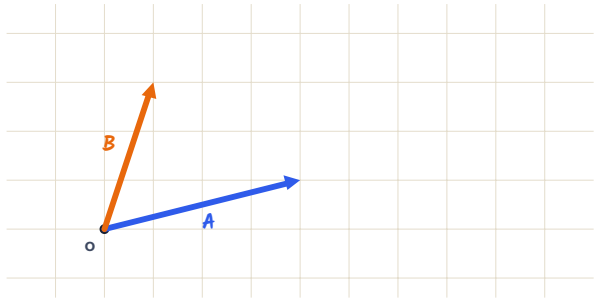
Bahasa sederhana · Gampangnya: **skalar** menjawab "berapa?", sedangkan **vektor** menjawab "berapa *dan* ke mana?". Ojek menghitung ongkos dari jarak tempuh (skalar). Burung yang terbang lurus pulang ke sarang memakai perpindahan (vektor).

⚠️ **AWAS JEBAKAN: SUDUT ANTARA DUA VEKTOR**

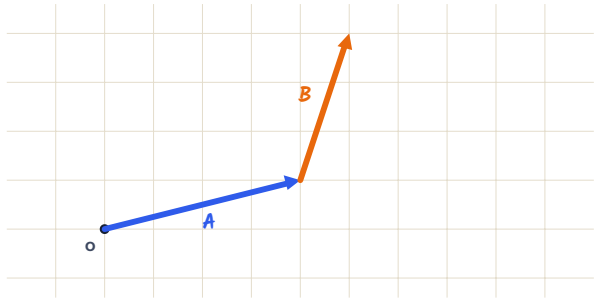
Sudut antara dua vektor diukur ketika **pangkal (ekor) keduanya disatukan**. Kalau kepala satu vektor menempel di ekor vektor lain, sudut yang terlihat di gambar adalah pelurusnya ($180^\circ - \theta$), bukan θ!

3.2 Menjumlahkan dan mengurangkan vektor

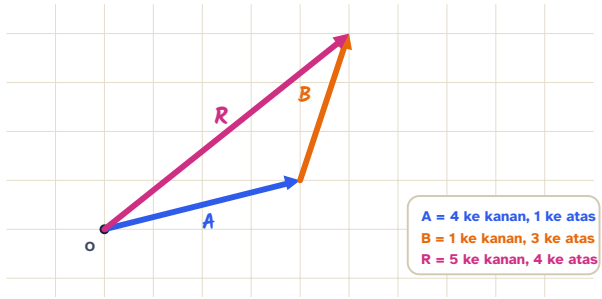
Menjumlahkan vektor artinya mencari satu vektor pengganti yang efeknya sama, yaitu **resultan**. Caranya bisa dengan menggambar:



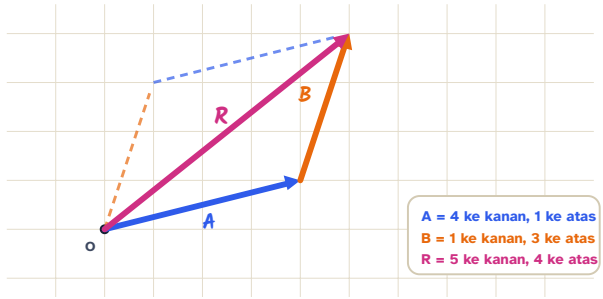
Langkah 1. Dua vektor: A (4 kotak ke kanan, 1 ke atas) dan B (1 kotak ke kanan, 3 ke atas), keduanya berpangkal di O. Berapa $A + B$?



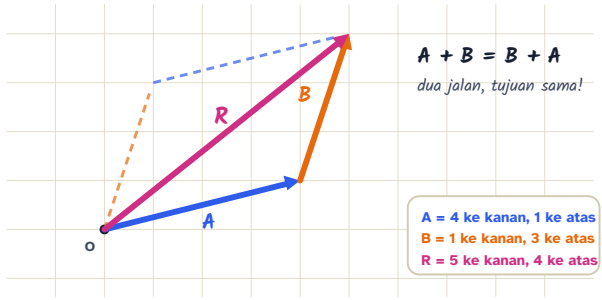
Langkah 2. Metode segitiga (kepala ke ekor): geser B tanpa memutar atau mengubah panjangnya, sampai ekornya menempel di kepala A.



Langkah 3. Resultan R ditarik dari ekor A ke kepala B. Hasilnya 5 kotak ke kanan dan 4 ke atas, besarnya $5^2 + 4^2 \approx 6{,}4$ kotak.



Langkah 4. Metode jajaran genjang: pasang A dan B dari titik yang sama, lalu lengkapi jajaran genjangnya (garis putus-putus). Diagonalnya adalah R yang sama!



Langkah 5. Urutan tidak penting: $A + B = B + A$. Untuk tiga vektor atau lebih, sambung saja kepala ke ekor terus-menerus (**metode poligon**).

Dengan hukum kosinus, besar resultan dua vektor yang membentuk sudut θ (diukur ekor ke ekor) dapat dihitung tanpa menggambar:

RUMUS HIDUP

Resultan dua vektor

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + 2\,A\,B\cos\theta}$$

Searah (θ = 0°) paling besar, berlawanan (θ = 180°) paling kecil, tegak lurus (θ = 90°) jadi Pythagoras.

- A Gaya Raka N
- B Gaya Sari N
- θ Sudut antara keduanya °
- R Resultan N

RESULTAN

5

N

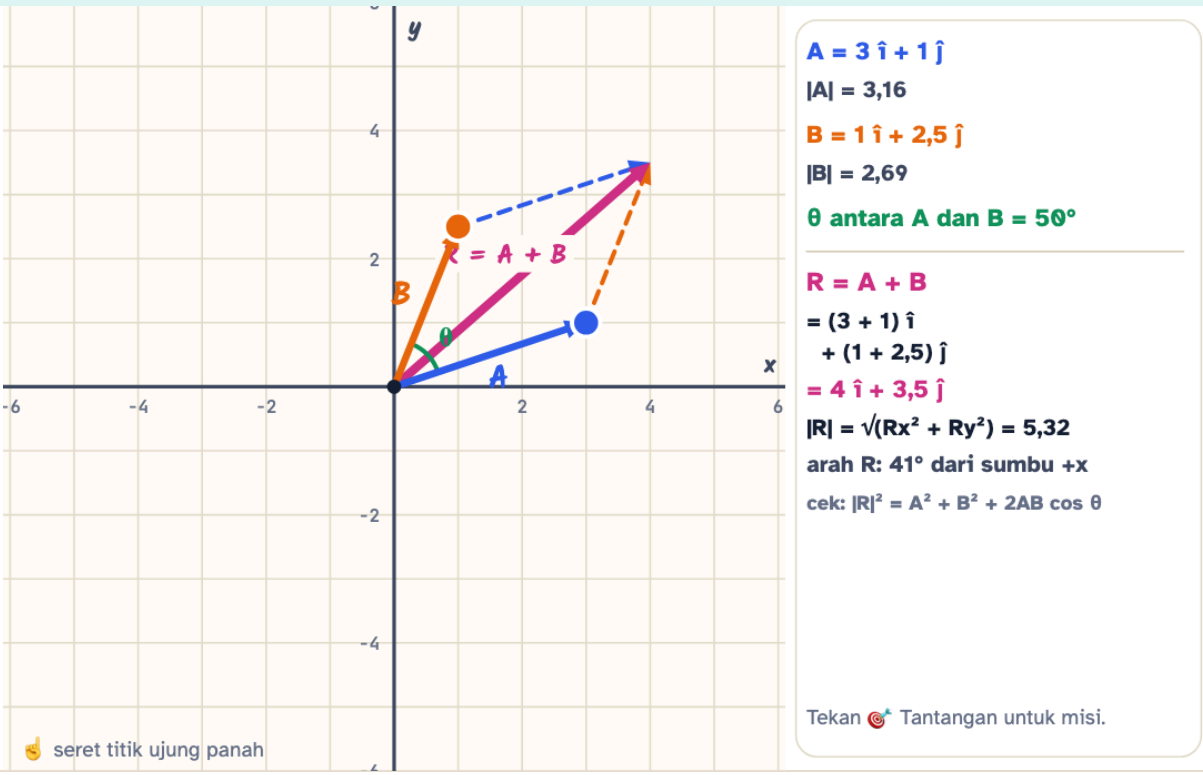
Gaya **3** N dan **4** N dengan sudut **90**° menghasilkan resultan **5** N. Coba θ = 0°, 90°, dan 180°. Resultan selalu di antara selisih dan jumlah kedua gaya.

Cek satuan: Semua suku di bawah akar bersatuan N^2, jadi akarnya bersatuan N. Saat $\theta = 90^\circ$, $\cos\theta = 0$ dan rumus ini menjadi Pythagoras.

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

LAB MINI **Lab vektor: seret ujung panahnya!**

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



|A|	|B|	Sudut antara A dan B	Hasil
3,16	2,69	50 °	|R| = 5,32

Seret titik di ujung panah **A** (biru) dan **B** (oranye). Pilih mode **A + B**, **A − B**, **A · B**, atau **A × B**, lalu perhatikan hitungan di panel kanan. Tekan **Tantangan** untuk misi acak. Bisakah kamu membuat resultan 7 dari 3 dan 4? Bagaimana dengan 1? Atau 0?

Mengurangkan vektor sama dengan menjumlahkan vektor negatifnya: $A - B = A + (-B)$. Besarnya $|A - B| = \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB\cos\theta}$. Trik menggambarnya: $A - B$ adalah panah dari **kepala** B **ke kepala** A. Pengurangan vektor dipakai untuk kecepatan relatif, misalnya kecepatan motor menurut pengendara motor lain (Bab 4 dan 5).

CONTOH **Dua tarikan tegak lurus**

Raka menarik kardus 6 N ke timur, Sari menarik 8 N ke utara. Berapa besar dan arah gaya totalnya?

1. Sudutnya 90°, jadi pakai Pythagoras: $R = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{100} = 10$ N.
2. Arah: $\tan\alpha = \dfrac{8}{6}$, sehingga $\alpha \approx 53^\circ$ dari arah timur menuju utara.

10 N ke arah timur laut (53° dari timur). Perhatikan: 10 N, bukan 14 N!

KERJAKAN BERSAMA **Sudut 60°**

Dua gaya 5 N dan 3 N membentuk sudut 60°. Berapa besar resultannya?

1. $\cos 60^\circ = 0{,}5.$
2. $R = \sqrt{5^2 + 3^2 + 2 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 0{,}5} = \sqrt{25 + 9 + 15} = \sqrt{49}.$

$R = 7$ **N. Masuk akal: lebih kecil dari 8 N (jika searah) dan lebih besar dari 2 N (jika berlawanan).**

MITOS

"3 N + 4 N pasti 7 N."

FAKTA

Hanya jika keduanya **searah**. Gaya adalah vektor, jadi hasilnya bisa berapa saja dari 1 N (berlawanan) sampai 7 N (searah), termasuk 5 N jika tegak lurus.

MITOS

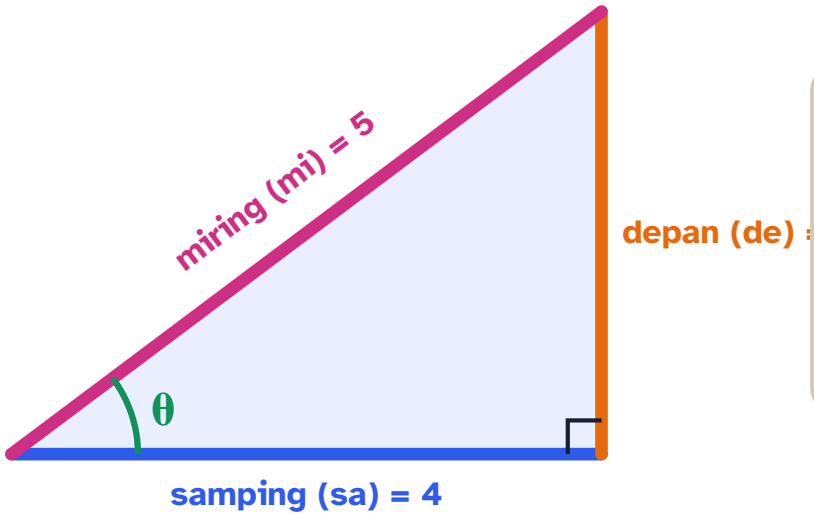
"Perpindahan sama saja dengan jarak tempuh."

FAKTA

Jarak tempuh adalah panjang lintasan (skalar). Perpindahan adalah panah lurus dari titik awal ke titik akhir (vektor). Lari satu putaran lapangan: jaraknya 400 m, perpindahannya nol!

3.3 Menguraikan vektor: sindemi, kosami, tandesa

Kebalikan dari menjumlahkan adalah **menguraikan**: memecah satu vektor menjadi dua **komponen** yang saling tegak lurus, biasanya sepanjang sumbu x dan y. Untuk itu kita butuh trigonometri segitiga siku-siku.



sin θ = de/mi
SIN-DE-MI · 3/5 = 0,6

cos θ = sa/mi
KO-SA-MI · 4/5 = 0,8

tan θ = de/sa
TAN-DE-SA · 3/4 = 0,75

Segitiga 3-4-5 dengan $\theta \approx 37^\circ$. Sisi "depan" adalah sisi di seberang sudut θ.

TRIK KAK NARA: SINDEMI, KOSAMI, TANDESA

Ucapkan seperti nama teman: **Sin-de-mi** (sinus = depan/miring), **Ko-sa-mi** (kosinus = samping/miring), **Tan-de-sa** (tangen = depan/samping). Untuk komponen vektor, ingat juga: **"kos" menempel pada sudut**. Komponen yang bersebelahan dengan sudut θ memakai cos, komponen di seberangnya memakai sin.

θ	0°	30°	37°	45°	53°	60°	90°
$\sin\theta$	0	$\frac{1}{2}$	≈ 0,6	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	≈ 0,8	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	1
$\cos\theta$	1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	≈ 0,8	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	≈ 0,6	$\frac{1}{2}$	0
$\tan\theta$	0	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	≈ 0,75	1	≈ 1,33	$\sqrt{3}$	tak terdefinisi

Jika vektor A membentuk sudut θ terhadap sumbu x positif, komponennya adalah $A_x = A\cos\theta$ dan $A_y = A\sin\theta$. Sebaliknya, dari komponen kita bisa kembali ke vektornya: $A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ dan $\tan\theta = A_y/A_x$.

RUMUS HIDUP **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.

A Tegangan tali layangan N

θ Sudut terhadap tanah °

A_x Komponen mendatar N

KOMPONEN MENDATAR

15,97

N

Tali layangan menarik **20** N pada sudut **37°** terhadap tanah. Tarikan mendatar yang terasa di tanganmu **15,97** N. Komponen tegaknya adalah A sin θ.

Cek satuan: $\cos\theta$ tidak bersatuan, jadi A_x bersatuan sama dengan A. Cek: $A_x^2 + A_y^2 = A^2(\cos^2\theta + \sin^2\theta) = A^2$.

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

KERJAKAN BERSAMA **Tali layangan**

Tali layangan menarik tangan Raka dengan gaya 20 N, membentuk sudut 37° terhadap tanah. Berapa komponen mendatar dan tegaknya? (sin 37° ≈ 0,6; cos 37° ≈ 0,8)

1. Komponen mendatar menempel pada sudut, jadi pakai cos: $F_x = 20 \times 0{,}8 = 16$ N.
2. Komponen tegak di seberang sudut, jadi pakai sin: $F_y = 20 \times 0{,}6 = 12$ N.
3. Cek: $\sqrt{16^2 + 12^2} = \sqrt{400} = 20$ N. ✓

16 N menarik mendatar (mengajak Raka berjalan) dan 12 N menarik ke atas (sedikit mengangkat lengannya).

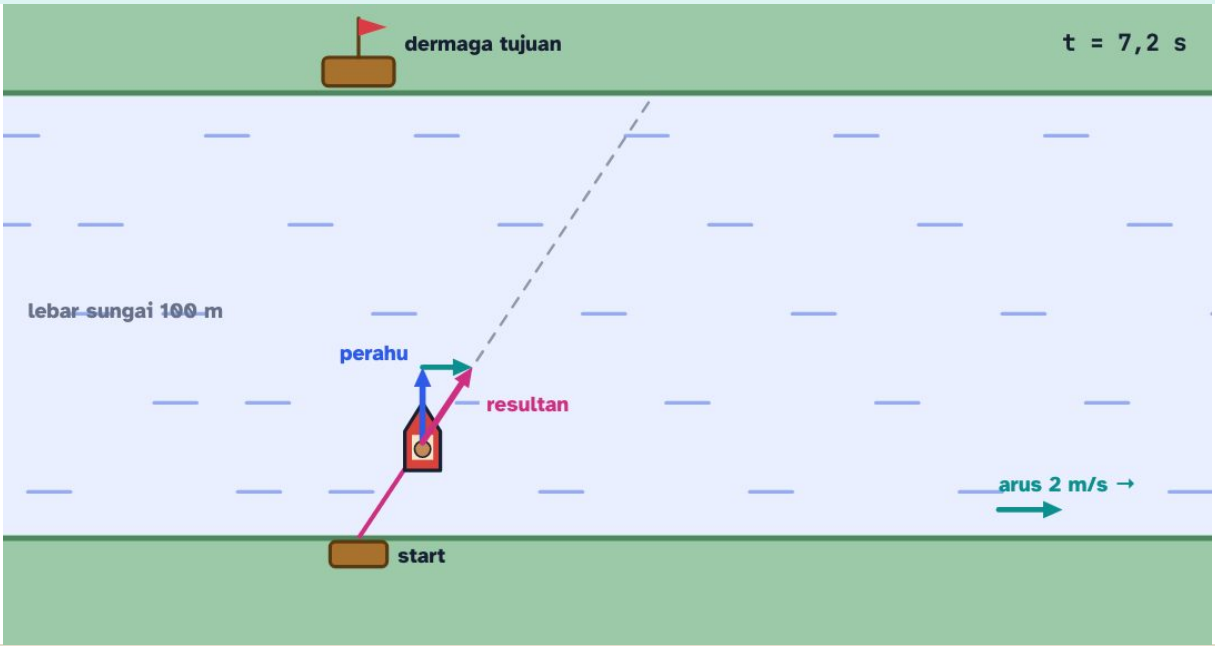
⚠️ **AWAS JEBAKAN: SUDUT DARI SUMBU YANG MANA?**

Rumus $A_x = A\cos\theta$ hanya berlaku jika θ diukur dari sumbu x. Jika soal memberi sudut terhadap **sumbu tegak** (misalnya "tali membentuk 30° terhadap vertikal"), maka $A_x = A\sin 30^\circ$ dan $A_y = A\cos 30^\circ$. Selalu gambar dulu, lalu cari sisi mana yang "menempel" pada sudut.

Sedikit tambahan dari kotak alat matematika: sudut juga bisa diukur dalam **radian**, dengan $180^\circ = \pi$ rad, sehingga 1 rad ≈ 57,3°. Untuk sudut kecil (dalam radian), $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$. Pendekatan inilah yang membuat rumus bandul $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ berlaku untuk ayunan kecil.

LAB MINI **Perahu nelayan menyeberangi arus sungai**

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



Kecepatan resultan	Waktu menyeberang	Hanyut dari dermaga	Keadaan
3,61 m/s	33,3 s	66,7 m	menyeberang…

Atur kecepatan perahu, kecepatan arus, dan sudut haluan, lalu tekan **Jalankan**. Panah biru = kecepatan perahu terhadap air, panah hijau toska = arus, panah magenta = resultan. Misi: mendarat **tepat di dermaga** seberang! Petunjuk: komponen haluan yang melawan arus harus sama besar dengan arusnya.

FISIKA INDONESIA

Pelaut Bugis-Makassar dan Bajo berlayar menyeberangi lautan Nusantara dengan perahu seperti **pinisi**, yang seni pembuatannya diakui UNESCO sebagai warisan budaya takbenda pada 2017. Tanpa GPS, mereka memperhitungkan arah angin dan arus laut terhadap arah tujuan, lalu "mengarahkan haluan sedikit melawan arus", persis penjumlahan vektor di Lab Mini ini. Nelayan dan tukang perahu penyeberangan di Sungai Musi dan Sungai Kapuas memakai trik yang sama setiap hari.

3.4 Vektor satuan: $\hat{\imath}$, $\hat{\jmath}$, $\hat{k}$

Menulis "4 ke kanan dan 3 ke atas" itu panjang. Fisikawan memakai **vektor satuan**: panah sepanjang 1 yang menunjuk arah sumbu. $\hat{\imath}$ menunjuk sumbu x, $\hat{\jmath}$ menunjuk sumbu y, dan $\hat{k}$ menunjuk sumbu z. Maka vektor bisa ditulis dalam bentuk komponen:

$$A = A_x\,\hat{\imath} + A_y\,\hat{\jmath} + A_z\,\hat{k}, \quad \text{dengan besar } |A| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}.$$

Menjumlahkan vektor kini semudah menjumlahkan per komponen: $\hat{\imath}$ dengan $\hat{\imath}$, $\hat{\jmath}$ dengan $\hat{\jmath}$. Contoh: $(3\hat{\imath} + 1\hat{\jmath}) + (1\hat{\imath} + 3\hat{\jmath}) = 4\hat{\imath} + 4\hat{\jmath}$.

TRIK KAK NARA: PISAHKAN DOMPETNYA

Bayangkan $\hat{\imath}$ itu uang receh dan $\hat{\jmath}$ itu uang kertas. Saat menghitung isi dua dompet, receh dijumlahkan dengan receh, kertas dengan kertas. Kamu tidak akan pernah menjumlahkan "3 receh + 4 kertas = 7 apa-apa"!

Vektor posisi $r = x\,\hat{\imath} + y\,\hat{\jmath}$ menunjuk letak sebuah benda dari titik asal. **Perpindahan** adalah selisih dua vektor posisi: $\Delta r = r_2 - r_1$. Vektor satuan searah A diperoleh dengan membagi vektor itu dengan besarnya: $\hat{A} = A/|A|$.

CONTOH **Perpindahan ojek di peta**

Di peta berpetak (1 petak = 1 km), sekolah Sari berada di $(2, 1)$ dan rumahnya di $(5, 5)$. Tentukan vektor perpindahan dan besarnya.

1. $\Delta r = r_2 - r_1 = (5-2)\hat{\imath} + (5-1)\hat{\jmath} = 3\hat{\imath} + 4\hat{\jmath}$ km.
2. $|\Delta r| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$ km.

$\Delta r = 3\hat{\imath} + 4\hat{\jmath}$ **km, besarnya 5 km, sama seperti di komik!**

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KOSINUS ARAH

Sudut-sudut α, β, γ antara A dan sumbu x, y, z memenuhi $\cos\alpha = \dfrac{A_x}{A}$, $\cos\beta = \dfrac{A_y}{A}$, $\cos\gamma = \dfrac{A_z}{A}$. Ketiganya disebut **kosinus arah** dan selalu memenuhi $\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$. Sebenarnya $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$ tidak lain adalah komponen vektor satuan $\hat{A}$.

3.5 Perkalian titik dan perkalian silang

Ada dua cara mengalikan dua vektor, dan keduanya sangat berguna di fisika.

Perkalian titik (*dot product*) menghasilkan **skalar**:

$$A \cdot B = AB\cos\theta = A_xB_x + A_yB_y + A_zB_z$$

Maknanya: "seberapa searah" dua vektor itu. Nilainya maksimum jika searah, nol jika tegak lurus, dan negatif jika arahnya berlawanan. Contoh terpenting adalah **usaha**: $W = F \cdot s$. Saat kamu menarik koper beroda dengan tali miring, hanya komponen gaya yang searah perpindahan yang melakukan usaha (Bab 8).

RUMUS HIDUP **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!

- F Gaya tarik N
- s Perpindahan m
- θ Sudut gaya dan perpindahan °
- W Usaha J

USAHA
250
J

Tarikan **50** N pada sudut **60**° selama perpindahan **10** m menghasilkan usaha **250** J. Coba θ = 90° (nol!) dan θ = 120° (negatif: gaya itu justru menghambat).

Satuan Nusantara: ≈ 6% dari 1 kkal (kalori makanan)

Cek satuan: $1\,\mathrm{N} \times 1\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{J}$ (joule).

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

Perkalian silang (*cross product*) menghasilkan **vektor** baru yang tegak lurus terhadap kedua vektor asal:

$|A \times B| = AB \sin\theta,$ arahnya menurut **kaidah tangan kanan**.

Arahkan jari-jari tangan kananmu ke A, lalu tekuk ke arah B. Ibu jarimu menunjuk arah $A \times B$. Besarnya sama dengan **luas jajaran genjang** yang dibentuk A dan B. Urutan penting: $B \times A = -A \times B$. Untuk vektor satuan: $\hat{\imath} \times \hat{\jmath} = \hat{k}$, $\hat{\jmath} \times \hat{k} = \hat{\imath}$, $\hat{k} \times \hat{\imath} = \hat{\jmath}$. Contoh fisikanya adalah **torsi** $\tau = r \times F$: membuka mur roda motor jauh lebih mudah dengan kunci yang panjang dan didorong tegak lurus (Bab 10). Coba kedua perkalian ini di Lab Mini 3.2 dengan mode **A · B** dan **A × B**.

KERJAKAN BERSAMA **Titik atau silang?**

$A = 3\hat{\imath} + 1\hat{\jmath}$ **dan** $B = 1\hat{\imath} + 2\hat{\jmath}$**. Hitung** $A \cdot B$ **dan** $A \times B$**.**

1. Titik: $A \cdot B = 3 \times 1 + 1 \times 2 = 5$. Hasilnya skalar.
2. Silang (vektor di bidang xy): $A \times B = (A_x B_y - A_y B_x)\,\hat{k} = (3 \times 2 - 1 \times 1)\,\hat{k} = 5\hat{k}$.
3. Arah $+\hat{k}$ berarti keluar dari layar (kaidah tangan kanan). Luas jajaran genjangnya 5 satuan luas.

$A \cdot B = 5$ **(skalar) dan** $A \times B = 5\hat{k}$ **(vektor). Angkanya kebetulan sama, tetapi jenisnya berbeda!**

MITOS

"Perkalian titik dua vektor menghasilkan vektor."

FAKTA

Perkalian **titik** menghasilkan **skalar** (contoh: usaha). Perkalian **silang** yang menghasilkan vektor (contoh: torsi).

MITOS

"Usaha selalu positif kalau ada gaya dan benda bergerak."

FAKTA

Jika gaya tegak lurus gerak ($\theta = 90^\circ$), usahanya nol. Jika berlawanan arah gerak, usahanya negatif. Contohnya gaya gesek yang memperlambat benda.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM KOSINUS, HUKUM SINUS, DAN DETERMINAN

Hukum kosinus lahir dari perkalian titik: $|A+B|^2 = (A+B)\cdot(A+B) = A^2 + B^2 + 2A\cdot B$. Pada segitiga vektor $A + B = R$, hukum sinus berlaku: $\dfrac{A}{\sin\alpha} = \dfrac{B}{\sin\beta} = \dfrac{R}{\sin\gamma}$, dengan setiap sudut berhadapan dengan sisinya. Perkalian silang tiga dimensi paling mudah dihitung dengan determinan: $A \times B = \begin{vmatrix} \hat{\imath} & \hat{\jmath} & \hat{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$. Volume balok miring (paralelepipedum) yang dibentuk tiga vektor adalah $|A \cdot (B \times C)|$.

TAMU DARI MASA LALU

Notasi vektor yang kita pakai sekarang dirapikan pada 1880-an oleh dua orang yang bekerja terpisah: fisikawan Amerika **Josiah Willard Gibbs** dan insinyur Inggris **Oliver Heaviside**. Keduanya ingin menulis persamaan listrik-magnet Maxwell dengan lebih ringkas. Sebelumnya, persamaan Maxwell ditulis dalam puluhan persamaan komponen yang panjang!

3.6 Grafik dan kemiringan

Fisikawan suka grafik karena satu gambar bisa menceritakan seluruh gerak. Grafik garis lurus $y = mx + c$ punya dua angka penting: **titik potong** c (nilai y saat $x = 0$) dan **kemiringan** (gradien) m:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{("naik dibagi maju")}$$

Tebak Dulu!

Grafik posisi–waktu dua ojek berupa garis lurus. Garis ojek A lebih curam daripada garis ojek B. Apa artinya?

- Ojek A lebih jauh dari pangkalan.
- Ojek A bergerak lebih cepat.
- Ojek A sedang naik tanjakan.
- Ojek A sedang dipercepat.

Jawabannya: ojek A lebih cepat. Kemiringan grafik posisi–waktu adalah $\Delta x / \Delta t$, yaitu kecepatan. Garis lurus berarti kecepatannya tetap (bukan dipercepat), dan grafik bukanlah gambar jalan. Kecuraman grafik tidak ada hubungannya dengan tanjakan!

Grafik	Kemiringannya menyatakan	Luas di bawahnya menyatakan
posisi x terhadap waktu t	kecepatan v	(tidak bermakna khusus)
kecepatan v terhadap waktu t	percepatan a	perpindahan Δx
gaya F terhadap perpindahan x	(untuk pegas: konstanta k)	usaha W
gaya F terhadap waktu t	–	impuls (perubahan momentum)

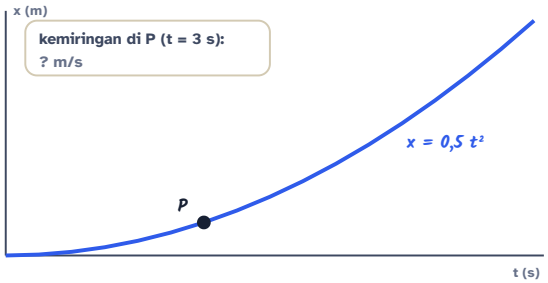
Bentuk grafik juga membocorkan hubungan antarbesaran: **garis lurus melalui titik asal** berarti sebanding ($y \propto x$); **parabola** berarti $y \propto x^2$; **hiperbola** yang makin melandai berarti berbanding terbalik ($y \propto 1/x$).

TRIK MELURUSKAN GRAFIK

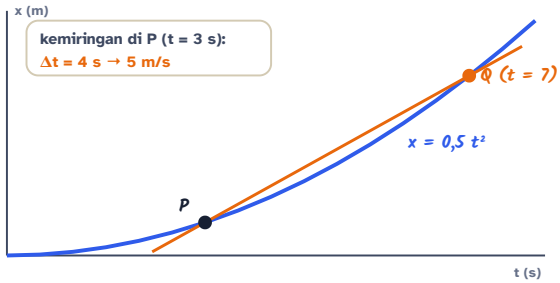
Grafik lengkung sulit dibaca kemiringannya. Triknya: ganti sumbu agar grafiknya lurus. Untuk bandul, $T \propto \sqrt{L}$ melengkung, tetapi T^2 terhadap L lurus dengan kemiringan $4\pi^2/g$. Dari kemiringan itu kita bisa menghitung g. Trik ini sangat sering dipakai dalam praktikum IGCSE dan IB.

3.7 Mini-kalkulus: turunan dan integral

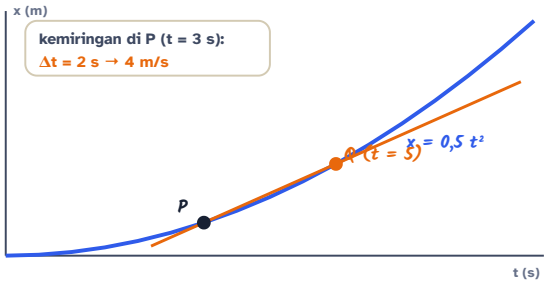
Bagaimana kalau grafiknya melengkung? Kemiringannya berubah di setiap titik. Kecepatan **sesaat** adalah kemiringan **garis singgung** di titik itu. Kalkulus memberi cara menghitungnya. Ikuti animasinya:



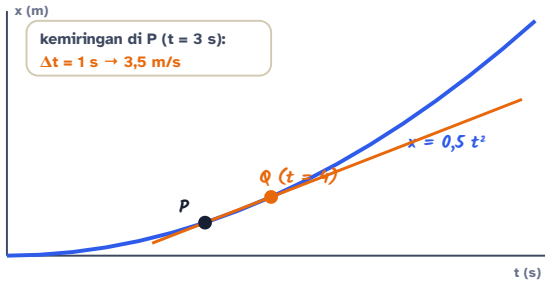
Langkah 1. Posisi motor yang mulai ngegas dari diam: $x = 0{,}5\,t^2$. Berapa kecepatannya tepat pada $t = 3$ s (titik P)? Grafiknya melengkung, jadi kemiringannya terus berubah.



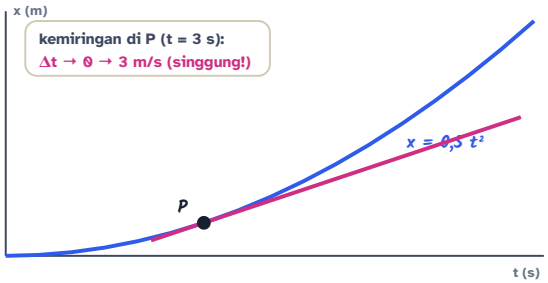
Langkah 2. Ambil titik kedua Q pada $t = 7$ s. Kemiringan **garis potong** PQ: $\dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{24{,}5 - 4{,}5}{4} = 5$ m/s. Itu kecepatan *rata-rata*, bukan sesaat.



Langkah 3. Dekatkan Q ke $t = 5$ s: $\dfrac{12{,}5 - 4{,}5}{2} = 4$ m/s.



Langkah 4. Dekatkan lagi ke $t = 4$ s: $\dfrac{8 - 4{,}5}{1} = 3{,}5$ m/s. Makin dekat Q, makin mirip garis potong dengan garis singgung.



Langkah 5. Jika $\Delta t \to 0$, garis potong menjadi **garis singgung** dengan kemiringan 3 m/s. Inilah **turunan**: $v = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = t = 3$ m/s.

Turunan $\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$ adalah laju perubahan sesaat, yaitu kemiringan garis singgung. Untuk fungsi pangkat ada aturan sakti:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(t^n) = n\,t^{n-1} \quad \text{contoh: } \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(5t^2) = 10t, \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(7) = 0.$$

RUMUS HIDUP **Kemiringan garis singgung (turunan)**

$$v = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(k\,t^2\right) = 2\,k\,t$$

Untuk gerak x = k t², kemiringan grafik makin curam seiring waktu: motornya makin ngebut!

k Konstanta k m/s² | t Saat t s | v Kecepatan sesaat m/s

KECEPATAN SESAAT

3

m/s

Untuk x = **0,5** t², kemiringan garis singgung pada t = **3** s adalah **3** m/s. Itulah angka yang ditunjukkan spidometer pada saat itu.

Satuan Nusantara: ≈ 2,1 × jalan kaki santai · ≈ 27% dari ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 3% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \times \mathrm{s} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Satuan turunan = satuan x dibagi satuan t.

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

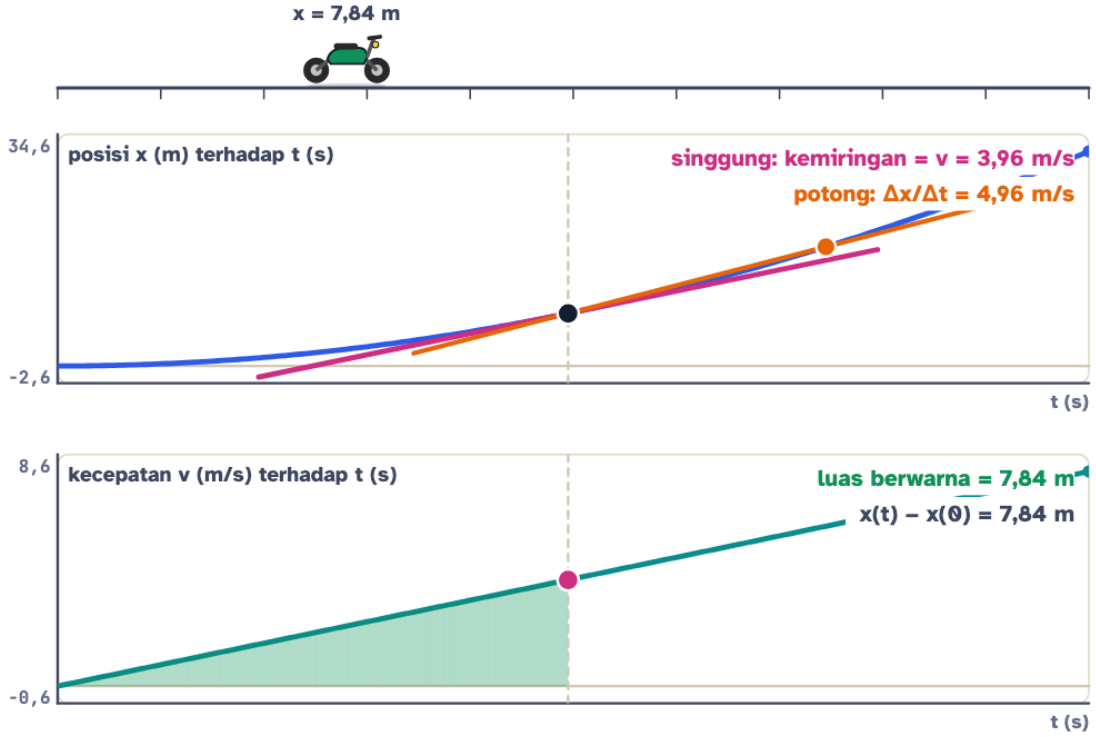
Integral adalah kebalikan turunan, dan maknanya **luas di bawah grafik**. Luas di bawah grafik kecepatan–waktu adalah perpindahan. Aturan pangkatnya:

$$\int t^n\,\mathrm{d}t = \frac{t^{n+1}}{n+1} + C \quad \text{contoh: } \int_0^3 t\,\mathrm{d}t = \frac{3^2}{2} = 4{,}5.$$

Lihat: motor $x = 0{,}5t^2$ punya kecepatan $v = t$. Luas segitiga di bawah grafik $v = t$ dari 0 sampai 3 s adalah $\frac{1}{2} \times 3 \times 3 = 4{,}5$ m, persis sama dengan $x(3) = 0{,}5 \times 9 = 4{,}5$ m. Turunan dan integral saling membatalkan!

LAB MINI **Turunan dan integral yang bisa dilihat**

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



Posisi x(t)	Kemiringan singgung = v	Kemiringan potong Δx/Δt	Luas di bawah v
7,84 m	3,96 m/s	4,96 m/s	7,84 m

Pilih jenis gerak, lalu geser waktu t (atau seret di grafik). Grafik atas: posisi dengan **garis singgung** (magenta) dan **garis potong** (oranye). Kecilkan Δt dan lihat garis potong "menempel" ke garis singgung. Grafik bawah: kecepatan, dengan **luas** berwarna yang sama dengan perpindahan.

Bahasa sederhana · Gampangnya: **turunan** menjawab "seberapa cepat sesuatu berubah sekarang?" (seperti spidometer). **Integral** menjawab "berapa banyak yang sudah terkumpul?" (seperti odometer yang menjumlahkan jarak).

COBA SENDIRI **Turunan dua kali**

Posisi sebuah benda $x = 2t^3 - 3t^2$ (meter, t dalam sekon). Tentukan kecepatan dan percepatannya saat $t = 2$ s.

1. Turunkan sekali: $v = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = 6t^2 - 6t$. Pada $t = 2$: $v = 24 - 12 = 12$ m/s.
2. Turunkan lagi: $a = \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = 12t - 6$. Pada $t = 2$: $a = 24 - 6 = 18$ m/s².
3. Cek dengan integral: $\int_0^2 (6t^2 - 6t)\,\mathrm{d}t = \left[2t^3 - 3t^2\right]_0^2 = 16 - 12 = 4$ m $= x(2) - x(0)$. ✓

$v = 12$ m/s dan $a = 18$ m/s². Posisi → (turunkan) → kecepatan → (turunkan) → percepatan. Arah sebaliknya memakai integral.

TAMU DARI MASA LALU

Kalkulus ditemukan pada abad ke-17 oleh dua orang secara terpisah: **Isaac Newton** di Inggris, yang menyebutnya "metode fluksi", dan **Gottfried Wilhelm Leibniz** di Jerman. Lambang $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t$ dan $\int$ yang kita pakai berasal dari Leibniz. Keduanya sempat bertengkar hebat soal siapa yang lebih dulu, padahal dunia membutuhkan keduanya.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KOTAK ALAT KALKULUS UNTUK OLIMPIADE

Aturan penting: $\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\sin\omega t = \omega\cos\omega t$, $\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\cos\omega t = -\omega\sin\omega t$, $\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}e^{kt} = k\,e^{kt}$, aturan perkalian $(uv)' = u'v + uv'$, dan aturan rantai $\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}f(g(t)) = f'(g)\,g'(t)$. **Maksimum dan minimum:** nilai ekstrem terjadi saat turunan bernilai nol. Contoh: tinggi bola $h = 20t - 5t^2$ maksimum saat $\dfrac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} = 20 - 10t = 0$, yaitu $t = 2$ s dan $h_{\text{maks}} = 20$ m. **Pendekatan binomial:** untuk $|x| \ll 1$, $(1+x)^n \approx 1 + nx$. Contoh: $\sqrt{1{,}02} \approx 1 + \frac{1}{2}(0{,}02) = 1{,}01$. Pendekatan ini dipakai di mana-mana, dari gravitasi di dekat permukaan Bumi sampai relativitas.

Aplikasi ojek

Ongkos dihitung dari jarak tempuh di jalan (skalar), sedangkan peta juga menampilkan garis lurus (perpindahan) dari titik jemput ke tujuan.

Layangan

Tarikan tali terurai menjadi komponen mendatar dan tegak. Angin, berat, dan tegangan tali saling menyeimbangkan sebagai jumlah vektor nol.

Perahu dan pesawat

Pilot pesawat dan nakhoda kapal mengarahkan hidung kendaraan sedikit melawan angin atau arus agar resultan geraknya lurus ke tujuan.

Spidometer dan odometer

Spidometer menunjukkan kelajuan sesaat, yaitu besar turunan posisi terhadap waktu. Odometer mengumpulkan jarak, yaitu integral kelajuan terhadap waktu.

Kunci roda motor

Torsi adalah perkalian silang lengan kunci dan gaya. Lengan lebih panjang dan dorongan tegak lurus membuat mur lebih mudah dibuka.

Gim dan animasi

Setiap tokoh di gim punya vektor posisi dan kecepatan yang dijumlahkan di setiap bingkai (*frame*). Perkalian titik dipakai untuk menghitung terang-gelap cahaya.

Cek Cepat

Manakah yang merupakan besaran vektor?

- massa
- suhu
- gaya
- energi

Dua gaya 5 N dan 12 N saling tegak lurus. Besar resultannya...

- 17 N
- 13 N
- 7 N
- 60 N

Turunan $x = 3t^2$ terhadap t adalah...

- t^3
- $3t$
- $6t^2$
- $6t$

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. D

Tantangan Rumah: peta harta karun 3-4-5

Bahan: halaman atau lapangan, meteran gulung atau tali yang ditandai tiap meter, kapur atau batu penanda, kompas di HP

1. Tandai titik awal. Berjalanlah 3 m tepat ke timur (pakai kompas HP), lalu 4 m tepat ke utara. Tandai titik akhir.
2. Ukur jarak lurus dari titik awal ke titik akhir dengan meteran. Apakah hasilnya mendekati 5 m?
3. Ulangi dengan 5 m ke timur dan 12 m ke utara. Tebak dulu jarak lurusnya sebelum mengukur!
4. Bonus: dengan busur derajat atau aplikasi kompas, ukur sudut garis lurus itu terhadap arah timur. Bandingkan dengan $\tan\alpha = 4/3$.

Pertanyaan: Berapa jarak tempuh dan berapa besar perpindahanmu di setiap percobaan? Mengapa tukang bangunan memakai "segitiga 3-4-5" dengan tali untuk membuat sudut siku-siku pada fondasi rumah?

RINGKASAN KILAT **Bab 3 dalam 3 menit**

✅ Kamu sekarang bisa...

- membedakan besaran **skalar** dan **vektor**, juga **jarak** dan **perpindahan**
- menjumlahkan dan mengurangkan vektor secara **grafis** (segitiga, jajaran genjang) dan **analitis**
- **menguraikan** vektor dengan sin dan cos, serta memakai **vektor satuan** $\hat{\imath}, \hat{\jmath}, \hat{k}$
- menghitung **perkalian titik** dan **perkalian silang**, serta mengenali maknanya (usaha dan torsi)
- membaca **kemiringan grafik**, lalu memahami **turunan** sebagai laju perubahan dan **integral** sebagai luas

🔑 Istilah kunci

skalar | vektor | resultan | menguraikan | radian | vektor satuan | Vektor posisi | Perpindahan | kemiringan | garis singgung | turunan | Turunan | Integral

🧮 Rumus penting

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + 2\,A\,B\cos\theta}$$

Resultan dua vektor. Searah (θ = 0°) paling besar, berlawanan (θ = 180°) paling kecil, tegak lurus (θ = 90°) jadi Pythagoras.

$$A_x = A\cos\theta$$

Komponen mendatar sebuah vektor. Bayangan vektor di lantai saat disinari dari atas. Sudut kecil berarti bayangannya panjang, sudut 90° berarti bayangannya hilang.

$$W = F \cdot s = F\,s\cos\theta$$

Usaha sebagai perkalian titik. Hanya bagian gaya yang searah perpindahan yang 'dihitung'. Gaya tegak lurus gerak tidak melakukan usaha sama sekali!

$$v = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(k\,t^2\right) = 2\,k\,t$$

Kemiringan garis singgung (turunan). Untuk gerak x = k t^2, kemiringan grafik makin curam seiring waktu: motornya makin ngebut!

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Sudut antara dua vektor diukur ketika pangkal (ekor) keduanya disatukan.
- Rumus $A_x = A\cos\theta$ hanya berlaku jika θ diukur dari sumbu x.

⛰️ 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=3

🧩 Teka-teki untuk Bab 4

Spidometer motor Kak Nara menunjukkan 40 km/jam saat menikung. Apakah angka itu **kecepatan** atau **kelajuan**? Lalu, bagaimana HP-mu bisa tahu kecepatan sesaat, padahal GPS hanya mencatat posisi sekali setiap detik?

▼ Intip petunjuk

Spidometer tidak tahu arah, jadi ia menunjukkan kelajuan. HP menghitung $\Delta r/\Delta t$ dari posisi-posisi yang berdekatan, yaitu garis potong yang hampir menjadi garis singgung. Itulah turunan dalam kehidupan nyata! Bab 4 akan membahas gerak lurus memakai semua alat dari bab ini.

BAB 4 · GERAK & GAYA

04 Gerak Lurus: Cepat, Lambat, dan Makin Ngebut

Kereta cepat sanggup melaju 350 km/jam, tetapi di 100 meter pertama ia bisa kalah dari ojek. Kok bisa? Di bab ini kamu belajar membedakan "cepat" dan "makin cepat", lalu membaca kisah sebuah perjalanan hanya dari grafiknya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **jarak** dan **perpindahan**, **kelajuan** dan **kecepatan**, serta kecepatan dan **percepatan**;
- memakai persamaan GLB dan tiga persamaan "sakti" GLBB, termasuk menghitung **jarak henti** kendaraan;
- membaca grafik x-t dan v-t: **kemiringan** = laju perubahan, **luas** = perpindahan;
- menghitung gerak jatuh bebas dan gerak vertikal ke atas;
- memakai **kecepatan relatif** untuk kendaraan yang berpapasan atau saling menyusul.

OJEK VS KERETA CEPAT

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Anggap ojek punya percepatan 3 m/s² dan kereta cepat 0,5 m/s². Keduanya berangkat bersamaan dari keadaan diam. Setelah 5 detik, siapa yang berada di depan?

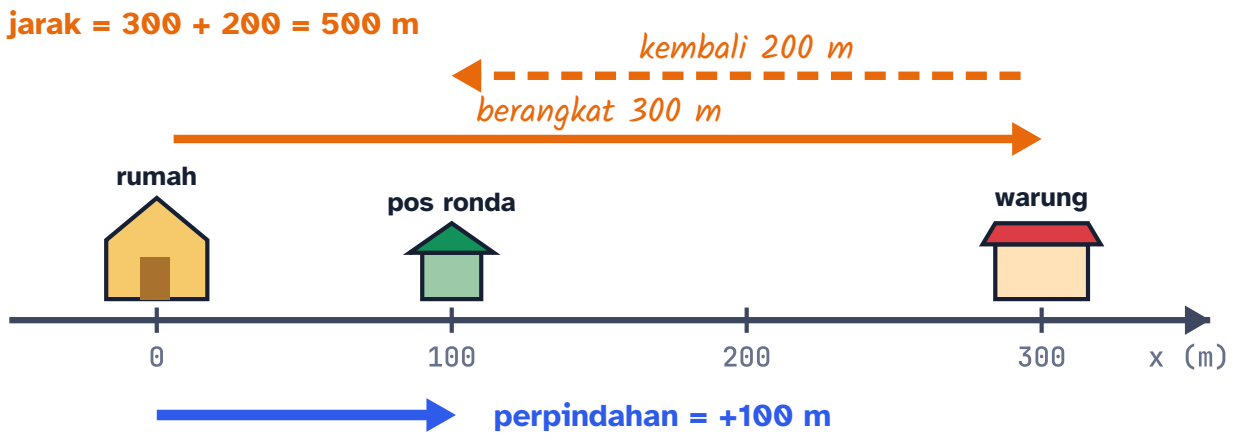
- Kereta cepat, karena kecepatan maksimumnya jauh lebih besar.
- Ojek, karena kecepatannya bertambah jauh lebih cepat.
- Sama, karena keduanya mulai dari diam pada saat yang sama.
- Tidak bisa ditentukan tanpa mengetahui massa kendaraannya.

Jawabannya: ojek. Setelah 5 s, kecepatan ojek sudah 15 m/s (54 km/jam) dan ia menempuh $\frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 5^2 = 37{,}5$ m. Kereta cepat baru 2,5 m/s dan menempuh 6,25 m. Kecepatan puncak 350 km/jam baru penting setelah beberapa menit. Di awal, yang menentukan adalah **percepatan**: seberapa cepat kecepatan *berubah*.

4.1 Posisi, jarak, dan perpindahan

Benda dikatakan **bergerak** jika posisinya berubah terhadap sebuah **titik acuan**. Kamu yang duduk di angkot diam terhadap sopir, tetapi bergerak terhadap tiang listrik di pinggir jalan. Jadi, "bergerak" atau "diam" selalu bergantung pada titik acuannya.

Untuk gerak lurus, kita cukup memakai **garis bilangan**. Pilih titik nol (misalnya rumah), lalu sepakati arah positif (misalnya ke timur). Posisi ditulis x, satuannya meter.



Raka berjalan dari rumah ke warung (300 m ke timur), lalu kembali ke pos ronda. Jarak tempuhnya 500 m, tetapi perpindahannya hanya 100 m ke timur.

Jarak adalah panjang seluruh lintasan yang benar-benar ditempuh. Jarak adalah **skalar**: hanya punya besar dan tidak pernah negatif. **Perpindahan** adalah perubahan posisi, $\Delta x = x_{\text{akhir}} - x_{\text{awal}}$. Perpindahan adalah **vektor**: tandanya (+ atau –) menunjukkan arah.

Bahasa sederhana · Gampangnya: **jarak** = panjang jalan yang kamu lewati. **Perpindahan** = seberapa jauh kamu sekarang dari tempat awal, lengkap dengan arahnya. Kalau kamu lari keliling lapangan lalu kembali ke garis start, jaraknya ratusan meter, tetapi perpindahanmu nol!

TRIK KAK NARA: ODOMETER VS GARIS LURUS

Odometer motor menghitung **jarak**: angkanya terus bertambah, ke mana pun kamu pergi. **Perpindahan** itu seperti tarik garis lurus dari titik awal ke titik akhir di peta, lalu beri tanda arah.

4.2 Kelajuan dan kecepatan

Pasangan jarak–perpindahan punya "saudara" saat dibagi waktu:

Besaran	Rumus	Jenis	Contoh
Kelajuan rata-rata	$\dfrac{\text{jarak total}}{\text{waktu total}}$	skalar	500 m dalam 400 s → 1,25 m/s
Kecepatan rata-rata	$\bar{v} = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$	vektor	+100 m dalam 400 s → +0,25 m/s

Angka di spidometer motor adalah **kelajuan sesaat**: kelajuan pada satu saat tertentu. Secara matematis, kecepatan sesaat adalah kecepatan rata-rata untuk selang waktu yang sangat-sangat singkat: $v = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ dengan Δt mendekati nol.

Yang bergerak	Kelajuan (±)	Dalam m/s

Jalan kaki santai	5 km/jam	1,4 m/s
Pelari 100 m kelas dunia (Lalu Muhammad Zohri: ±10 s)	36 km/jam	±10 m/s
Ojek di jalan kota	40 km/jam	11 m/s
Mobil di jalan tol	90 km/jam	25 m/s
Kereta cepat Jakarta–Bandung (puncak)	350 km/jam	**97 m/s**
Bunyi di udara	1.235 km/jam	343 m/s

✏️ **TRIK KAK NARA: BAGI 3,6**

1 km/jam = 1000 m / 3600 s = $\frac{1}{3{,}6}$ m/s. Jadi **km/jam ÷ 3,6 = m/s**, dan **m/s × 3,6 = km/jam**. Hafalkan satu pasangan saja: 36 km/jam = 10 m/s, 72 km/jam = 20 m/s, 108 km/jam = 30 m/s.

CONTOH **Naik ojek ke sekolah**

Raka naik ojek dari rumah ke sekolah yang jaraknya 6 km. Perjalanan memakan waktu 15 menit, termasuk berhenti di lampu merah. Berapa kelajuan rata-ratanya, dalam km/jam dan m/s?

1. Ubah waktu ke jam: 15 menit = 0,25 jam.
2. Kelajuan rata-rata = $6\ \mathrm{km}/0{,}25\ \mathrm{jam} = 24$ km/jam.
3. Dalam m/s: $24/3{,}6 \approx 6{,}7$ m/s.

Kelajuan rata-ratanya 24 km/jam (≈ 6,7 m/s). Spidometer mungkin sempat menunjukkan 40 km/jam, tetapi berhenti di lampu merah menurunkan rata-ratanya.

⚠️ **AWAS JEBAKAN: RATA-RATA KELAJUAN ≠ KELAJUAN RATA-RATA**

Kak Nara naik motor ke pasar yang berjarak 12 km dengan kelajuan 60 km/jam, lalu pulang dengan 40 km/jam. Kelajuan rata-ratanya **bukan** $(60 + 40)/2 = 50$ km/jam! Berangkat butuh 0,2 jam, pulang butuh 0,3 jam. Kelajuan rata-rata = 24 km / 0,5 jam = **48 km/jam**. Bagian yang lambat berlangsung lebih lama, jadi bobotnya lebih besar.

FISIKA INDONESIA: KERETA CEPAT JAKARTA–BANDUNG

Kereta cepat pertama di Asia Tenggara ini beroperasi sejak Oktober 2023 dan bisa melaju sampai 350 km/jam. Jarak rutenya sekitar 140 km dan perjalanan tercepat memakan waktu sekitar 45 menit. Kelajuan rata-ratanya kira-kira 140 km / 0,75 jam ≈ **190 km/jam**, jauh di bawah 350 km/jam. Mengapa? Kereta harus berakselerasi pelan-pelan, mengerem sebelum stasiun, dan berhenti di stasiun antara. Kelajuan puncak hanya dipakai di sebagian rute.

4.3 Percepatan: seberapa cepat kecepatan berubah

Bayangkan kamu memotret spidometer ojek setiap detik setelah lampu hijau: 0, 3, 6, 9, 12 m/s. Kecepatannya bertambah 3 m/s **setiap detik**. Itulah **percepatan**:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t}$$

Satuannya m/s per s, ditulis **m/s²**. Jika kecepatan berkurang (misalnya saat mengerem), percepatannya berlawanan arah dengan gerak. Dalam bahasa sehari-hari ini disebut **perlambatan**, dan dalam hitungan diberi tanda negatif.

Situasi	Kecepatan v	Percepatan a
Motor diparkir	0	0
Kereta cepat melaju tetap 350 km/jam di rel lurus	sangat besar	**0**
Ojek baru lepas dari lampu merah	kecil	besar (±3 m/s²)
Bola tepat di puncak lemparan ke atas	**0**	9,8 m/s² ke bawah

Tabel ini memuat pelajaran terpenting bab ini: kecepatan dan percepatan adalah dua besaran yang berbeda. Benda bisa sangat cepat tanpa percepatan, dan bisa diam sesaat sambil tetap dipercepat.

Bahasa sederhana · Gampangnya: **kecepatan** = seberapa cepat kamu bergerak sekarang. **Percepatan** = seberapa cepat angka spidometer berubah. Jarum spidometer diam di 60? Percepatannya nol, walaupun kamu sedang ngebut.

AWAS JEBAKAN TANDA

Tanda negatif pada percepatan **tidak selalu** berarti melambat. Jika arah positif ke timur dan mobil bergerak ke barat ($v < 0$) sambil makin kencang, percepatannya juga negatif. Aturan pastinya: benda **makin cepat** jika v dan a bertanda sama, dan **makin lambat** jika tandanya berlawanan.

MITOS

"Kalau percepatannya nol, berarti bendanya diam."

FAKTA

Percepatan nol berarti kecepatan **tidak berubah**. Kereta cepat yang melaju tetap 350 km/jam di rel lurus punya percepatan nol, padahal sangat cepat!

MITOS

"Spidometer menunjukkan kelajuan rata-rata perjalanan."

FAKTA

Spidometer menunjukkan kelajuan **sesaat**. Kelajuan rata-rata dihitung dari jarak total dibagi waktu total, termasuk saat berhenti di lampu merah.

4.4 GLB: Gerak Lurus Beraturan

Gerak lurus beraturan (GLB) adalah gerak pada lintasan lurus dengan kecepatan tetap, sehingga percepatannya nol. Dalam selang waktu yang sama, benda menempuh jarak yang sama. Contohnya mobil yang melaju tetap di jalan tol yang lurus, atau eskalator di mal.

$$x = x_0 + v\,t \qquad \text{atau} \qquad s = v\,t$$

Rumus ini bercerita: posisi akhir = posisi awal + (kecepatan × waktu). x_0 adalah posisi awal (m), v kecepatan tetap (m/s), dan t waktu (s). Grafik x-t-nya berupa **garis lurus miring** yang kemiringannya sama dengan v. Grafik v-t-nya berupa **garis mendatar**.

CONTOH **Mobil di jalan tol**

Mobil melaju tetap 90 km/jam di jalan tol selama 20 menit. Berapa jarak yang ditempuh?

1. Ubah waktu ke jam: 20 menit = $\frac{1}{3}$ jam.
2. $s = v\,t = 90 \times \frac{1}{3} = 30$ km.

Mobil menempuh 30 km. Satuan km/jam cocok dengan waktu dalam jam, jadi tidak perlu mengubah ke m/s.

4.5 GLBB dan tiga persamaan "sakti"

Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) adalah gerak lurus dengan **percepatan tetap**. Kecepatannya bertambah (atau berkurang) dengan jumlah yang sama setiap detik. Angkot yang mulai jalan, motor yang mengerem, dan batu yang jatuh adalah contoh GLBB (atau mendekatinya).

Dari definisi percepatan, $a = (v - v_0)/t$, kita langsung mendapat persamaan sakti pertama:

RUMUS HIDUP **Kecepatan pada GLBB**

$$v = v_0 + a\,t$$

Kecepatan akhir = kecepatan awal + (tambahan kecepatan setiap detik × lamanya).

v_0 Kecepatan awal m/s | a Percepatan m/s² | t Waktu s | v Kecepatan akhir m/s

KECEPATAN AKHIR

10

m/s

Mulai dari **0** m/s, bertambah **2** m/s setiap detik, selama **5** s → kecepatan akhir **10** m/s. Hasil negatif berarti benda sudah berbalik arah.

Satuan Nusantara: ≈ 91% dari ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 7,1 × jalan kaki santai · ≈ 10% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\mathrm{m/s} + (\mathrm{m/s^2})(\mathrm{s}) = \mathrm{m/s}$

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

Untuk mencari jarak, gunakan fakta bahwa kecepatan naik secara merata. Jadi kecepatan rata-ratanya tepat di tengah: $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v)$. Kalikan dengan waktu, lalu ganti v dengan $v_0 + at$:

$$s = \frac{1}{2}(v_0 + v)\,t = \frac{1}{2}\big(v_0 + v_0 + at\big)\,t = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

RUMUS HIDUP **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.

v_0 Kecepatan awal m/s | a Percepatan m/s² | t Waktu s | s Perpindahan m

PERPINDAHAN
100
m

Bagian GLB: **0** × **10**. Bagian percepatan: ½ × **2** × **10**². Totalnya **100** m dari titik awal.

Satuan Nusantara: ≈ 95% dari panjang lapangan sepak bola · ≈ 76% dari tinggi Monas · ≈ 2% dari tinggi Puncak Jaya

Cek satuan: $(\mathrm{m/s})(\mathrm{s}) + (\mathrm{m/s^2})(\mathrm{s^2}) = \mathrm{m}$

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

Persamaan ketiga muncul jika t dihilangkan dari dua persamaan di atas. Persamaan ini sangat berguna saat waktu tidak diketahui, misalnya pada soal pengereman:

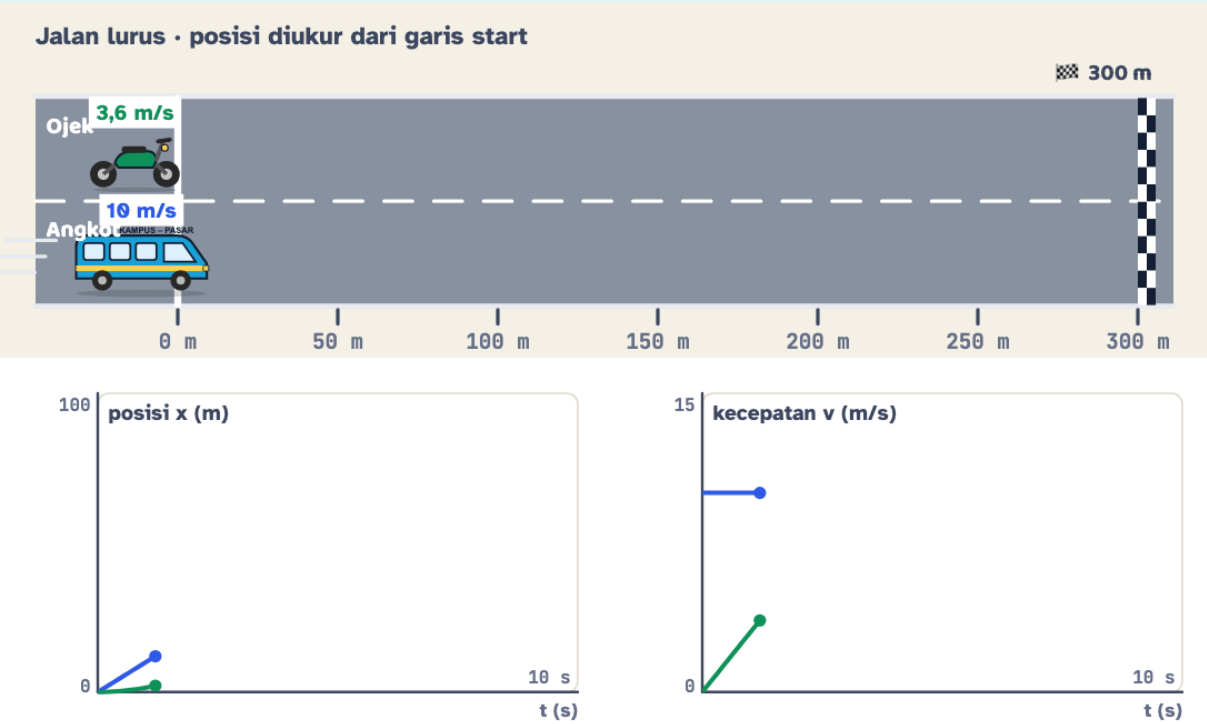
$$v^2 = v_0^2 + 2as$$

TRIK KAK NARA: CARI BESARAN YANG "ABSEN"

GLBB punya lima besaran: v_0, v, a, t, s. Setiap persamaan sakti tidak memuat satu besaran:
• $v = v_0 + at$ → tanpa s · • $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ → tanpa v · • $v^2 = v_0^2 + 2as$ → tanpa t · • bonus: $s = \frac{1}{2}(v_0 + v)t$ → tanpa a.
Lihat besaran mana yang tidak diketahui *dan* tidak ditanya, lalu pakai persamaan yang tidak memuatnya.

LAB MINI Balapan grafik: ojek vs angkot

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



Waktu	Posisi ojek	Posisi angkot	Keadaan
1,2 s	2,2 m	12 m	Angkot unggul 9,8 m

Pilih skenario, lalu jalankan. Perhatikan dua grafik di bawah jalan. Pada skenario "Ojek mengejar angkot", kapan jarak keduanya **paling jauh**? Lihat grafik v-t: apa yang terjadi pada kecepatan keduanya saat itu? Lalu bandingkan dengan saat ojek **menyusul**.

CONTOH Angkot mulai jalan

Angkot mulai bergerak dari keadaan diam dengan percepatan tetap 2 m/s². Berapa kecepatan dan jarak tempuhnya setelah 5 s?

1. Yang diketahui: $v_0 = 0$, $a = 2$ m/s², $t = 5$ s.
2. $v = v_0 + at = 0 + 2 \times 5 = 10$ m/s (36 km/jam).
3. $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = 0 + \frac{1}{2} \times 2 \times 25 = 25$ m.

Setelah 5 s, angkot melaju 10 m/s dan sudah menempuh 25 m.

KERJAKAN BERSAMA **KRL berhenti di stasiun**

KRL melaju 72 km/jam ketika mulai mengerem secara merata. KRL berhenti tepat di ujung peron setelah menempuh 200 m. Berapa perlambatannya, dan berapa lama pengereman berlangsung?

1. Ubah satuan: $v_0 = 72/3{,}6 = 20$ m/s, $v = 0$, $s = 200$ m. Waktu tidak diketahui, jadi pakai $v^2 = v_0^2 + 2as$.
2. $0 = 20^2 + 2a(200) \rightarrow a = -400/400 = -1$ m/s².
3. Waktu: $v = v_0 + at \rightarrow 0 = 20 - 1 \cdot t \rightarrow t = 20$ s.

Perlambatannya 1 m/s² (tanda negatif = melawan arah gerak), selama 20 s. Perlambatan kecil ini disengaja agar penumpang yang berdiri tidak terhuyung.

Jarak henti: mengapa ngebut itu berbahaya

Saat bahaya muncul, kendaraan tidak langsung direm. Otak butuh **waktu reaksi** t_r untuk melihat, memutuskan, dan menginjak rem. Selama itu kendaraan masih melaju tetap (GLB). Setelah rem bekerja, kendaraan melambat (GLBB) sampai berhenti. Dengan $v^2 = v_0^2 + 2as$ dan $v = 0$, jarak pengereman adalah $v_0^2/2a$.

RUMUS HIDUP

Jarak henti kendaraan

$$d = v\,t_r + \frac{v^2}{2\,a}$$

Jarak henti = jarak selama bereaksi (belum direm) + jarak pengereman. Bagian kedua tumbuh sebanding kuadrat kecepatan!

- v Kecepatan m/s
- t_r Waktu reaksi s
- a Perlambatan rem m/s²
- d Jarak henti m

JARAK HENTI

53,3

m

Selama bereaksi: **20** × **1** m. Saat mengerem: **20**² ÷ (2 × **6**) m. Total jarak henti **53,3** m. Coba gandakan kecepatannya dan lihat bagian rem menjadi empat kali lipat!

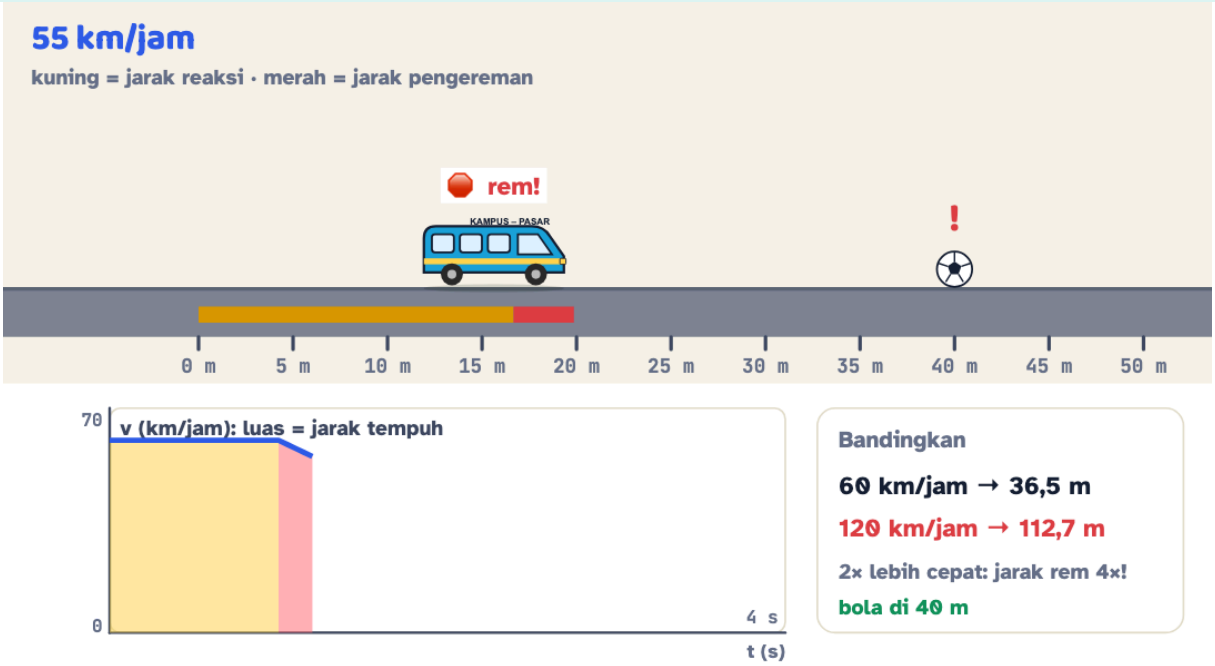
Satuan Nusantara: ≈ 51% dari panjang lapangan sepak bola · ≈ 40% dari tinggi Monas · ≈ 36 × tinggi Raka

Cek satuan: $(\mathrm{m/s})(\mathrm{s}) + \dfrac{(\mathrm{m/s})^2}{\mathrm{m/s^2}} = \mathrm{m}$

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

LAB MINI **Awas, ada bola menggelinding ke jalan!**

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



Jarak reaksi	Jarak pengereman	Jarak henti	Keadaan
16,7 m	3,2 m	19,9 m	Mengerem!

Atur kecepatan, waktu reaksi, kondisi jalan, dan jarak bola. Tekan **Jalankan**: bola muncul tepat saat $t = 0$. Bisakah mobil berhenti tepat waktu? Coba 40 km/jam lalu 80 km/jam dengan jarak yang sama. Perhatikan luas berwarna pada grafik v-t: itulah jarak tempuhnya!

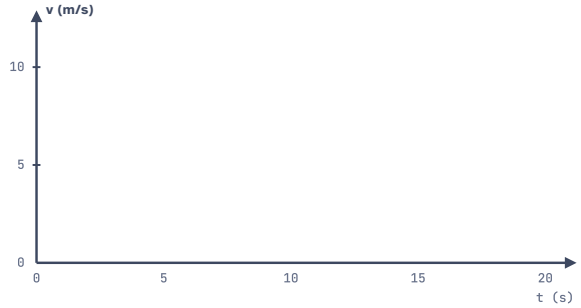
FISIKA INDONESIA: JAGA JARAK DI JALAN TOL

Di jalan tol Indonesia, batas kecepatan umumnya 60–100 km/jam. Pada 100 km/jam (±28 m/s) dengan waktu reaksi 1 s dan aspal kering, jarak hentinya sekitar $28 + 28^2/14 \approx 84$ m, hampir sepanjang lapangan sepak bola! Itulah sebabnya pengemudi dianjurkan menjaga jarak minimal "3 detik" di belakang kendaraan di depannya, dan lebih jauh lagi saat hujan.

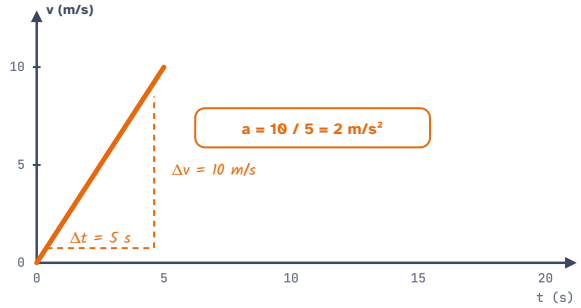
4.6 Membaca grafik: kemiringan dan luas

Grafik adalah "komik" sebuah gerak. Dua kunci untuk membacanya:

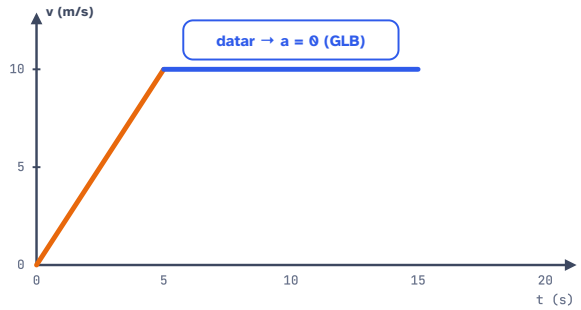
- **Kemiringan** grafik x-t = kecepatan. Kemiringan grafik v-t = percepatan.
- **Luas** di bawah grafik v-t = perpindahan. Luas di bawah grafik a-t = perubahan kecepatan.



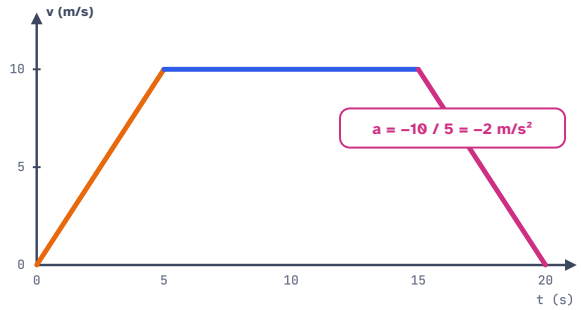
Langkah 1. Grafik v-t angkot dari satu halte ke halte berikutnya. Sumbu datar adalah waktu, sumbu tegak adalah kecepatan.



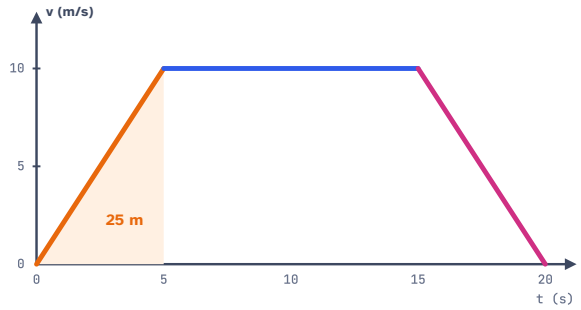
Langkah 2. Detik 0–5: kecepatan naik dari 0 ke 10 m/s. **Kemiringan** = $\Delta v/\Delta t$ = 2 m/s^2. Itulah percepatannya.



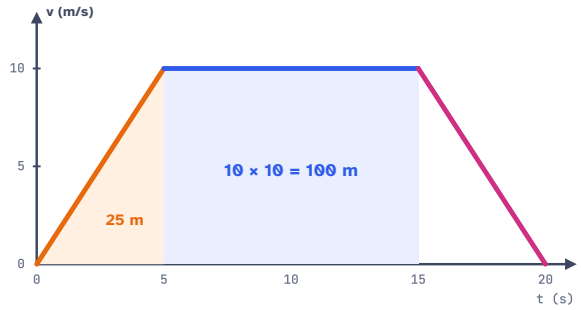
Langkah 3. Detik 5–15: garis datar. Kecepatan tetap 10 m/s, percepatan nol (GLB).



Langkah 4. Detik 15–20: garis turun. Kemiringannya −2 m/s^2: angkot mengerem.

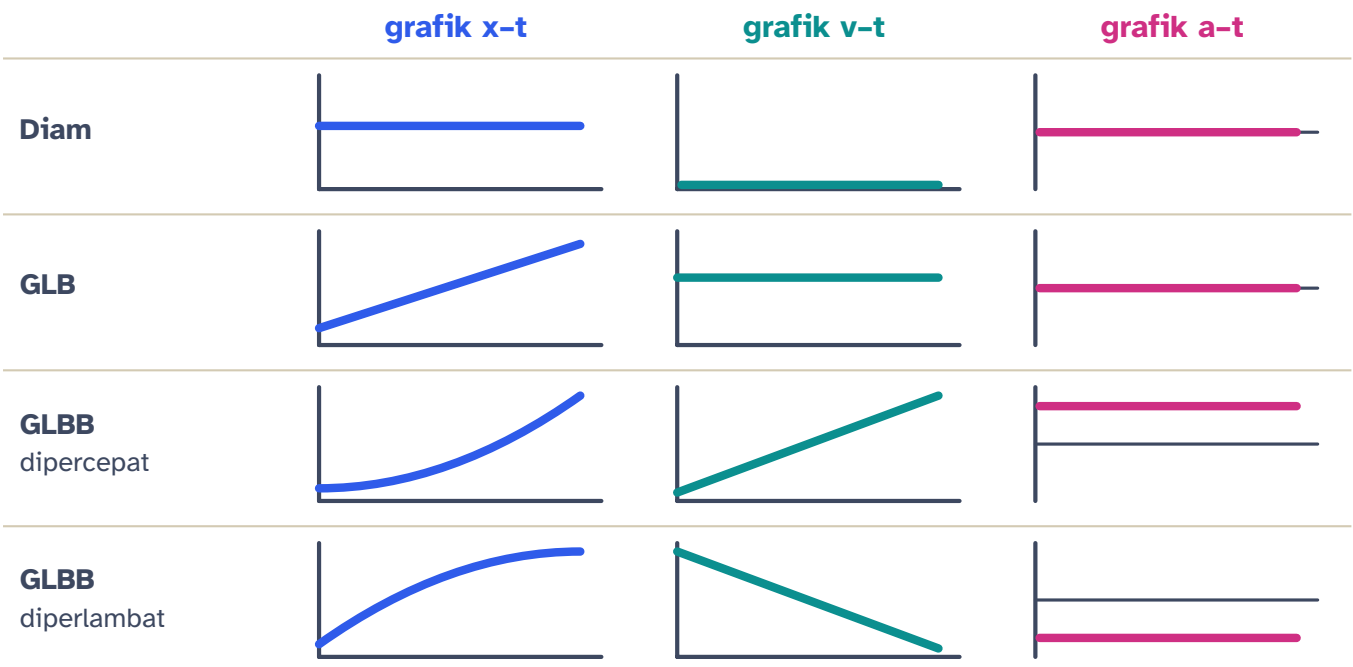


Langkah 5. Sekarang hitung **luas**. Segitiga pertama: $\frac{1}{2} \times 5 \times 10 = 25$ m. Luas ini adalah jarak yang ditempuh saat mempercepat.



Langkah 6. Persegi panjang: $10 \times 10 = 100$ m, yaitu jarak selama melaju tetap.

Langkah 7. Segitiga terakhir 25 m. Jumlahkan semuanya: jarak antarhalte = **150 m**. Grafik v-t menyimpan jarak di dalam luasnya!



Tabel bentuk grafik. Pada grafik x-t, GLBB tampak **melengkung** (parabola). Pada grafik v-t, GLBB tampak **lurus miring**. Pada grafik a-t, garis tipis mendatar di tengah menandai a = 0.

⚠️

AWAS JEBAKAN: GRAFIK BUKAN GAMBAR JALAN

Grafik x-t yang naik lalu turun **tidak** berarti benda mendaki lalu menuruni bukit. Artinya benda bergerak maju lalu berbalik arah, di jalan yang tetap lurus! Begitu pula, dua garis yang berpotongan pada grafik v-t **tidak** berarti dua kendaraan bertemu. Artinya kecepatan keduanya sama pada saat itu. Coba buktikan di Lab "Balapan grafik".

🚀

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KALKULUS: BAHASA ASLI GERAK

Kecepatan sesaat adalah turunan posisi, dan percepatan adalah turunan kecepatan:

$$v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \qquad a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}.$$

Sebaliknya, luas di bawah grafik adalah integral: $x = x_0 + \int_0^t v\,\mathrm{d}t$. Jika a tetap, $v = v_0 + at$ dan integralnya memberi $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$, tepat persamaan sakti kedua. Dengan kalkulus, kamu juga bisa menangani gerak yang percepatannya *tidak* tetap, misalnya $x = t^3 - 6t^2 + 9t$: kecepatannya $v = 3t^2 - 12t + 9$, yang bernilai nol pada $t = 1$ s dan $t = 3$ s (saat benda berbalik arah).

4.7 Gerak vertikal dan jatuh bebas

TAMU DARI MASA LALU

Selama hampir 2.000 tahun orang mengikuti Aristoteles: benda yang lebih berat jatuh lebih cepat. Galileo Galilei (1564–1642) membantahnya. Ia mengamati bola yang menggelinding di bidang miring (cara cerdik "memperlambat" jatuh agar bisa diukur) dan menemukan bahwa jarak tempuh sebanding dengan kuadrat waktu. Kisah Galileo menjatuhkan bola dari Menara Pisa kemungkinan besar hanya legenda, tetapi kesimpulannya terbukti benar. Pada 1971, astronaut Apollo 15, David Scott, menjatuhkan palu dan bulu elang di Bulan yang tanpa udara. Keduanya mendarat **bersamaan**.

Tanpa hambatan udara, semua benda di dekat permukaan Bumi jatuh dengan percepatan yang sama, yaitu **percepatan gravitasi** $g \approx 9{,}8$ m/s² (sering dibulatkan 10 m/s²). Gerak ini disebut **jatuh bebas**, yaitu GLBB dengan $v_0 = 0$ dan $a = g$:

$$h = \tfrac{1}{2}gt^2, \qquad v = gt, \qquad v = \sqrt{2gh}$$

RUMUS HIDUP **Kecepatan jatuh bebas**

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

Makin tinggi tempat jatuhnya, makin cepat benda tiba di bawah. Tetapi tidak sebanding: 4× lebih tinggi hanya 2× lebih cepat.

h Ketinggian m | g Percepatan gravitasi m/s² | v Kecepatan saat tiba m/s

KECEPATAN SAAT TIBA
19,8
m/s

Dijatuhkan dari **20** m dengan g = **9,8** m/s², benda tiba dengan kecepatan **19,8** m/s (hambatan udara diabaikan).

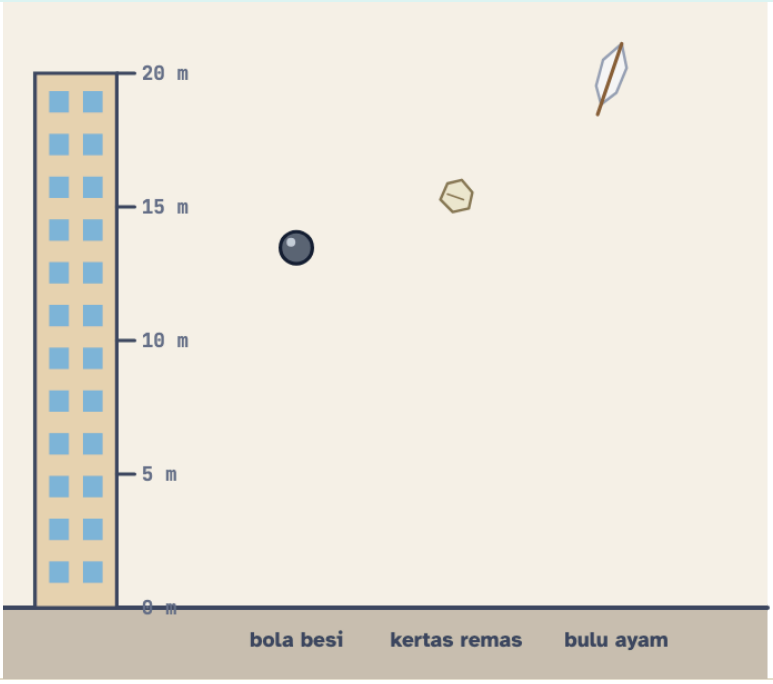
Satuan Nusantara: ≈ 1,8 × ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 20% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 14 × jalan kaki santai

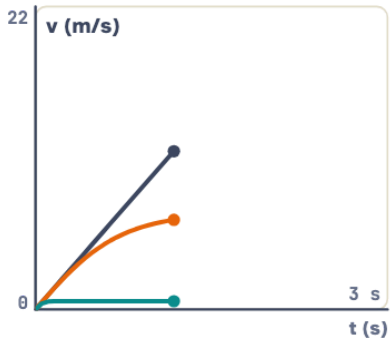
Cek satuan: $\sqrt{(\mathrm{m/s^2})(\mathrm{m})} = \sqrt{\mathrm{m^2/s^2}} = \mathrm{m/s}$

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

LAB MINI **Bola besi, kertas, dan bulu: siapa duluan?**

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





Tanpa udara, teorinya:
t = √(2h/g) = 2,02 s
v = √(2gh) = 19,8 m/s

hambatan udara aktif

Waktu	v bola besi	v kertas	v bulu
1,2 s	11,7 m/s	6,5 m/s	0,6 m/s

Jalankan dulu di Bumi dengan udara. Lalu pilih **tabung hampa udara** dan jalankan lagi. Nyalakan **foto stroboskop**: jarak antarbayangan bertambah dengan pola 1 : 3 : 5 : 7. Terakhir, pergi ke Bulan!

Untuk benda yang **dilempar ke atas**, ambil arah atas sebagai positif. Percepatannya $-g$ sepanjang waktu, baik saat naik, di puncak, maupun saat turun:

$$v = v_0 - gt, \qquad h = v_0 t - \tfrac{1}{2} g t^2, \qquad v^2 = v_0^2 - 2gh$$

Di puncak, $v = 0$. Dari sini kita mendapat waktu naik $t_{\text{naik}} = v_0/g$ dan tinggi maksimum $h_{\text{maks}} = v_0^2/(2g)$. Gerak turunnya simetris: waktu turun sama dengan waktu naik, dan bola kembali ke tanganmu dengan kelajuan yang sama dengan saat dilempar.

Tebak Dulu!

Raka melempar bola lurus ke atas. Tepat di titik tertinggi, bola berhenti sesaat. Berapa percepatan bola pada saat itu?

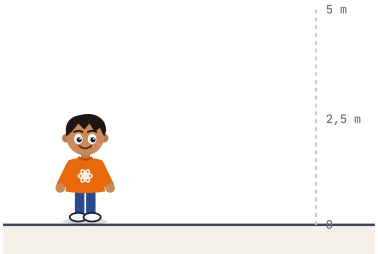
Nol, karena bola sedang diam.

9,8 m/s^2 ke atas, karena bola baru saja naik.

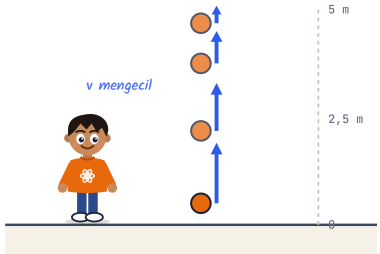
9,8 m/s^2 ke bawah, sama seperti saat naik dan turun.

Berubah-ubah, dari ke atas menjadi ke bawah.

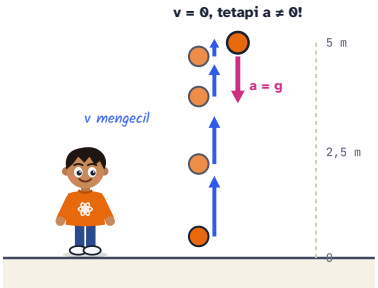
Jawabannya: 9,8 m/s^2 ke bawah. Kecepatan bola memang nol sesaat, tetapi kecepatannya sedang *berubah*: sedetik sebelumnya +9,8 m/s, sedetik kemudian −9,8 m/s. Perubahan kecepatan berarti ada percepatan. Gravitasi tidak pernah "libur" di puncak. Seandainya percepatannya nol di puncak, bola akan melayang diam di sana selamanya!



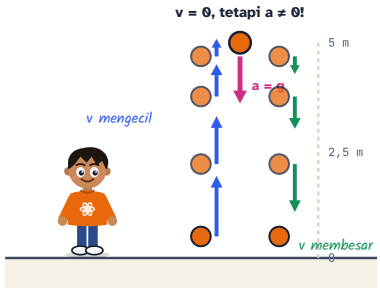
Langkah 1. Raka melempar bola lurus ke atas dengan kecepatan 10 m/s. Kita pakai $g = 10$ m/s².



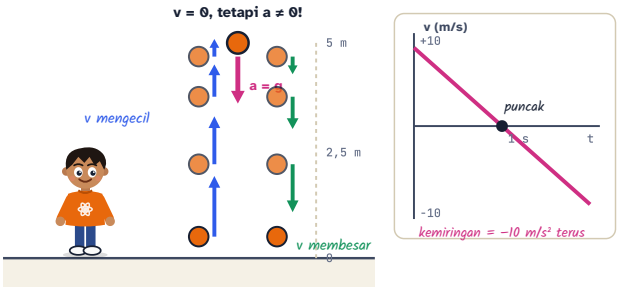
Langkah 2. Saat naik, setiap 0,25 s kecepatan berkurang 2,5 m/s: 10 → 7,5 → 5 → 2,5 m/s. Panah biru makin pendek.



Langkah 3. Setelah 1 s, bola mencapai puncak setinggi $h = 10^2/(2 \cdot 10) = 5$ m. Kecepatannya nol, **tetapi percepatannya tetap g ke bawah**.



Langkah 4. Saat turun, kecepatan bertambah 2,5 m/s setiap 0,25 s, dan bola tiba di tangan lagi dengan 10 m/s. Gerak turun adalah cermin gerak naik.



Langkah 5. Grafik v-t-nya hanya satu garis lurus dari +10 ke −10 m/s. Kemiringannya selalu −10 m/s², termasuk tepat di puncak.

MITOS

"Benda yang lebih berat selalu jatuh lebih cepat."

FAKTA

Tanpa udara, semua benda jatuh dengan percepatan g yang sama. Bulu jatuh pelan karena hambatan udara jauh lebih berpengaruh padanya, bukan semata karena ringan. Di tabung hampa, bulu dan koin jatuh bersamaan.

MITOS

"Di puncak lemparan, bola tidak punya percepatan."

FAKTA

Di puncak, $v = 0$ sesaat, tetapi $a = g$ ke bawah. Gravitasi tetap bekerja. Tanpa percepatan itu, bola tidak akan pernah turun lagi.

COBA SENDIRI **Batu di sumur tua**

Raka menjatuhkan batu ke sumur tua dan mendengar bunyi "plung" 2,0 s kemudian. Perkirakan kedalaman permukaan air sumur ($g = 9{,}8$ m/s²). Apakah perkiraanmu terlalu besar atau terlalu kecil?

1. Model sederhana: abaikan hambatan udara dan waktu tempuh bunyi. Batu jatuh bebas selama 2,0 s.
2. $h = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 9{,}8 \times 2{,}0^2 = 19{,}6$ m.
3. Kecepatan batu saat menyentuh air: $v = gt = 19{,}6$ m/s, sekitar 70 km/jam.
4. Cek model: bunyi butuh waktu $19{,}6/340 \approx 0{,}06$ s untuk naik. Jadi batu sebenarnya jatuh sedikit kurang dari 2,0 s.

Kedalaman ≈ 19,6 m. Perkiraan ini sedikit terlalu besar, karena sebagian dari 2,0 s itu dipakai bunyi untuk merambat naik. Dengan koreksi bunyi, hasilnya sekitar 18,5 m.

4.8 Kecepatan relatif: dua motor berpapasan

Kamu duduk diam di KRL yang melaju 20 m/s. Bagi kamu, tiang di luar jendela bergerak mundur 20 m/s. Kecepatan selalu diukur **relatif terhadap sesuatu**. Kecepatan benda A dilihat dari B adalah:

$$v_{AB} = v_A - v_B$$

- **Searah:** kelajuan relatifnya adalah *selisih*. Motor 60 km/jam menyusul angkot 45 km/jam; dari angkot, motor terlihat mendekat 15 km/jam.

- **Berlawanan arah:** kelajuan relatifnya adalah *jumlah*. Dua motor berpapasan dengan 40 km/jam dan 50 km/jam saling mendekat 90 km/jam.

KERJAKAN BERSAMA **Kapan mereka bertemu?**

Raka bermotor dari Bogor ke arah Depok dengan 40 km/jam. Pada saat yang sama, Kak Nara bermotor dari Depok ke arah Bogor dengan 50 km/jam di jalan yang sama. Anggap jarak awal mereka 30 km. Setelah berapa menit mereka berpapasan, dan di mana?

1. Lihat dari kacamata Raka: Kak Nara mendekat dengan $40 + 50 = 90$ km/jam, dan jarak yang harus "ditutup" 30 km.
2. $t = 30/90 = \frac{1}{3}$ jam = 20 menit.
3. Saat itu Raka sudah menempuh $40 \times \frac{1}{3} \approx 13{,}3$ km dari titik awalnya.

Mereka berpapasan setelah 20 menit, sekitar 13,3 km dari titik awal Raka. Kecepatan relatif mengubah soal dua benda menjadi soal satu benda.

FAKTA UNIK DARI TARSI

Saat kamu duduk "diam" membaca bab ini, kamu bergerak bersama Bumi mengelilingi Matahari dengan kelajuan sekitar 30 km/s, lebih dari 100.000 km/jam! Kamu tidak merasakannya karena semua benda di sekitarmu ikut bergerak bersamamu. Relatif terhadap mejamu, kamu diam.

LANJUT · OLIMPIADE

PINDAH KERANGKA ACUAN

Soal kejar-kejaran menjadi sangat mudah jika kamu "menumpang" pada salah satu benda. Di kerangka benda B, benda A punya posisi relatif $x_A - x_B$, kecepatan relatif $v_A - v_B$, dan percepatan relatif $a_A - a_B$. Contoh: ojek mulai dari diam dengan $a = 3$ m/s² mengejar angkot yang melaju tetap 10 m/s dari titik yang sama. Di kerangka angkot, ojek mula-mula bergerak *mundur* 10 m/s dengan percepatan 3 m/s² ke depan, persis seperti bola yang dilempar ke atas! Ojek "jatuh kembali" ke angkot setelah $t = 2 \times 10/3 \approx 6{,}7$ s, dan jarak terjauhnya $10^2/(2 \cdot 3) \approx 16{,}7$ m terjadi saat kecepatan keduanya sama.

Spidometer & odometer

Spidometer menunjukkan kelajuan sesaat. Odometer menjumlahkan jarak, bukan perpindahan, sehingga angkanya tidak pernah berkurang.

Ojek online & peta digital

GPS mencatat posisimu setiap detik. Aplikasi menghitung kecepatan dari perubahan posisi, lalu memperkirakan waktu tiba.

Lampu kuning

Durasi lampu kuning dirancang dengan mempertimbangkan jarak henti, agar pengemudi sempat berhenti dengan aman atau lewat sebelum lampu merah.

Percepatan yang nyaman

KRL dan kereta cepat sengaja berakselerasi pelan (sekitar 1 m/s^2 atau kurang) supaya penumpang yang berdiri tidak terhuyung.

Cek Cepat

Grafik v-t sebuah sepeda berupa garis lurus yang naik dari 0 ke 12 m/s dalam 4 s. Jarak yang ditempuh dalam 4 s itu adalah...

- 48 m
- 3 m
- 12 m
- 24 m

Bola dilempar lurus ke atas. Di titik tertinggi...

- $v = 0$ dan $a = g$ ke bawah
- $v = 0$ dan $a = 0$
- v maksimum dan $a = 0$
- $v = g$ dan $a = 0$

Motor A (60 km/jam) membuntuti angkot B (45 km/jam) di jalan lurus. Menurut sopir angkot, motor A mendekat dengan kelajuan...

- 105 km/jam
- 60 km/jam
- 15 km/jam
- 0 km/jam

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. A · 3. C

Tantangan Rumah: ukur waktu reaksimu dengan penggaris

Bahan: penggaris 30 cm, seorang teman, alat tulis

1. Temanmu memegang ujung atas penggaris secara tegak. Letakkan ibu jari dan telunjukmu terbuka di dekat angka 0 cm, tanpa menyentuh penggaris.
2. Tanpa aba-aba, temanmu melepaskan penggaris. Tangkap secepat mungkin, lalu catat angka di tempat jarimu menjepit (d, dalam meter).
3. Ulangi 5 kali dan hitung rata-ratanya. Hitung waktu reaksimu dengan $t = \sqrt{2d/g}$. Contoh: 5 cm → 0,10 s; 10 cm → 0,14 s; 20 cm → 0,20 s.
4. Ulangi sambil temanmu mengajakmu mengobrol atau sambil kamu menghitung mundur dari 100 dikurangi 7.

Pertanyaan: Berapa waktu reaksimu saat fokus dan saat terganggu? Gunakan Rumus Hidup "Jarak henti" untuk menghitung tambahan jarak henti motor pada 54 km/jam akibat gangguan itu. Apa artinya bagi pengendara yang memegang HP?

⚡ RINGKASAN KILAT **Bab 4 dalam 3 menit**

✅ Kamu sekarang bisa...

- membedakan **jarak** dan **perpindahan**, **kelajuan** dan **kecepatan**, serta kecepatan dan **percepatan**
- memakai persamaan GLB dan tiga persamaan "sakti" GLBB, termasuk menghitung **jarak henti** kendaraan
- membaca grafik x-t dan v-t: **kemiringan** = laju perubahan, **luas** = perpindahan
- menghitung gerak jatuh bebas dan gerak vertikal ke atas
- memakai **kecepatan relatif** untuk kendaraan yang berpapasan atau saling menyusul

🔑 Istilah kunci

bergerak · Jarak · Perpindahan · kelajuan sesaat · percepatan · perlambatan · Gerak lurus beraturan (GLB) · Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) · percepatan gravitasi · jatuh bebas

🧮 Rumus penting

$$v = v_0 + a\,t$$

Kecepatan pada GLBB. Kecepatan akhir = kecepatan awal + (tambahan kecepatan setiap detik × lamanya).

$$s = v_0\,t + \tfrac{1}{2}\,a\,t^2$$

Perpindahan pada GLBB. Jarak = bagian 'seandainya tetap secepat awal' + bonus dari percepatan, yang tumbuh sebanding dengan kuadrat waktu.

$$d = v\,t_r + \frac{v^2}{2\,a}$$

Jarak henti kendaraan. Jarak henti = jarak selama bereaksi (belum direm) + jarak pengereman. Bagian kedua tumbuh sebanding kuadrat kecepatan!

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

Kecepatan jatuh bebas. Makin tinggi tempat jatuhnya, makin cepat benda tiba di bawah. Tetapi tidak sebanding: 4× lebih tinggi hanya 2× lebih cepat.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Kak Nara naik motor ke pasar yang berjarak 12 km dengan kelajuan 60 km/jam, lalu pulang dengan 40 km/jam.
- Tanda negatif pada percepatan tidak selalu berarti melambat.
- Grafik x-t yang naik lalu turun tidak berarti benda mendaki lalu menuruni bukit.

⛰️ 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=4

Teka-teki untuk Bab 5

Sari duduk di kereta yang melaju tetap 100 km/jam di rel lurus. Ia melempar koin lurus ke atas, dan koin jatuh kembali tepat ke telapak tangannya, bukan ke belakang. Tetapi Raka yang berdiri di peron melihat koin itu bergerak dengan lintasan yang sama sekali tidak lurus. Bentuk lintasan apa yang dilihat Raka, dan mengapa?

▼ Intip petunjuk

Dari peron, koin punya dua gerak sekaligus: mendatar bersama kereta (GLB, 100 km/jam) dan naik-turun karena gravitasi (GLBB). Gabungan keduanya membentuk lengkungan istimewa bernama **parabola**. Itulah tema Bab 5!

BAB 5 · GERAK & GAYA

05 Gerak Parabola: Seni Melempar Sandal ke Mangga

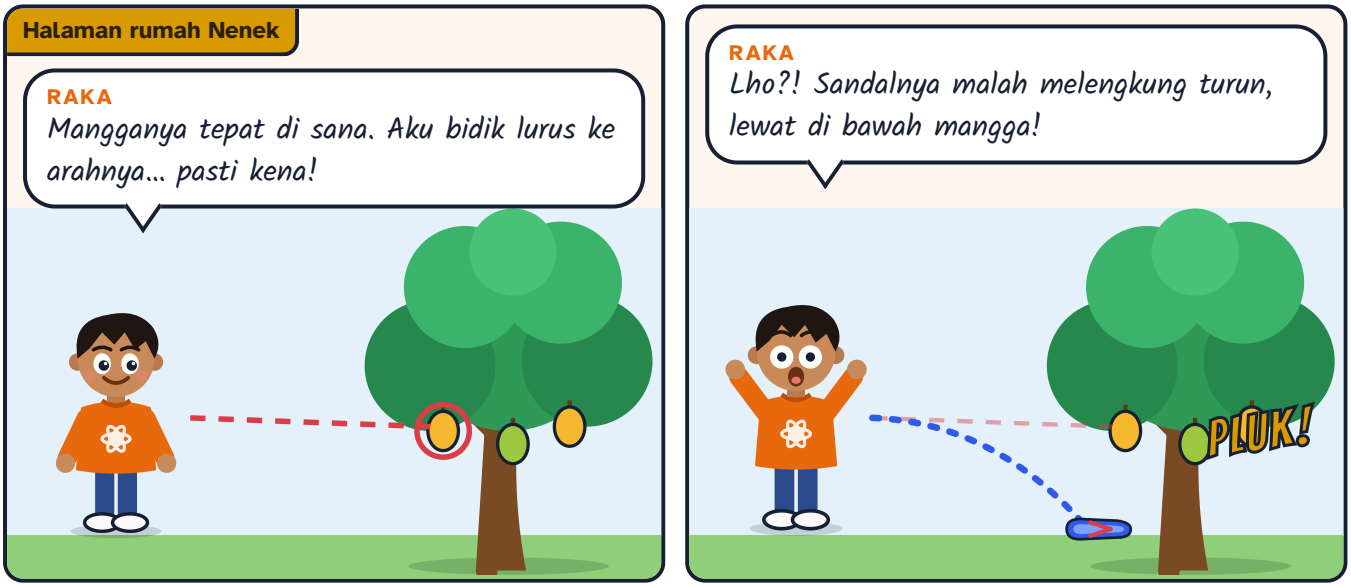
Mengapa sandal yang kamu bidik lurus ke mangga malah lewat di bawahnya? Mengapa perahu yang menyeberang sungai selalu hanyut? Rahasianya: dua gerak yang berjalan bersamaan tanpa saling mengganggu.

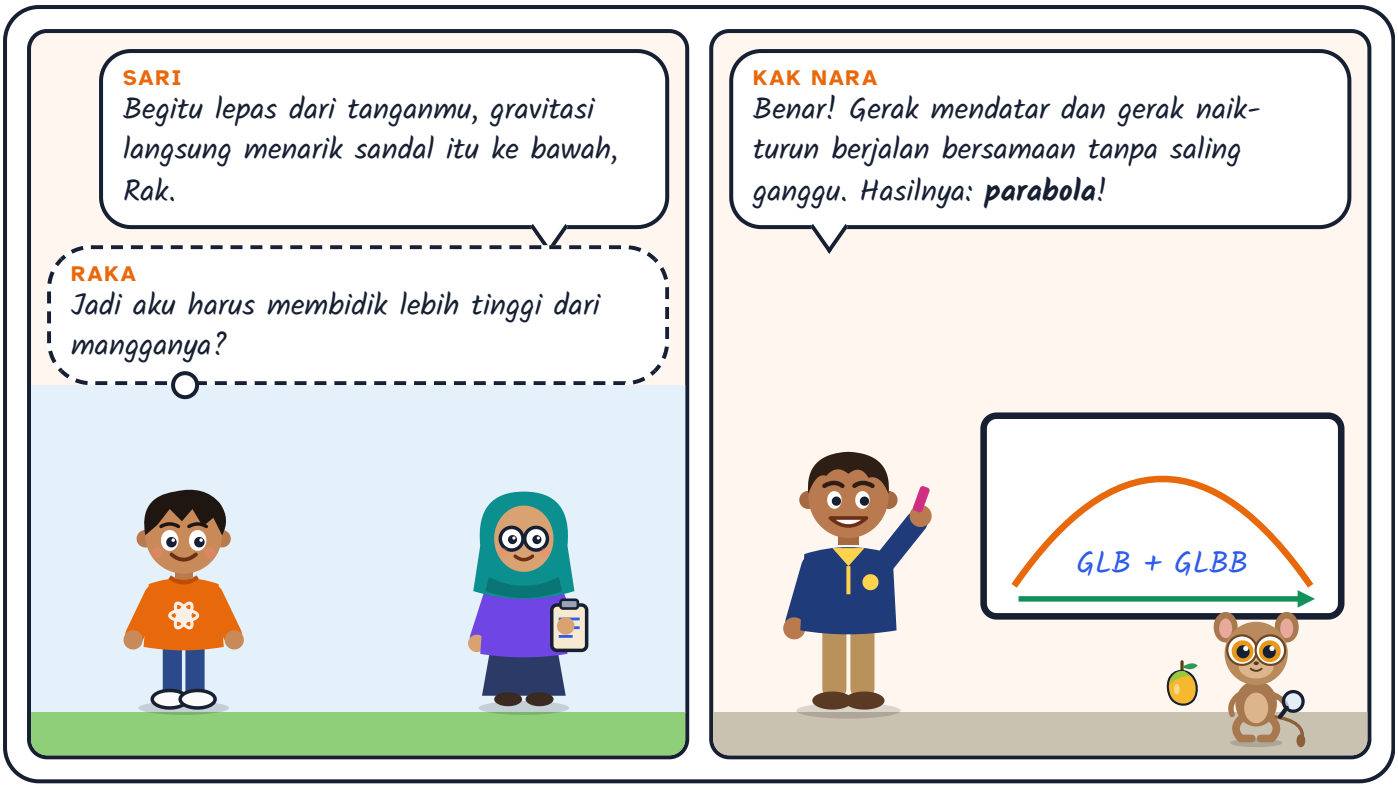
Setelah bab ini, kamu bisa

- menguraikan gerak parabola menjadi **GLB mendatar** dan **GLBB vertikal** yang saling bebas;
- menghitung **waktu terbang**, **tinggi maksimum**, dan **jangkauan**, serta menjelaskan istimewanya sudut 45°;
- menganalisis benda yang dilempar mendatar dari ketinggian;
- menjelaskan pengaruh hambatan udara pada lintasan bola dan kok bulu tangkis;
- menjumlahkan vektor kecepatan untuk perahu yang menyeberang sungai dan hujan yang tampak miring.

SANDAL VS MANGGA

KOMIK · 4 PANEL





5.1 Dua gerak sekaligus

Tebak Dulu!

Dua kelereng berada di tepi meja. Kelereng A dijatuhkan lurus ke bawah. Pada saat yang sama, kelereng B disentil mendatar dengan cepat. Mana yang menyentuh lantai lebih dulu? (Abaikan hambatan udara.)

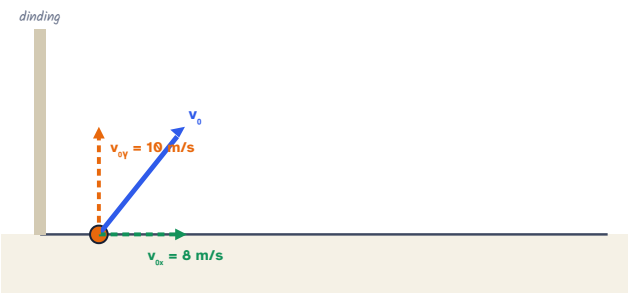
- Kelereng A, karena lintasannya lebih pendek.
- Kelereng B, karena geraknya lebih cepat.
- Keduanya bersamaan.
- Tergantung seberapa keras B disentil.

Jawabannya: bersamaan! Kecepatan mendatar B tidak memengaruhi gerak naik-turunnya. Kedua kelereng mulai dengan kecepatan vertikal nol dan ditarik gravitasi dengan percepatan yang sama, jadi keduanya jatuh setinggi meja dalam waktu yang sama. B hanya mendarat lebih jauh. Coba buktikan sendiri dengan dua koin dan penggaris!

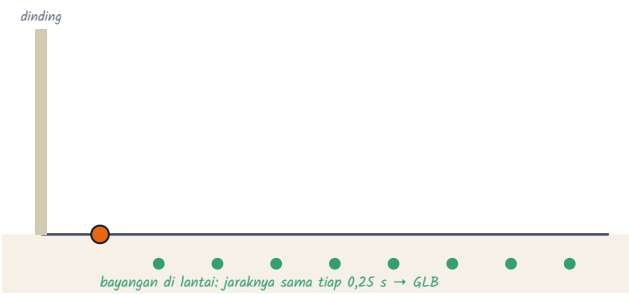
Gerak sandal, bola tendangan, atau air dari selang disebut **gerak parabola** (gerak peluru). Kuncinya satu kalimat: gerak mendatar dan gerak vertikal berlangsung bersamaan, tetapi saling bebas.

- **Arah mendatar (sumbu x):** tidak ada gaya mendatar (jika hambatan udara diabaikan), jadi geraknya **GLB**. Kecepatan mendatar tetap.
- **Arah vertikal (sumbu y):** gravitasi menarik ke bawah, jadi geraknya **GLBB** dengan $a = -g$, persis seperti bola yang dilempar ke atas di Bab 4.

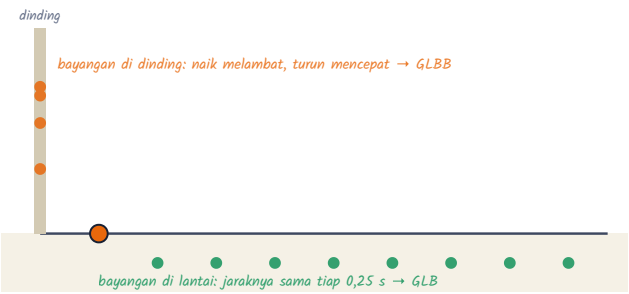
Bahasa sederhana · Gampangnya: bayangkan dua bayangan bola. Bayangan di lantai bergerak rata seperti mobil di jalan tol. Bayangan di dinding naik lalu turun seperti bola yang dilempar ke atas. Bola aslinya melakukan dua-duanya sekaligus, sehingga lintasannya melengkung.



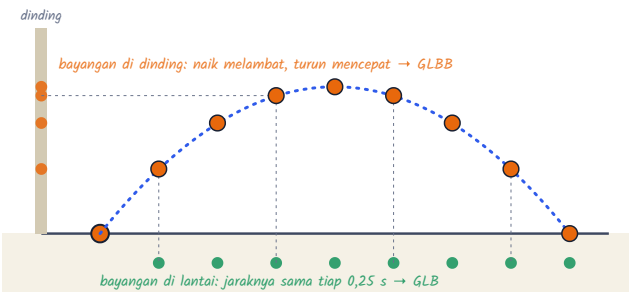
Langkah 1. Bola ditendang dengan kecepatan awal v_0. Uraikan menjadi komponen mendatar $v_{0x} = 8$ m/s dan komponen tegak $v_{0y} = 10$ m/s (pakai $g = 10$ m/s²).



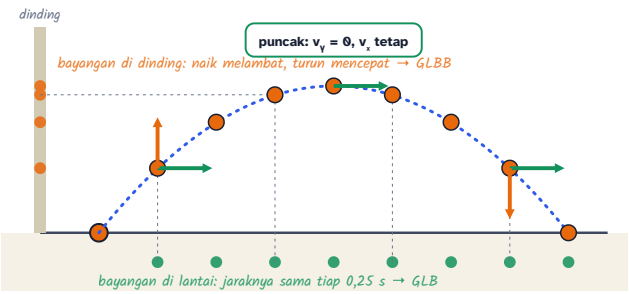
Langkah 2. Lihat bayangan bola di lantai (seperti disinari lampu dari atas). Setiap 0,25 s bayangan bergeser 2 m: **GLB** dengan 8 m/s.



Langkah 3. Lihat bayangan bola di dinding. Ia naik makin lambat, berhenti di 5 m, lalu turun makin cepat: **GLBB** persis seperti Bab 4.



Langkah 4. Gabungkan keduanya! Setiap posisi bola adalah perpaduan posisi kedua bayangan pada saat yang sama. Hasilnya lengkungan **parabola** sejauh 16 m.



Langkah 5. Panah hijau (v_x) selalu sama panjang. Panah oranye (v_y) memendek, hilang di puncak, lalu memanjang ke bawah. Di puncak, bola **tidak** diam: ia masih melaju 8 m/s ke samping.

Jika bola dilempar dengan kelajuan v_0 pada sudut θ terhadap tanah, komponen awalnya adalah $v_{0x} = v_0 \cos\theta$ dan $v_{0y} = v_0 \sin\theta$. Setelah waktu t:

	Mendatar (GLB)	Vertikal (GLBB, $a = -g$)
Kecepatan	$v_x = v_0 \cos\theta$ (tetap)	$v_y = v_0 \sin\theta - gt$
Posisi	$x = v_0 \cos\theta \, t$	$y = v_0 \sin\theta \, t - \frac{1}{2}gt^2$
Kecepatan total	$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, arahnya $\tan\alpha = v_y / v_x$	

TAMU DARI MASA LALU

Pada abad pertengahan, banyak orang menggambar lintasan peluru meriam sebagai garis lurus miring, lalu melengkung sedikit, lalu jatuh tegak lurus. Niccolò Tartaglia (1537) sudah menduga bahwa sudut 45° memberi tembakan terjauh, tetapi belum bisa membuktikannya. Galileo Galilei dalam bukunya *Dua Ilmu Baru* (1638) akhirnya menunjukkan bahwa gabungan gerak mendatar yang tetap dan gerak jatuh yang dipercepat menghasilkan **parabola**. Sudut 45° pun terbukti dengan matematika.

5.2 Waktu terbang, tinggi maksimum, dan jangkauan

Semua rumus penting gerak parabola di tanah datar lahir dari satu fakta: **di puncak,** $v_y = 0$.

1. **Waktu naik:** $0 = v_0 \sin\theta - g\,t_{\text{naik}}$ → $t_{\text{naik}} = \dfrac{v_0 \sin\theta}{g}$. Waktu terbang total (kembali ke ketinggian awal) dua kali lipatnya: $T = \dfrac{2v_0 \sin\theta}{g}$.
2. **Tinggi maksimum:** dari $v_y^2 = v_{0y}^2 - 2gH$ dengan $v_y = 0$: $H = \dfrac{v_0^2 \sin^2\theta}{2g}$.
3. **Jangkauan:** $R = v_{0x}\,T = v_0 \cos\theta \cdot \dfrac{2v_0 \sin\theta}{g}$. Karena $2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$, maka $R = \dfrac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$.

RUMUS HIDUP

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° − θ memberi jangkauan yang sama.

v_0 Kecepatan awal m/s | θ Sudut lempar ° | R Jangkauan m

JANGKAUAN

19,9

m

Dilempar **15** m/s pada sudut **30**° di tanah datar → mendarat **19,9** m dari titik lempar. Coba ganti sudutnya dengan pasangannya: 90° − **30**°.

Satuan Nusantara: ≈ 19% dari panjang lapangan sepak bola · ≈ 15% dari tinggi Monas · ≈ 13 × tinggi Raka

Cek satuan: $\frac{(\mathrm{m/s})^2}{\mathrm{m/s^2}} = \mathrm{m}$, sedangkan $\sin 2\theta$ tidak bersatuan.

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

RUMUS HIDUP

Tinggi maksimum

$$H = \frac{{v_0}^2 \sin^2 \theta}{2g}$$

Hanya komponen tegak yang mengangkat bola. Makin curam sudutnya, makin tinggi puncaknya.

v_0 Kecepatan awal m/s

θ Sudut lempar °

H Tinggi maksimum m

TINGGI MAKSIMUM

8,6

m

Dengan **15** m/s pada **60**°, bola mencapai puncak setinggi **8,6** m di atas titik lempar.

Satuan Nusantara: ≈ 5,7 × tinggi Raka · ≈ 8% dari panjang lapangan sepak bola · ≈ 7% dari tinggi Monas

Cek satuan: $\frac{(\mathrm{m/s})^2}{\mathrm{m/s^2}} = \mathrm{m}$

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

Tebak Dulu!

Raka membidik lurus ke arah mangga di dahan. Tepat saat sandal lepas dari tangannya, Tarsi menggoyang dahan sehingga mangga itu juga lepas dan jatuh bebas. Apakah sandal mengenai mangga? (Abaikan hambatan udara.)

Tidak, sandal lewat di atas mangga karena mangganya sudah jatuh.

Tidak, sandal tetap lewat di bawah mangga.

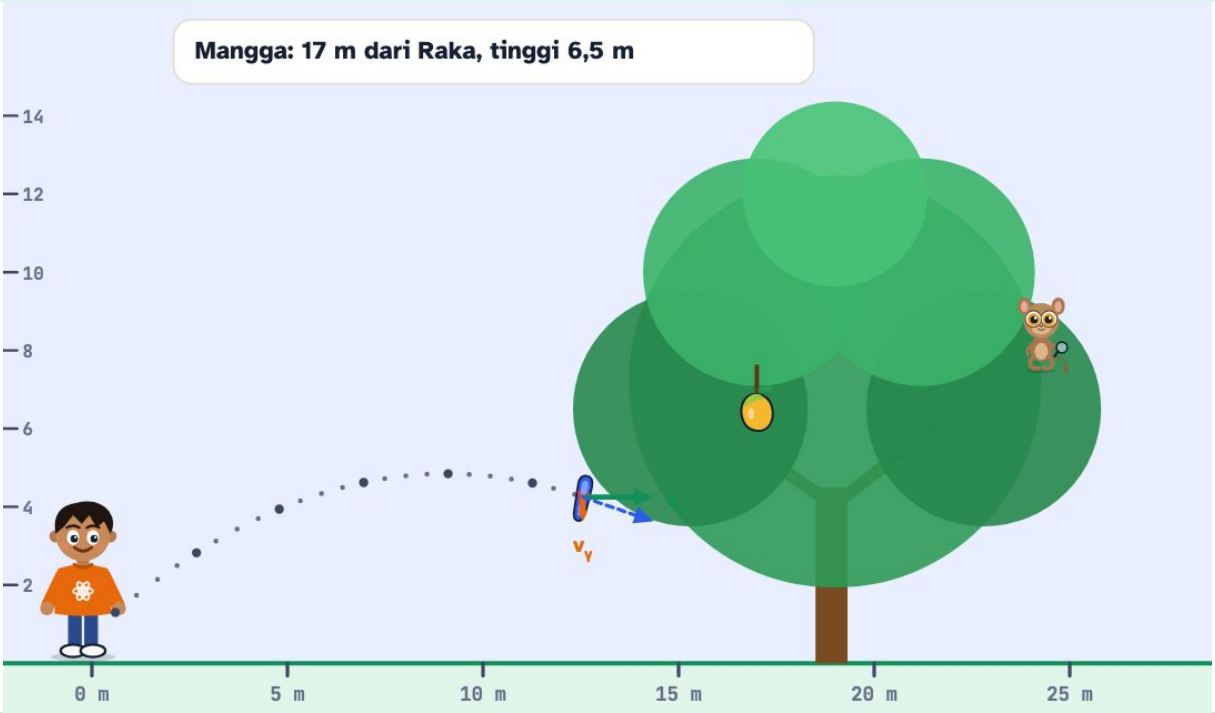
Ya, kena! Asalkan sandal sampai sebelum mangga menyentuh tanah.

Hanya kena jika sudut lemparnya tepat 45°.

Jawabannya: kena! Tanpa gravitasi, sandal akan melaju lurus tepat ke mangga. Gravitasi membuat sandal tertinggal $\frac{1}{2}gt^2$ di bawah garis bidikan. Tetapi mangga yang jatuh bebas juga turun $\frac{1}{2}gt^2$ dalam waktu yang sama. Keduanya "jatuh bersama", sehingga tetap bertemu! Ini versi Indonesia dari teka-teki klasik "monyet dan pemburu". Uji sendiri di Lab Mini di bawah dengan menyalakan pilihan *Tarsi menjatuhkan mangga*.

LAB MINI Gim: lempar sandal, jatuhkan mangga!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-5



Waktu	Jarak mendatar	Tinggi	Skor
1,2 s	12,6 m	4,2 m	0 kena / 1 lempar

Atur kecepatan dan sudut, lalu tekan **Jalankan** untuk melempar. Kamu juga bisa **menyeret dari tangan Raka** untuk membidik. Kalau meleset, baca petunjuknya: sandal lewat di atas atau di bawah mangga? Tantangan: nyalakan "Tarsi menjatuhkan mangga", bidik *lurus* ke mangga, lalu lempar dengan cepat. Apa yang terjadi?

CONTOH Tendangan dari tanah

Bola ditendang dengan kecepatan 20 m/s pada sudut 30° terhadap tanah datar. Gunakan $g = 10$ m/s². Hitung waktu terbang, tinggi maksimum, dan jangkauannya.

1. Komponen: $v_{0x} = 20\cos 30^\circ \approx 17{,}3$ m/s dan $v_{0y} = 20\sin 30^\circ = 10$ m/s.
2. Waktu terbang: $T = 2v_{0y}/g = 2(10)/10 = 2$ s.
3. Tinggi maksimum: $H = v_{0y}^2/(2g) = 100/20 = 5$ m.
4. Jangkauan: $R = v_{0x}T = 17{,}3 \times 2 \approx 34{,}6$ m. Cek dengan rumus: $400\sin 60^\circ/10 \approx 34{,}6$ m. ✓

Bola terbang 2 s, naik sampai 5 m, dan mendarat ±34,6 m dari titik tendang.

KERJAKAN BERSAMA **Tendangan bebas: lewat pagar betis, masuk gawang?**

Di sebuah stadion, bola tendangan bebas melesat 15 m/s pada sudut 53° ($\sin 53^\circ \approx 0{,}8$, $\cos 53^\circ \approx 0{,}6$, $g = 10$ m/s²). Pagar betis setinggi 1,8 m berdiri 9 m dari bola, dan garis gawang 18 m dari bola. Tinggi mistar gawang 2,44 m. Apakah bola melewati pagar betis? Apakah bola masuk gawang?

1. Komponen: $v_x = 15(0{,}6) = 9$ m/s dan $v_{0y} = 15(0{,}8) = 12$ m/s.
2. Di pagar betis ($x = 9$ m): $t = 9/9 = 1$ s, sehingga $y = 12(1) - 5(1)^2 = 7$ m. Jauh di atas 1,8 m. ✓
3. Di garis gawang ($x = 18$ m): $t = 18/9 = 2$ s, sehingga $y = 12(2) - 5(2)^2 = 4$ m.
4. 4 m lebih tinggi daripada mistar 2,44 m.

Bola melewati pagar betis dengan mudah, tetapi melambung di atas mistar. Penendang harus memakai sudut lebih landai atau tendangan lebih pelan. Coba cari kombinasinya dengan Rumus Hidup di atas!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERSAMAAN LINTASAN DAN PARABOLA DI LERENG

Hilangkan t dari persamaan posisi ($t = x/v_0 \cos\theta$), maka didapat **persamaan lintasan**:

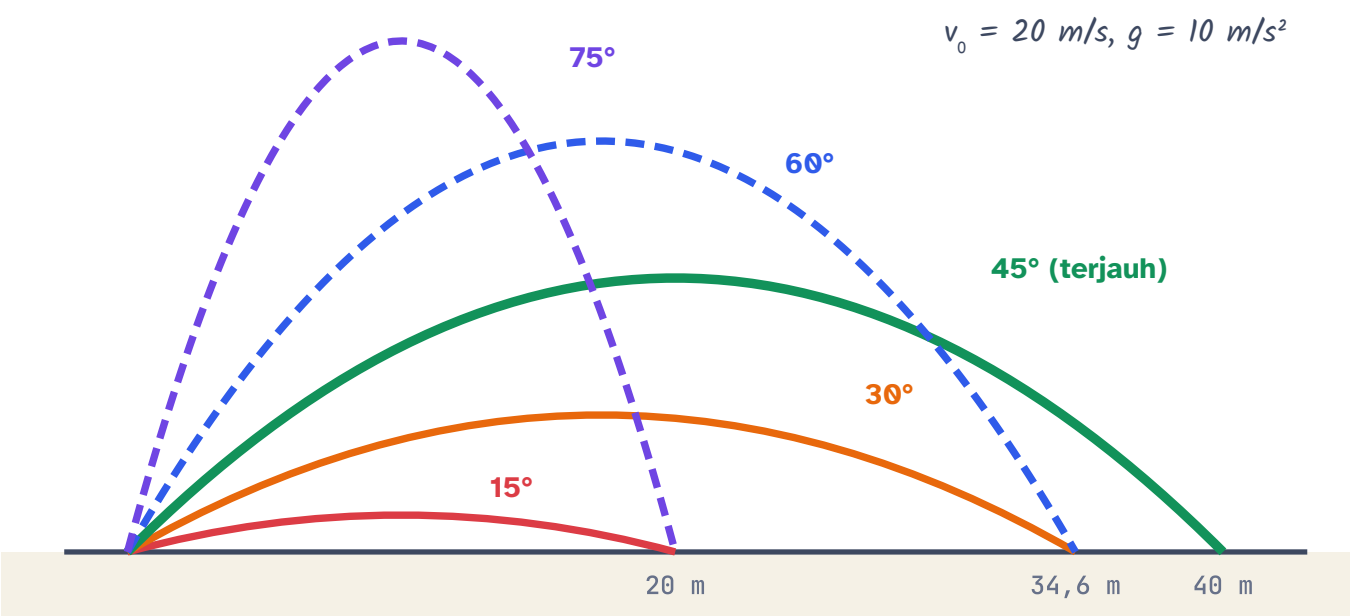
$$y = x \tan\theta - \frac{g\,x^2}{2v_0^2 \cos^2\theta}.$$

Ini fungsi kuadrat dalam x, bukti matematis bahwa lintasannya parabola. Persamaan ini juga menjawab soal "sudut berapa agar bola melewati titik (x, y)?". Jika bola ditembakkan ke atas lereng bersudut α, jangkauan sepanjang lereng adalah $R = \dfrac{2v_0^2 \cos\theta\, \sin(\theta - \alpha)}{g \cos^2\alpha}$, dan nilainya maksimum ketika $\theta = 45^\circ + \alpha/2$, yaitu tepat di tengah antara lereng dan garis tegak.

5.3 Sudut 45° dan pasangan sudut kembar

Perhatikan rumus $R = v_0^2 \sin 2\theta / g$. Nilai $\sin 2\theta$ paling besar (= 1) ketika $2\theta = 90^\circ$, yaitu $\theta = 45^\circ$. Jadi, di tanah datar tanpa udara, **sudut 45° memberi jangkauan terjauh**: $R_{\text{maks}} = v_0^2/g$.

Ada keajaiban kedua: $\sin 2\theta = \sin(180^\circ - 2\theta)$. Artinya, sudut θ dan $90^\circ - \theta$ (misalnya 30° dan 60°) memberi **jangkauan yang sama**. Sudut yang lebih curam terbang lebih tinggi dan lebih lama, tetapi mendarat di tempat yang sama.



Lima lemparan dengan kelajuan awal sama. 45° mendarat paling jauh (40 m). Pasangan 30° & 60° mendarat di titik yang sama (34,6 m), begitu juga 15° & 75° (20 m). Garis putus-putus = sudut curam: lebih tinggi dan lebih lama di udara.

LAB MINI **Penyiram taman: cari dua sudut yang mengenai pot**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-5

Jangkauan θ	Jangkauan 90° – θ	Tinggi maks	Sudut yang mengenai pot
8,84 m	–	1,28 m	belum ada

Air keluar dari penyiram di permukaan tanah. Geser sudutnya sampai air mengenai pot bunga. Lalu cari **sudut kedua** yang juga mengenai pot yang sama! Nyalakan "pasangan 90° – θ" untuk melihat aliran kembarnya.

TRIK KAK NARA: PASANGAN "JUMLAH 90"

Jangkauan sama untuk pasangan sudut yang jumlahnya 90°: 10° & 80°, 20° & 70°, 37° & 53°. Pemain basket memilih sudut curam agar bola jatuh hampir tegak ke ring, sedangkan pemain voli yang men-*smash* memilih lintasan landai agar bola cepat sampai.

MITOS

"Di titik tertinggi lintasan, kecepatan bola nol."

FAKTA

Hanya komponen vertikalnya yang nol. Komponen mendatar tetap $v_0 \cos\theta$. Di puncak, bola justru bergerak paling **lambat**, tetapi tidak berhenti.

MITOS

"Sudut 45° selalu memberi lemparan terjauh."

FAKTA

Hanya jika titik lempar dan titik jatuh sama tinggi dan udara diabaikan. Pelempar yang melepas bola dari ketinggian bahu, atau bola yang banyak dihambat udara, mencapai jarak terjauh dengan sudut **di bawah** 45°.

5.4 Dilempar mendatar dari ketinggian

Bila benda dilempar **mendatar** dari ketinggian h, kecepatan vertikal awalnya nol. Gerak vertikalnya persis jatuh bebas, sehingga waktu jatuhnya hanya ditentukan oleh ketinggian:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \qquad x = v\,t = v\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

RUMUS HIDUP

Jarak jatuh benda yang dilempar mendatar

$$x = v\sqrt{\frac{2\,h}{g}}$$

Waktu jatuh hanya ditentukan oleh ketinggian. Jarak mendatar = kecepatan mendatar × waktu jatuh itu.

- v Kecepatan mendatar m/s
- h Ketinggian m
- x Jarak mendatar m

JARAK MENDATAR

20,2

m

Dari ketinggian **20** m, benda jatuh selama √(2h/g) detik. Dengan kecepatan mendatar **10** m/s, ia mendarat **20,2** m dari titik di bawah tempat lepasnya.

Satuan Nusantara: ≈ 19% dari panjang lapangan sepak bola · ≈ 15% dari tinggi Monas · ≈ 13 × tinggi Raka

Cek satuan: $(\mathrm{m/s})\sqrt{\mathrm{m}/(\mathrm{m/s^2})} = (\mathrm{m/s})(\mathrm{s}) = \mathrm{m}$

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

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Rumus $R = v_0^2 \sin 2\theta / g$ **hanya** berlaku jika titik lempar dan titik jatuh sama tinggi. Untuk benda yang dilempar dari meja, tebing, atau atap, kembalilah ke dua persamaan dasar: $x = v_{0x}t$ dan $y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$, lalu cari t dari persamaan vertikal.

COBA SENDIRI **Bantuan logistik dari helikopter**

Helikopter terbang mendatar 20 m/s pada ketinggian 80 m untuk mengirim paket bantuan ke desa yang terisolasi banjir. Agar paket jatuh tepat di lapangan desa, berapa meter sebelum lapangan paket harus dilepas? ($g = 9{,}8$ m/s², abaikan hambatan udara.) Mengapa di dunia nyata paket diberi parasut?

1. Saat dilepas, paket ikut membawa kecepatan helikopter: $v_x = 20$ m/s, $v_{0y} = 0$.
2. Waktu jatuh: $t = \sqrt{2(80)/9{,}8} \approx 4{,}04$ s.
3. Jarak mendatar: $x = 20 \times 4{,}04 \approx 81$ m.
4. Kecepatan vertikal saat tiba: $v_y = 9{,}8 \times 4{,}04 \approx 40$ m/s, terlalu keras untuk barang bantuan.

Paket harus dilepas ±81 m sebelum lapangan. Dilihat dari helikopter, paket jatuh tepat di bawahnya karena keduanya punya kecepatan mendatar yang sama. Parasut dipakai untuk memperlambat jatuhnya (hambatan udara!), walaupun membuat hitungan jarak menjadi lebih rumit.

5.5 Hambatan udara: ketika parabola "penyok"

Semua rumus di atas menganggap tidak ada udara. Di dunia nyata, udara menghambat benda dengan gaya yang makin besar ketika benda makin cepat. Akibatnya:

- Jangkauan dan tinggi maksimum **lebih kecil** daripada hasil hitungan.
- Lintasan **tidak simetris**: naiknya landai, turunnya curam.
- Sudut terbaik biasanya **kurang dari 45°**.
- Benda ringan dan "berbulu" paling terpengaruh. Bola besi tolak peluru hampir mengikuti parabola, sedangkan kok bulu tangkis sama sekali tidak.

FISIKA INDONESIA: KOK YANG "JATUH TEGAK"

Indonesia punya tradisi juara bulu tangkis, dari Rudy Hartono (delapan kali juara All England) sampai Susi Susanti dan Alan Budikusuma, peraih medali emas Olimpiade pertama Indonesia di Barcelona 1992. Pemain hebat paham "fisika kok": dipukul sangat cepat, kok cepat sekali diperlambat udara karena bulu-bulunya. Lintasan pukulan lob tinggi tampak hampir lurus miring ke atas, lalu kok jatuh hampir tegak lurus ke belakang lapangan. Bentuknya lebih mirip lintasan "meriam abad pertengahan" daripada parabola!

Kamu bisa membandingkan lintasan dengan dan tanpa udara di Lab Mini "Gim lempar sandal" dengan menyalakan pilihan *hambatan udara*.

5.6 Perahu menyeberang sungai

Di Bab 4 kamu menjumlahkan kecepatan dalam satu garis. Sekarang arahnya berbeda-beda, jadi kecepatan dijumlahkan sebagai **vektor**:

$$v_{\text{perahu thd tanah}} = v_{\text{perahu thd air}} + v_{\text{air thd tanah}}$$

Bayangkan perahu di atas "karpet air" yang terus bergeser ke hilir. Mesin perahu hanya mengatur gerak perahu *terhadap air*. Arus menghanyutkan perahu sekaligus airnya.

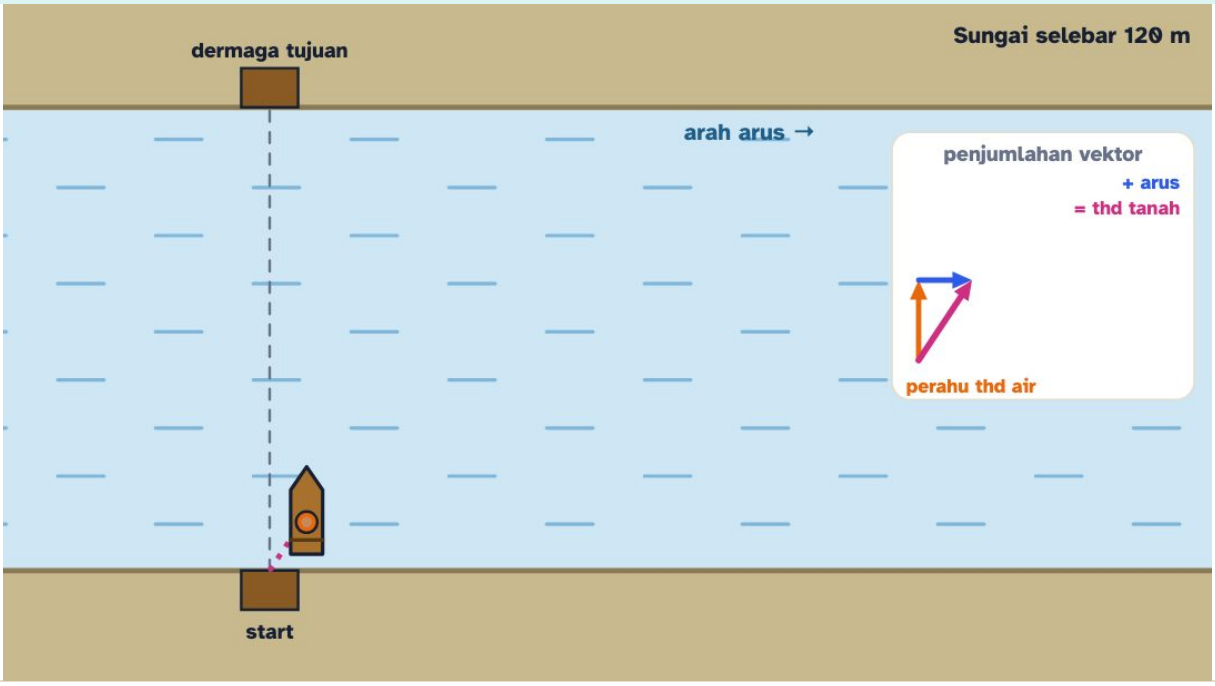
Strategi	Arah haluan	Hasil
Tercepat sampai	tegak lurus tepi sungai	waktu $t = d/v_p$ paling singkat, tetapi perahu hanyut sejauh $u\,t$
Tanpa hanyut	miring ke hulu dengan $\sin\alpha = u/v_p$	tiba tepat di seberang, tetapi lebih lama: $t = d/\sqrt{v_p^2 - u^2}$. Hanya mungkin jika $v_p > u$.

Di sini d adalah lebar sungai, v_p kelajuan perahu terhadap air, dan u kelajuan arus.

LAB MINI

Seberangi sungai dengan perahu ketek

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-5



Kecepatan thd tanah	Waktu	Hanyut
3,61 m/s	4,8 s	9,6 m

Keadaan

Menyeberang… (waktu dipercepat 4×)

Pilih arah haluan, lalu tekan **Jalankan**. Segitiga di pojok kanan atas menunjukkan penjumlahan vektornya. Coba dua tombol strategi. Lalu buat arus lebih deras daripada perahu: bisakah perahu tetap tiba tepat di seberang?

KERJAKAN BERSAMA **Ketek di sungai berarus**

Perahu ketek melaju 4 m/s terhadap air di sungai selebar 200 m yang arusnya 3 m/s. (a) Jika haluan diarahkan tegak lurus tepi, berapa lama perahu menyeberang dan seberapa jauh hanyutnya? (b) Ke mana haluan harus diarahkan agar perahu tiba tepat di seberang, dan berapa lama perjalanannya?

1. (a) Gerak menyeberang hanya dari komponen haluan: $t = 200/4 = 50$ s.
2. (a) Selama 50 s, arus menghanyutkan perahu sejauh $3 \times 50 = 150$ m. Kelajuan terhadap tanah $\sqrt{4^2 + 3^2} = 5$ m/s.
3. (b) Komponen haluan ke hulu harus melawan arus: $4 \sin \alpha = 3 \rightarrow \sin \alpha = 0{,}75 \rightarrow \alpha \approx 48{,}6^\circ$ dari arah tegak lurus, condong ke hulu.
4. (b) Sisa kecepatan untuk menyeberang: $\sqrt{4^2 - 3^2} = \sqrt{7} \approx 2{,}65$ m/s, sehingga $t = 200/2{,}65 \approx 76$ s.

(a) 50 s, hanyut 150 m. (b) Haluan miring ±48,6° ke hulu, waktu ±76 s. Tiba tepat di seberang harus "dibayar" dengan waktu yang lebih lama.

FISIKA INDONESIA: SUNGAI SEBAGAI JALAN RAYA

Di Palembang, perahu ketek menyeberangi Sungai Musi setiap hari. Di Kalimantan, Sungai Kapuas (sungai terpanjang di Indonesia, sekitar 1.100 km) dan Sungai Mahakam menjadi jalur angkutan utama. Para pengemudi perahu secara naluriah mengarahkan haluan sedikit ke hulu agar tidak hanyut melewati dermaga tujuan. Itulah penjumlahan vektor yang dikerjakan dengan tangan dan pengalaman.

5.7 Hujan dan payung miring

Saat tidak ada angin, tetes hujan jatuh hampir tegak lurus. Tetapi ketika kamu berjalan cepat, hujan seolah datang miring dari depan. Mengapa? Karena yang kamu rasakan adalah **kecepatan hujan relatif terhadap dirimu**:

$$v_{\text{hujan thd kamu}} = v_{\text{hujan}} - v_{\text{kamu}}$$

Mengurangi kecepatanmu sama dengan menambahkan vektor yang mengarah ke **belakang**. Gabungan "jatuh ke bawah" dan "bergeser ke belakang" membuat hujan tampak datang miring dari depan, dengan sudut θ terhadap garis tegak:

RUMUS HIDUP **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.

v_{orang} Kecepatanmu m/s

v_{hujan} Kecepatan jatuh hujan m/s

θ Sudut miring dari tegak °

SUDUT MIRING DARI TEGAK

14

°

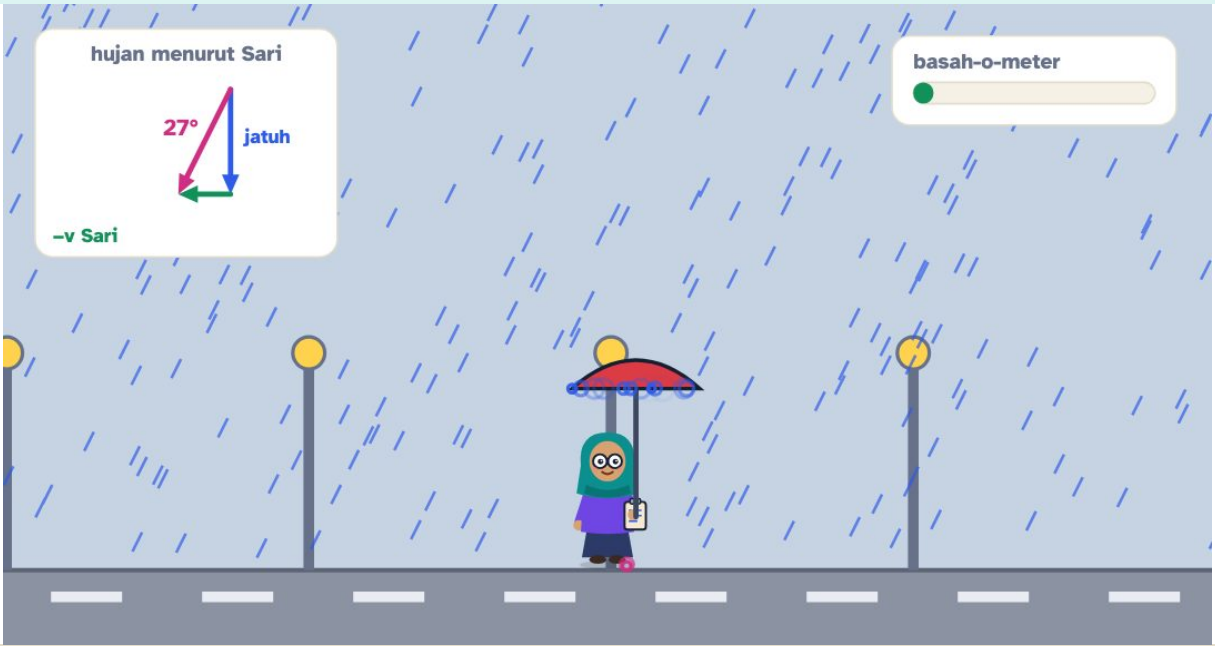
Berjalan **1,5** m/s di bawah hujan yang jatuh **6** m/s → hujan tampak datang dari depan dengan sudut **14°** dari arah tegak. Condongkan payungmu ke depan sebesar itu.

Cek satuan: $\frac{\text{m/s}}{\text{m/s}}$ tidak bersatuan, sehingga hasilnya murni sebuah sudut.

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

LAB MINI **Sari, payung, dan hujan**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-5



Sudut hujan menurut Sari	Basah-o-meter	Saran
26,6 °	1 tetes/s	Miringkan ±27° ke depan

Atur kecepatan jalan Sari dan kemiringan payungnya. Perhatikan "basah-o-meter": berapa tetes per detik yang mengenai tubuh Sari? Pindahkan sudut pandang antara **orang di halte** (hujan tegak) dan **Sari** (hujan miring). Apakah jumlah tetes yang mengenai Sari ikut berubah?

MITOS

"Kalau hujannya tampak miring, pasti ada angin."

MITOS

"Benda yang dilempar mendatar jatuh lebih lambat daripada benda yang dijatuhkan."

FAKTA

Belum tentu! Hujan bisa jatuh tegak terhadap tanah, tetapi tampak miring bagi orang yang bergerak. Coba lihat jendela mobil atau kereta saat hujan: garis-garis airnya miring tajam karena kendaraannya melaju.

FAKTA

Gerak vertikal tidak peduli pada gerak mendatar. Dari ketinggian yang sama, keduanya menyentuh tanah
bersamaan
(tanpa hambatan udara). Yang dilempar hanya mendarat lebih jauh.

LANJUT · OLIMPIADE

LARI ATAU JALAN SAAT HUJAN?

Modelkan tubuhmu sebagai kotak dengan luas atas A_{atas} dan luas depan A_{depan}. Hujan berkerapatan ρ (kg air per m³ udara) jatuh tegak dengan kelajuan u, dan kamu menempuh jarak L dengan kelajuan v. Air yang mengenai kepala sebanding dengan *waktu*: $\rho A_{\text{atas}}\, u\,(L/v)$. Air yang mengenai bagian depan sebanding dengan *jarak*: $\rho A_{\text{depan}}\, L$, tidak bergantung pada v! Jadi total air $= \rho L\,(A_{\text{atas}}\, u/v + A_{\text{depan}})$ selalu berkurang jika kamu berlari lebih cepat, tetapi tidak pernah lebih kecil daripada $\rho L A_{\text{depan}}$. Berlarilah, asal lantainya tidak licin.

Menyiram tanaman

Ujung selang dipencet agar air keluar lebih cepat (v_0 besar), lalu diarahkan sekitar 45° untuk menjangkau tanaman terjauh.

Bulu tangkis

Pukulan lob mengirim kok tinggi ke belakang lapangan. Hambatan udara membuat kok jatuh hampir tegak, sulit dikembalikan dengan *smash*.

Penyeberangan sungai

Pengemudi ketek dan perahu tambang mengarahkan haluan ke hulu agar tiba tepat di dermaga seberang.

Lemparan bebas basket

Lintasan yang cukup curam membuat bola masuk ring dari atas, sehingga "pintu" ring tampak lebih lebar bagi bola.

Air mancur taman kota

Setiap pancaran air membentuk parabola. Perancang mengatur kecepatan dan sudut nozel agar semua pancaran jatuh tepat di kolam.

Cek Cepat

Di titik tertinggi lintasan parabola (tanpa hambatan udara), kecepatan bola...

- nol
- hanya tinggal komponen mendatarnya
- hanya tinggal komponen vertikalnya
- paling besar

Bola dilempar dengan kelajuan awal tertentu pada sudut 30°. Dengan kelajuan awal yang sama, sudut lain yang memberi jangkauan sama adalah...

- 45°
- 15°
- 90°
- 60°

Pesawat terbang mendatar dengan kecepatan tetap lalu menjatuhkan paket. Jika hambatan udara diabaikan, dilihat dari pilot paket itu...

- tertinggal makin jauh di belakang pesawat
- melesat mendahului pesawat
- jatuh lurus ke bawah, selalu tepat di bawah pesawat
- melayang diam di tempat

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. C

Tantangan Rumah: tebak titik jatuh kelereng

Bahan: kelereng, dua buku tebal dan penggaris (sebagai lintasan miring), meja, kertas, tepung atau kertas karbon, meteran

1. Buat lintasan miring dari penggaris yang bersandar pada buku, berakhir tepat di tepi meja. Ukur tinggi meja h.
2. Lepaskan kelereng dari tanda yang sama di lintasan. Taburkan sedikit tepung di lantai (atau pakai kertas karbon) untuk melihat titik jatuhnya. Ukur jarak mendatar x dari tepi meja. Ulangi 5 kali dan rata-ratakan.
3. Hitung kecepatan kelereng saat meninggalkan meja: $v = x/\sqrt{2h/g}$.
4. Sekarang **ramalkan**: jika meja diganti kursi yang lebih rendah (ukur tingginya), di mana kelereng akan jatuh? Letakkan gelas plastik di titik ramalanmu, lalu uji!

Pertanyaan: Apakah kelereng masuk ke gelas? Jika meleset, apa penyebabnya? (Petunjuk: apakah kelereng selalu dilepas dari titik yang sama? Apakah kelereng menggelinding atau tergelincir?)

⚡ RINGKASAN KILAT **Bab 5 dalam 3 menit**

✅ Kamu sekarang bisa...

- menguraikan gerak parabola menjadi **GLB mendatar** dan **GLBB vertikal** yang saling bebas
- menghitung **waktu terbang**, **tinggi maksimum**, dan **jangkauan**, serta menjelaskan istimewanya sudut 45°
- menganalisis benda yang dilempar mendatar dari ketinggian
- menjelaskan pengaruh hambatan udara pada lintasan bola dan kok bulu tangkis
- menjumlahkan vektor kecepatan untuk perahu yang menyeberang sungai dan hujan yang tampak miring

🔑 Istilah kunci

gerak parabola

🧮 Rumus penting

$$R = \frac{{v_0}^2 \sin 2\theta}{g}$$

Jangkauan lemparan di tanah datar. Jangkauan sebanding dengan kuadrat kecepatan awal. Sudut 45° paling jauh, dan sudut θ serta 90° − θ memberi jangkauan yang sama.

$$H = \frac{{v_0}^2 \sin^2 \theta}{2g}$$

Tinggi maksimum. Hanya komponen tegak yang mengangkat bola. Makin curam sudutnya, makin tinggi puncaknya.

$$x = v\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Jarak jatuh benda yang dilempar mendatar. Waktu jatuh hanya ditentukan oleh ketinggian. Jarak mendatar = kecepatan mendatar × waktu jatuh itu.

$$\tan\theta = \frac{v_{\text{orang}}}{v_{\text{hujan}}}$$

Sudut miring payung. Makin cepat kamu berjalan dibandingkan hujannya, makin miring hujan menurutmu, dan makin miring payungmu harus dicondongkan ke depan.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Rumus $R = v_0^2 \sin 2\theta / g$ hanya berlaku jika titik lempar dan titik jatuh sama tinggi.

⛰️ 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=5

Teka-teki untuk Bab 6

Selama terbang, sandal yang dilempar Raka terus melaju mendatar dengan kecepatan tetap, padahal tangan Raka sudah tidak mendorongnya lagi. Siapa atau apa yang "mendorong" sandal ke depan selama terbang? Dan mengapa komponen vertikalnya justru terus berubah?

▼ Intip petunjuk

Jawaban mengejutkannya: **tidak ada** yang mendorong ke depan! Benda tidak butuh gaya untuk terus bergerak; benda butuh gaya untuk *mengubah* geraknya. Satu-satunya gaya pada sandal (tanpa udara) adalah berat ke bawah, sehingga hanya gerak vertikalnya yang berubah. Ini adalah Hukum I dan II Newton, tema Bab 6.

BAB 6 · GERAK & GAYA

06 Hukum Newton: Tiga Aturan Main Gerak

Mengapa penumpang angkot terdorong ke depan saat rem diinjak? Mengapa roket bisa terbang di ruang hampa? Tiga kalimat dari tahun 1687 menjawab semuanya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan gaya sebagai tarikan atau dorongan dan menggambar **diagram benda bebas**;
- memakai **Hukum I** (kelembaman), **Hukum II** ($\Sigma F = ma$), dan **Hukum III** (aksi-reaksi) untuk peristiwa sehari-hari;
- membedakan **massa** dan **berat**, lalu menghitung angka timbangan di dalam lift;
- menyelesaikan soal katrol dan bidang datar dengan "lima langkah sakti";
- memakai **gaya semu** untuk menganalisis gerak dari dalam kendaraan yang dipercepat.

ANGKOT MENGEREM

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Saat angkot mengerem mendadak, ke mana tubuh penumpang cenderung bergerak, dan mengapa?

- Ke depan, karena ada gaya dorong dari kursi belakang.
- Ke depan, karena tubuh cenderung mempertahankan geraknya.
- Ke belakang, karena rem menarik semua benda ke belakang.
- Tetap diam, karena tubuh selalu ikut bergerak bersama angkot.

Jawabannya: ke depan, karena kelembaman. Sebelum rem diinjak, tubuhmu bergerak maju bersama angkot. Saat rem diinjak, roda dan bodi angkot dihentikan oleh gaya gesek jalan, tetapi tubuhmu *tidak* ikut direm (kecuali lewat gesekan kursi dan sabuk pengaman). Jadi tubuhmu tetap melaju, sementara angkotnya melambat. Rasanya seperti "terdorong", padahal tidak ada yang mendorong.

6.1 Gaya: tarikan atau dorongan

Menendang bola, menarik tali timba, menekan tombol lift: semuanya adalah **gaya**. Gaya adalah **tarikan atau dorongan** yang dapat mengubah *kecepatan*, *arah gerak*, atau *bentuk* benda. Satuannya **newton** (N). Satu newton kira-kira sama dengan **berat sebuah apel kecil**.

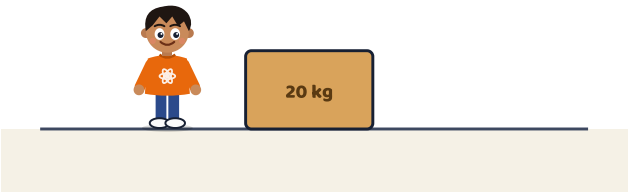
Gaya adalah **vektor**: ia punya besar *dan* arah. Dorongan 10 N ke kanan berbeda akibatnya dengan dorongan 10 N ke atas. Karena itu, gaya digambar sebagai panah. Panjang panah menunjukkan besarnya, dan arah panah menunjukkan arahnya.

Gaya	Simbol	Arah	Contoh
Berat (gaya gravitasi)	$w = mg$	selalu ke bawah, menuju pusat Bumi	apel jatuh dari pohon
Gaya normal	N	tegak lurus permukaan, menjauhi permukaan	meja menahan buku
Gaya gesek	f	sejajar permukaan, melawan gerak (atau kecenderungan gerak)	sandal di lantai, rem motor
Tegangan tali	T	sepanjang tali, menarik benda	timba di sumur, layangan
Gaya pegas	$F = kx$	melawan regangan atau tekanan pegas	jok motor, ketapel

Bahasa sederhana · Gampangnya: **gaya = dorongan atau tarikan**. Kalau kamu mendorong meja, kamu memberi gaya. Kalau Bumi menarik kamu ke bawah, Bumi memberi gaya (itulah berat badanmu).

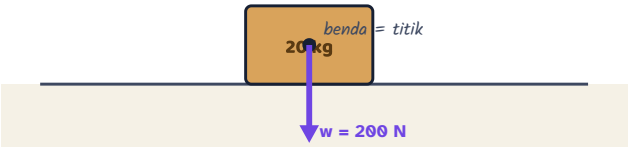
Diagram benda bebas (DBB): "foto rontgen" gaya

Fisikawan suka menggambar benda sebagai **satu titik atau kotak**, lalu menempelkan semua panah gaya yang bekerja *pada benda itu saja*. Gambar ini disebut **diagram benda bebas**. Ini adalah alat terpenting di bab ini, jadi ikuti animasinya langkah demi langkah.

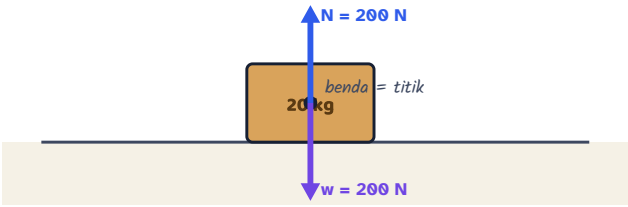


Langkah 1. Raka mendorong kardus 20 kg di lantai. Gaya apa saja yang bekerja **pada kardus**?

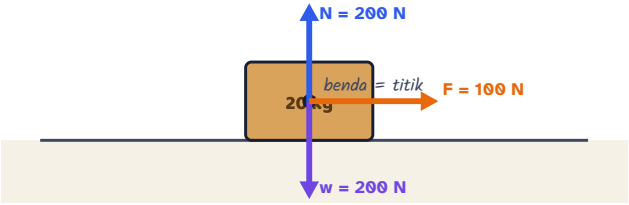
Langkah 2. Langkah 1: "hapus" Raka dan lantai dari pikiran. Gambar kardus sebagai satu titik.



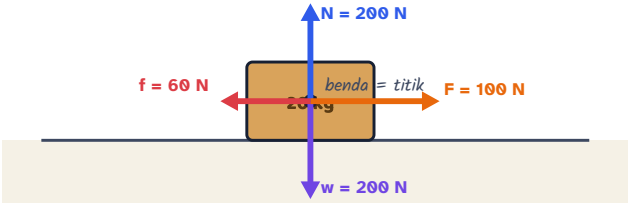
Langkah 3. Langkah 2: Bumi menarik kardus ke bawah. Itulah **berat** $w = mg = 20 \times 10 = 200$ N (pakai $g = 10$ m/s²).



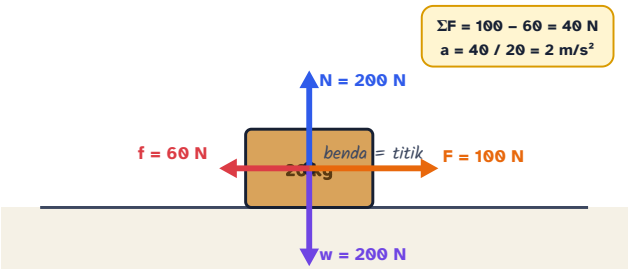
Langkah 4. Langkah 3: lantai menahan kardus ke atas dengan **gaya normal** N. Kardus tidak melesak ke lantai, jadi $N = w = 200$ N.



Langkah 5. Langkah 4: tangan Raka mendorong ke kanan: $F = 100$ N.



Langkah 6. Langkah 5: lantai menggesek kardus ke kiri, melawan gerak: $f = 60$ N.



Langkah 7. Langkah 6: jumlahkan! Atas-bawah saling meniadakan, kanan-kiri bersisa 40 N. Kardus dipercepat 2 m/s² ke kanan.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Di DBB hanya ada gaya yang bekerja **pada** benda itu. Gaya kardus mendorong tangan Raka **tidak** digambar di DBB kardus, karena gaya itu bekerja pada tangan Raka.

6.2 Hukum I Newton: benda itu "malas berubah"

TAMU DARI MASA LALU

Selama hampir 2.000 tahun orang percaya pendapat Aristoteles: benda bergerak *hanya jika terus didorong*. Galileo Galilei (1564–1642) membantahnya dengan eksperimen bola di lintasan miring. Makin licin lintasannya, makin jauh bola menggelinding. Kesimpulannya: tanpa gesekan, bola akan menggelinding **selamanya**. Isaac Newton lalu merumuskannya sebagai hukum pertama dalam buku *Principia* (1687).

Hukum I Newton. Jika gaya total pada sebuah benda nol, benda yang diam akan tetap diam, dan benda yang bergerak akan tetap bergerak lurus dengan kecepatan tetap.

Sifat benda yang "enggan" mengubah keadaan geraknya disebut **kelembaman** atau *inersia*. Ukuran kelembaman adalah **massa**. Gerobak bakso penuh lebih sulit didorong *dan* lebih sulit dihentikan daripada gerobak kosong, karena massanya lebih besar.

RUMUS HIDUP **Hukum I Newton (syarat diam atau GLB)**

$$\Sigma F = 0 \iff v = \text{tetap}$$

Gaya total nol ⇔ kecepatan tidak berubah (diam tetap diam, bergerak tetap bergerak).

- F_{dorong} Gaya dorong mesin N
- F_{hambat} Gaya hambat N
- m Massa mobil kg
- a Percepatan m/s²

PERCEPATAN
0
m/s²

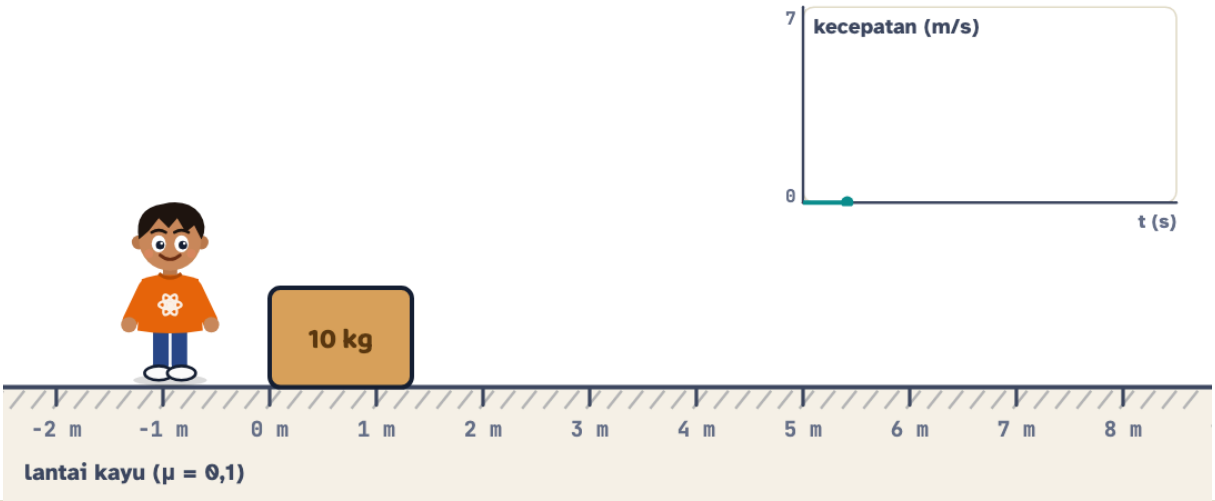
Mesin mendorong **1.500** N, hambatan **1.500** N. Gaya total = selisihnya, sehingga percepatan = **0** m/s². Jika hasilnya 0, mobil melaju dengan kecepatan tetap: ini Hukum I!

Cek satuan: $\frac{\text{N}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg}\,\text{m}\,\text{s}^{-2}}{\text{kg}} = \text{m}\,\text{s}^{-2}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-NEWTON1

LAB MINI **Dorong sekali, lalu lepaskan!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-6



Kecepatan	Jarak tempuh	Keadaan
0 m/s	0 m	Diam

Tekan **Dorong 1 detik**, lalu amati kecepatannya. Ulangi dengan koefisien gesek $\mu = 0$ (lantai es super licin). Apa yang terjadi?

MITOS

"Benda yang bergerak pasti sedang didorong sebuah gaya."

MITOS

"Kalau angkot berhenti, penumpang terlempar karena ada gaya ke depan."

FAKTA

Gaya tidak diperlukan untuk **mempertahankan** gerak. Gaya diperlukan untuk **mengubah** gerak (mempercepat, memperlambat, membelokkan). Bola di lantai berhenti karena gesekan, bukan karena "dorongannya habis".

FAKTA

Tidak ada gaya ke depan. Tubuh penumpang hanya meneruskan geraknya (Hukum I), sementara angkotnya melambat. Dilihat dari dalam angkot, seolah-olah ada gaya ke depan. Fisikawan menyebutnya *gaya semu*.

Sabuk pengaman & helm

Menahan tubuh agar ikut melambat bersama kendaraan, sehingga tubuh tidak meneruskan gerak lalu membentur kaca atau aspal.

Mengibas kasur

Kasur disentak lalu berhenti mendadak. Debu yang "malas berhenti" terus bergerak dan lepas dari kasur.

Mengencangkan kepala palu

Gagang palu dihentakkan ke lantai. Gagang berhenti, kepala palu terus bergerak ke bawah sehingga masuk lebih rapat.

Jangan berdiri di bak truk

Saat truk mengerem atau berbelok, tubuh yang tidak terikat meneruskan geraknya dan bisa terlempar.

6.3 Hukum II Newton: rumus paling terkenal di mekanika

Hukum I bercerita tentang benda tanpa gaya total. Bagaimana kalau gaya totalnya tidak nol? Benda akan **dipercepat**. Makin besar gaya totalnya, makin besar percepatannya. Makin besar massanya, makin kecil percepatannya.

Hukum II Newton. Percepatan benda sebanding dengan gaya total dan berbanding terbalik dengan massanya: $\Sigma F = ma$. Arah percepatan selalu **sama** dengan arah gaya total.

RUMUS HIDUP **Hukum II Newton**

$$a = \frac{\Sigma F}{m}$$

Percepatan = gaya total dibagi massa. Didorong makin kuat, makin ngebut. Makin berat, makin susah dipercepat.

ΣF Gaya total N | m Massa kg | a Percepatan m/s²

PERCEPATAN
3
m/s²

Gaya total **120** N pada gerobak **40** kg memberi percepatan **3** m/s². Artinya kecepatannya bertambah **3** m/s setiap detik.

Cek satuan: $1\,\mathrm{N} = 1\,\mathrm{kg\,m/s^2}$: satu newton adalah gaya yang mempercepat 1 kg sebesar 1 m/s².

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-NEWTON2

TRIK KAK NARA: SEGITIGA AJAIB

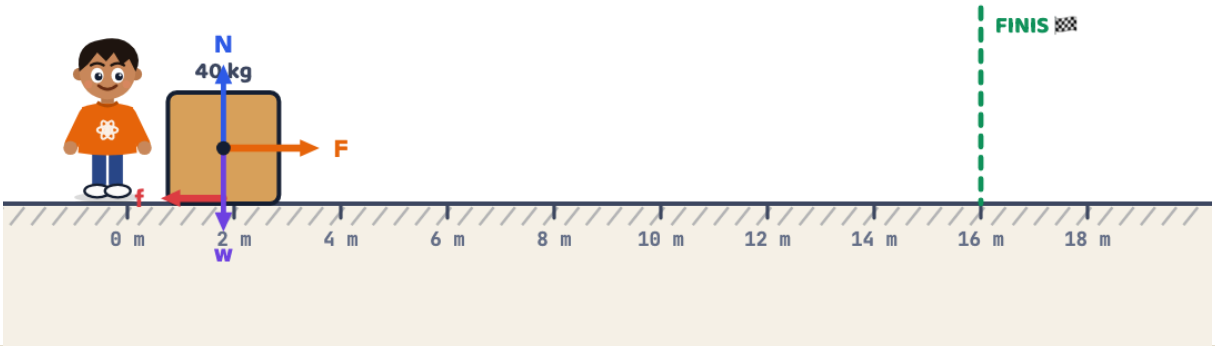
Tulis F di puncak segitiga, m dan a di bawah. Tutup yang ingin dicari: tutup F → $m \times a$; tutup a → F/m; tutup m → F/a. Tapi ingat, F **di sini adalah gaya total**, bukan sembarang gaya!

LAB MINI Lab dorong balok: atur gaya, massa, dan gesekan

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-6

$\Sigma F = F - f = 120 - 78{,}4 = 41{,}6$ N

$a = \Sigma F / m = 41{,}6 / 40 = 1{,}04$ m/s²



Gaya total ΣF	Percepatan a	Kecepatan	Keadaan
41,6 N	1,04 m/s²	1,25 m/s	Bergerak

Panah oranye = gaya dorong, merah = gesekan, ungu = berat, biru = gaya normal. Coba buat gaya dorong *lebih kecil* dari gesekan maksimum. Apakah balok bergerak?

CONTOH Gerobak bakso tanpa gesekan

Gerobak bakso bermassa 40 kg didorong dengan gaya 120 N di jalan sangat licin (gesekan diabaikan). Berapa percepatannya?

1. Gaya total hanya gaya dorong: $\Sigma F = 120$ N.
2. $a = \dfrac{\Sigma F}{m} = \dfrac{120}{40} = 3$ m/s².

Percepatan gerobak 3 m/s². Setiap detik kecepatannya bertambah 3 m/s.

KERJAKAN BERSAMA **Sekarang dengan gesekan**

Gerobak yang sama (40 kg) didorong 120 N, tetapi kini ada gesekan dengan koefisien $\mu_k = 0{,}2$. Gunakan $g = 10$ m/s². Berapa percepatannya?

1. Gaya normal di bidang datar: $N = mg = 40 \times 10 = 400$ N.
2. Gaya gesek kinetis: $f_k = \mu_k N = 0{,}2 \times 400 = 80$ N, arahnya melawan gerak.
3. Gaya total: $\Sigma F = 120 - 80 = 40$ N.
4. $a = 40/40 = 1$ m/s².

Percepatan turun dari 3 m/s² menjadi 1 m/s², karena dua pertiga gaya dorong "dimakan" gesekan.

COBA SENDIRI **Motor mengerem**

Motor bermassa 100 kg dikendarai Kak Nara (60 kg) dengan kecepatan 72 km/jam. Rem ditekan sehingga motor berhenti dalam 4 s. Berapa gaya pengereman rata-rata?

1. Ubah satuan: $72\ \mathrm{km/jam} = 72 \times \dfrac{1000}{3600} = 20$ m/s.
2. Perlambatan: $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \dfrac{0 - 20}{4} = -5$ m/s².
3. Massa total yang diperlambat: $100 + 60 = 160$ kg.
4. $F = ma = 160 \times (-5) = -800$ N. Tanda minus berarti gaya berlawanan arah gerak.

Gaya pengereman rata-rata 800 N, kira-kira sama dengan berat orang bermassa 80 kg.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

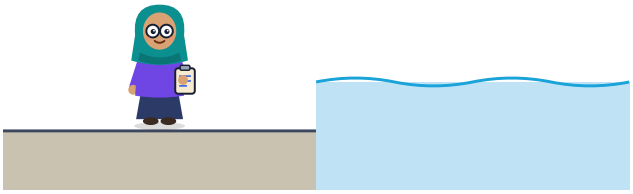
BENTUK SEJATI HUKUM II

Newton sebenarnya menulis $\Sigma F = \dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$, dengan $p = mv$ adalah momentum. Jika massa tetap, bentuk ini menjadi $\Sigma F = ma$. Bentuk momentum wajib dipakai bila massa berubah, misalnya roket yang membuang bahan bakar atau truk yang diisi pasir sambil berjalan. Untuk truk berkecepatan tetap v yang menerima pasir dengan laju $\dot{m}$, gaya yang diperlukan adalah $F = v\,\dot{m}$, walaupun percepatannya nol!

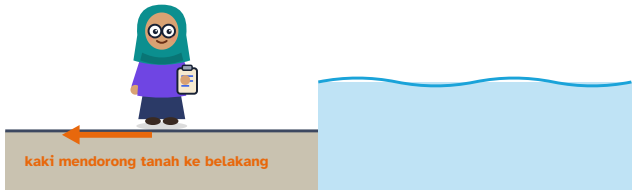
6.4 Hukum III Newton: gaya selalu datang berpasangan

Hukum III Newton. Jika benda A memberi gaya pada benda B, maka B memberi gaya pada A yang **sama besar** dan **berlawanan arah**: $F_{AB} = -F_{BA}$.

Pasangan ini disebut **aksi-reaksi**. Ciri-cirinya: (1) sama besar, (2) berlawanan arah, (3) bekerja pada **dua benda yang berbeda**, dan (4) jenisnya sama (keduanya gaya kontak, atau keduanya gaya gravitasi).

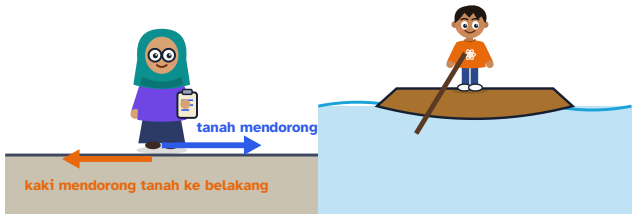


Langkah 1. Bagaimana caramu berjalan maju? Siapa yang mendorongmu ke depan?



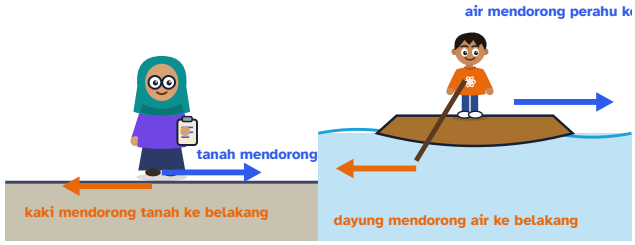
Langkah 2. Aksi: telapak kaki Sari mendorong tanah ke **belakang** (lewat gesekan).

Langkah 3. Reaksi: tanah mendorong kaki Sari ke **depan** dengan gaya sama besar. Jadi yang mendorongmu maju adalah... tanah!



Langkah 4. Hal yang sama terjadi saat Raka mendayung perahu di Sungai Musi.

Langkah 5. Aksi: dayung mendorong air ke belakang.



Langkah 6. Reaksi: air mendorong dayung (dan perahu) ke depan. Roket bekerja dengan cara yang sama: roket mendorong gas ke belakang, gas mendorong roket ke depan.

Tebak Dulu!

Truk besar menabrak motor kecil. Saat tabrakan, gaya mana yang lebih besar?

- Gaya truk pada motor lebih besar, karena truk lebih berat.
- Gaya motor pada truk lebih besar, karena motor lebih cepat.
- Keduanya sama besar.
- Tergantung siapa yang menabrak duluan.

Sama besar, menurut Hukum III. Lalu mengapa motor yang ringsek? Karena akibatnya berbeda. Percepatan = gaya / massa. Gaya yang sama pada motor (±150 kg) menghasilkan perubahan kecepatan jauh lebih besar daripada pada truk (±10.000 kg). Itulah sebabnya pengendara motor harus ekstra waspada di dekat kendaraan besar.

AWAS JEBAKAN KLASIK

Berat buku w dan gaya normal meja N memang sama besar dan berlawanan arah, tetapi keduanya **bukan** pasangan aksi-reaksi, karena keduanya bekerja pada benda yang **sama** (buku). Pasangan reaksi dari berat buku adalah **gaya tarik buku pada Bumi**. Pasangan reaksi dari gaya normal adalah **gaya tekan buku pada meja**.

MITOS

"Kuda menarik kereta, kereta menarik kuda sama besar. Jadi gayanya saling meniadakan dan kereta tidak bisa bergerak."

FAKTA

Aksi dan reaksi bekerja pada benda yang **berbeda**, jadi tidak bisa saling meniadakan. Kereta bergerak karena tarikan kuda pada kereta lebih besar daripada gesekan pada kereta. Kuda bergerak karena dorongan tanah pada kaki kuda lebih besar daripada tarikan kereta.

MITOS

"Roket butuh udara untuk 'ditolak' supaya bisa terbang."

FAKTA

Roket mendorong **gas buangnya sendiri** ke belakang, lalu gas itu mendorong roket ke depan. Karena itu roket justru bekerja paling baik di ruang hampa, tempat tidak ada hambatan udara.

FISIKA INDONESIA

Indonesia punya program roket sendiri. Roket seri **RX** buatan LAPAN (kini bagian dari BRIN) diuji terbang di pantai selatan Jawa. Prinsipnya persis Hukum III Newton: propelan padat dibakar, gas panas disemburkan ke belakang, dan roket terdorong ke depan.

6.5 Massa, berat, dan rahasia timbangan di dalam lift

Massa (kg) adalah banyaknya materi sekaligus ukuran kelembaman. Massamu sama di Palembang, di puncak Jayawijaya, atau di Bulan. **Berat** (N) adalah gaya tarik gravitasi padamu: $w = mg$. Di Bumi, $g \approx 9{,}8$ m/s² (sering dibulatkan menjadi 10). Di Bulan, g hanya sekitar 1,6 m/s², sehingga beratmu tinggal ±1/6-nya.

Timbangan badan sebenarnya **tidak mengukur beratmu**. Timbangan mengukur **gaya normal**, yaitu seberapa kuat timbangan harus menahanmu. Di lantai diam, $N = mg$. Tetapi di dalam lift yang dipercepat, ceritanya berbeda.

RUMUS HIDUP **Angka timbangan di dalam lift**

$$N = m\,(g + a)$$

Lift dipercepat ke atas → timbangan menekan lebih kuat (terasa berat). Dipercepat ke bawah → terasa ringan.

- m Massa penumpang kg
- a Percepatan lift (+ ke atas) m/s²
- N Gaya normal (angka timbangan) N

GAYA NORMAL (ANGKA TIMBANGAN)

590

N

Penumpang **50** kg, percepatan lift **2** m/s² → timbangan menekan **590** N. Timbangan berskala kg akan menunjukkan N/g.

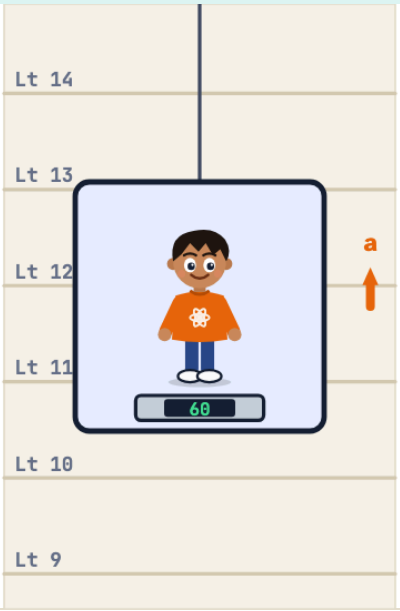
Satuan Nusantara: ≈ 1,2 × berat orang 50 kg · ≈ 2,4 × berat karung beras 25 kg · ≈ 6% dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: Jika $a = -g$ (jatuh bebas), $N = 0$: kamu melayang tanpa bobot!

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

LAB MINI **Naik lift sambil berdiri di timbangan**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-6

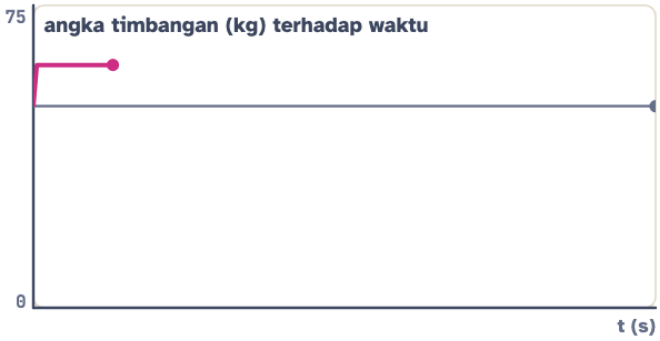


TIMBANGAN

60,2 kg

massa sebenarnya: 50 kg

terasa lebih berat



Fase	Percepatan (+ ke atas)	Angka timbangan
Mulai naik: dipercepat ke atas	2 m/s²	60,2 kg

Gaya normal
590 N

Pilih jenis perjalanan, lalu jalankan. Perhatikan angka timbangan saat lift **mulai** bergerak, saat **melaju tetap**, dan saat **akan berhenti**. Coba juga mode wahana menara jatuh bebas.

KERJAKAN BERSAMA **Raka di lift gedung tinggi**

Raka (50 kg) berdiri di timbangan dalam lift. Lift bergerak ke atas dengan percepatan 2 m/s². Berapa angka timbangan dalam newton, dan berapa jika timbangannya berskala kg? ($g = 10$ m/s²)

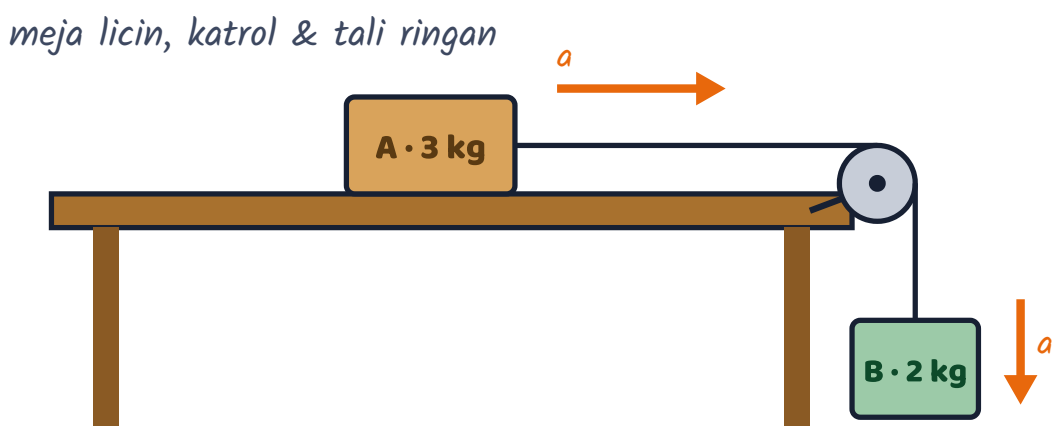
1. Gaya pada Raka: normal N ke atas, berat $mg = 500$ N ke bawah.
2. Hukum II (positif ke atas): $N - mg = ma \rightarrow N = m(g + a) = 50(10 + 2) = 600$ N.
3. Timbangan berskala kg membagi dengan g: $600/10 = 60$ "kg".

Timbangan menunjukkan 600 N (atau "60 kg"). Massa Raka tetap 50 kg. Yang bertambah hanya tekanan timbangan pada kakinya.

6.6 Lima langkah sakti menaklukkan soal gaya

1. **Gambar** situasinya, lalu pilih benda yang dianalisis.

2. **DBB**: gambar semua gaya *pada* benda itu (berat, normal, gesek, tali, pegas, dorongan).
3. **Pilih sumbu**: biasanya searah gerak dan tegak lurus gerak.
4. **Tulis** $\Sigma F = ma$ untuk tiap sumbu (dan tiap benda bila ada lebih dari satu).
5. **Hitung, lalu cek**: apakah satuannya benar? Apakah hasilnya masuk akal?



Sistem "meja-katrol": balok A di meja licin ditarik balok B yang tergantung.

KERJAKAN BERSAMA **Meja dan katrol**

Pada gambar di atas, $m_A = 3$ kg, $m_B = 2$ kg, $g = 10$ m/s². Tentukan percepatan sistem dan tegangan tali.

1. DBB balok A (arah gerak ke kanan): hanya tegangan T yang mendatar. $T = m_A a$.
2. DBB balok B (arah gerak ke bawah): berat $m_B g$ ke bawah, tegangan T ke atas. $m_B g - T = m_B a$.
3. Jumlahkan kedua persamaan supaya T hilang: $m_B g = (m_A + m_B)a$ → $a = \dfrac{2 \times 10}{3 + 2} = 4$ m/s².
4. Tegangan: $T = m_A a = 3 \times 4 = 12$ N. Cek di B: $20 - 12 = 8 = 2 \times 4$. ✓

$a = 4$ **m/s² dan** $T = 12$ **N. Perhatikan bahwa** T **lebih kecil daripada berat B (20 N). Kalau sama besar, B tidak akan bergerak turun!**

RUMUS HIDUP

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.

- m_A Massa balok di meja kg
- m_B Massa beban gantung kg
- μ Koefisien gesek meja
- a Percepatan sistem m/s²

PERCEPATAN SISTEM

4

m/s²

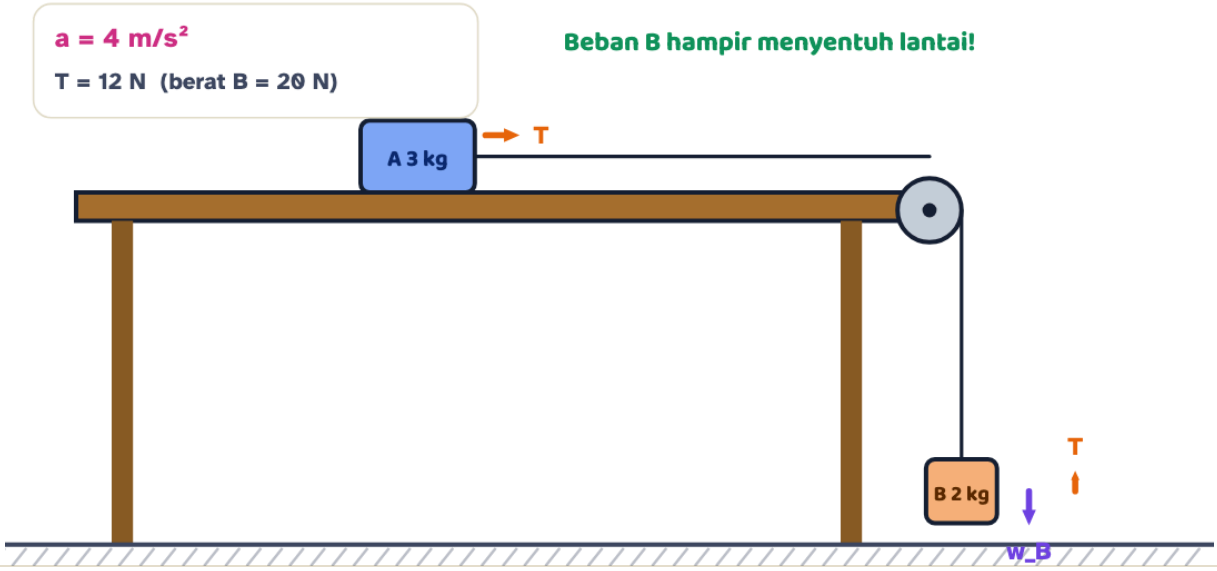
Beban **2** kg menarik balok **3** kg (μ = **0**). Percepatan sistem **4** m/s². Jika hasilnya 0, gesekan statis cukup kuat menahan sistem tetap diam.

Cek satuan: Dengan $g = 10$ m/s². Tegangan tali: $T = m_A(a + \mu g)$.

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

LAB MINI **Lab katrol: meja licin, meja kasar, dan mesin Atwood**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-6



Percepatan	Tegangan tali	Kecepatan	Keadaan
4 m/s²	12 N	2,93 m/s	Bergerak

Pilih susunannya, atur massa dan gesekan, lalu jalankan. Perhatikan: tegangan tali **selalu lebih kecil** daripada berat beban yang turun. Kapan sistem tidak bergerak sama sekali?

6.7 Gaya semu: fisika dari dalam angkot

Ingat Raka yang "terdorong" ke depan saat angkot mengerem? Dari **pinggir jalan**, Kak Nara melihat tidak ada gaya ke depan. Tubuh Raka hanya meneruskan geraknya. Tetapi dari **dalam angkot**, Raka merasakan seolah-olah ada tangan tak terlihat yang mendorongnya. Siapa yang benar? Keduanya, asal tahu aturannya.

Kerangka acuan yang diam atau bergerak lurus beraturan disebut **kerangka inersial**. Di sana Hukum Newton berlaku apa adanya. Angkot yang mengerem, lift yang dipercepat, atau komidi putar adalah **kerangka non-inersial**, karena kerangka itu sendiri dipercepat. Agar Hukum Newton tetap bisa dipakai di dalamnya, kita menambahkan **gaya semu** pada setiap benda: $F_{\text{semu}} = -ma_{\text{kerangka}}$. Arahnya selalu **berlawanan** dengan percepatan kerangka.

Bahasa sederhana · Gampangnya: kalau angkot ngerem, semua benda di dalamnya "terasa" didorong ke depan. Kalau angkot tancap gas, semua terasa didorong ke belakang. Dorongan itu bukan gaya sungguhan, cuma akibat angkotnya yang berubah kecepatan.

Tebak Dulu!

Sebuah pengharum mobil tergantung di kaca spion angkot. Saat angkot tancap gas (dipercepat ke depan), pengharum itu miring ke mana?

Ke depan, karena ikut terdorong mesin.

Ke belakang.

Tetap tegak lurus ke bawah.

Berayun ke kiri dan kanan.

Ke belakang. Dari jalan: tali harus *menarik* pengharum ke depan agar ikut dipercepat, jadi tali harus miring dengan ujung atasnya di depan, sehingga pengharumnya tertinggal di belakang. Dari dalam angkot: ada gaya semu ke belakang yang mendorong pengharum. Kedua cara memberi jawaban yang sama, yaitu $\tan\theta = a/g$.

RUMUS HIDUP

Akselerometer pengharum mobil

$$\tan\theta = \frac{a}{g}$$

Makin besar percepatan angkot, makin miring pengharumnya. Pengharum itu sebenarnya alat ukur percepatan!

a Percepatan angkot m/s²

θ Sudut miring tali dari vertikal °

SUDUT MIRING TALI DARI VERTIKAL

11,5

°

Angkot dipercepat **2** m/s² → pengharum miring **11,5**° dari arah tegak. Coba tebak berapa sudutnya saat a = g!

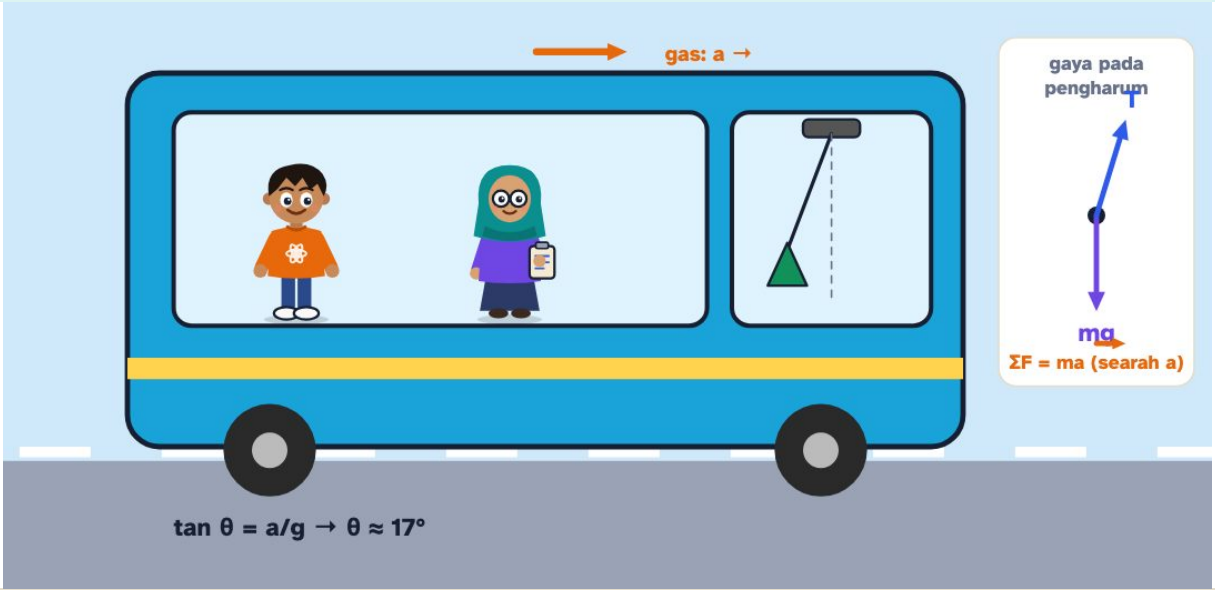
Cek satuan: Dari dalam angkot, tali menunjuk arah **gravitasi efektif** $g_{\text{ef}} = g - a$, dengan besar $\sqrt{g^2 + a^2}$.

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

LAB MINI

Angkot dan pengharum gantung: dua cara melihat

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-6



Kecepatan angkot	Percepatan nyata	Sudut pengharum
42 km/jam	3 m/s²	20,8 °

Pandangan
dari pinggir jalan (kerangka inersial)

Geser pedal (gas atau rem), lalu ganti sudut pandang. **Dari jalan:** hanya ada tegangan tali dan berat. **Dari dalam angkot:** muncul gaya semu ungu yang membuat semua gaya seimbang.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Gaya semu **tidak punya pasangan reaksi** (karena tidak ada benda yang mengerjakannya), dan hanya boleh dipakai di dalam kerangka yang dipercepat. Kalau kamu menganalisis dari pinggir jalan, **jangan** menambahkan gaya semu. Mencampur dua cara pandang dalam satu soal adalah kesalahan paling sering di olimpiade.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

TRIK KERANGKA ACUAN

Soal katrol di dalam lift yang dipercepat ke atas dengan a? Masuk ke kerangka lift dan ganti g dengan $g_{\text{ef}} = g + a$. Mesin Atwood di lift langsung menjadi soal biasa: $T = \dfrac{2m_1 m_2\, g_{\text{ef}}}{m_1 + m_2}$. Pada Bab 7 kamu akan bertemu gaya semu yang paling terkenal: **gaya sentrifugal** di komidi putar dan tikungan.

Ojek berboncengan

Dengan gaya mesin yang sama, motor yang memboncengkan dua orang dipercepat lebih lambat. Itu Hukum II: $a = F/m$.

Lomba perahu bidar

Puluhan pendayung di Sungai Musi mendorong air ke belakang bersamaan, sehingga air mendorong perahu ke depan (Hukum III).

Lift gedung tinggi

Perut terasa "melayang" saat lift mulai turun, karena gaya normal pada tubuh mengecil sesaat.

Tarik tambang 17 Agustus

Gaya tarik kedua tim pada tali sama besar. Pemenangnya ditentukan oleh hal lain. Penasaran? Lihat teka-teki di akhir bab!

Cek Cepat

Sebuah bola menggelinding di lantai makin pelan lalu berhenti. Penyebab utamanya adalah...

- gaya dorong bola habis
- massa bola berkurang
- gaya gesek lantai dan udara
- bola ingin beristirahat

Gaya total 60 N bekerja pada kotak 12 kg. Percepatannya...

- 720 m/s^2
- 5 m/s^2
- 0,2 m/s^2
- 48 m/s^2

Pasangan aksi-reaksi yang benar adalah...

- berat buku dan gaya normal meja pada buku
- gaya dorongmu pada meja dan gesekan lantai pada meja
- berat apel dan tegangan tangkai
- gaya Bumi menarik apel dan gaya apel menarik Bumi

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. D

Tantangan Rumah: koin pemberani

Bahan: gelas, kartu remi atau karton tipis, koin Rp500

1. Letakkan kartu di atas mulut gelas, lalu letakkan koin tepat di tengah kartu.
2. Sentil kartu secara mendatar dengan cepat dan keras.
3. Ulangi, tetapi kini tarik kartu **perlahan-lahan**.

Pertanyaan: Mengapa koin jatuh ke dalam gelas saat kartu disentil cepat, tetapi ikut terbawa saat kartu ditarik pelan? Hukum Newton yang mana yang bekerja? (Petunjuk: berapa lama gaya gesek kartu sempat bekerja pada koin?)

RINGKASAN KILAT **Bab 6 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan gaya sebagai tarikan atau dorongan dan menggambar **diagram benda bebas**

- memakai **Hukum I** (kelembaman), **Hukum II** ($\Sigma F = ma$), dan **Hukum III** (aksi-reaksi) untuk peristiwa sehari-hari
- membedakan **massa** dan **berat**, lalu menghitung angka timbangan di dalam lift
- menyelesaikan soal katrol dan bidang datar dengan "lima langkah sakti"
- memakai **gaya semu** untuk menganalisis gerak dari dalam kendaraan yang dipercepat

🔑 Istilah kunci

gaya | diagram benda bebas | kelembaman | aksi-reaksi | kerangka inersial | kerangka non-inersial | gaya semu

🧮 Rumus penting

$$\Sigma F = 0 \iff v = \text{tetap}$$

Hukum I Newton (syarat diam atau GLB). Gaya total nol ⇔ kecepatan tidak berubah (diam tetap diam, bergerak tetap bergerak).

$$a = \frac{\Sigma F}{m}$$

Hukum II Newton. Percepatan = gaya total dibagi massa. Didorong makin kuat, makin ngebut. Makin berat, makin susah dipercepat.

$$N = m\,(g + a)$$

Angka timbangan di dalam lift. Lift dipercepat ke atas → timbangan menekan lebih kuat (terasa berat). Dipercepat ke bawah → terasa ringan.

$$a = \frac{m_B\,g - \mu\,m_A\,g}{m_A + m_B}$$

Sistem meja–katrol (dengan gesekan). Yang menarik: berat balok B. Yang menghambat: gesekan pada balok A. Yang dipercepat: kedua balok sekaligus.

$$\tan\theta = \frac{a}{g}$$

Akselerometer pengharum mobil. Makin besar percepatan angkot, makin miring pengharumnya. Pengharum itu sebenarnya alat ukur percepatan!

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Di DBB hanya ada gaya yang bekerja pada benda itu.
- Berat buku w dan gaya normal meja N memang sama besar dan berlawanan arah, tetapi keduanya bukan pasangan aksi-reaksi, karena keduanya bekerja pada benda yang sama (buku).
- Gaya semu tidak punya pasangan reaksi (karena tidak ada benda yang mengerjakannya), dan hanya boleh dipakai di dalam kerangka yang dipercepat.

⛰️ 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=6

Teka-teki untuk Bab 7

Dalam lomba tarik tambang, gaya tarik tim merah pada tali **sama besar** dengan gaya tarik tim putih (Hukum III, karena talinya ringan). Lalu bagaimana mungkin ada tim yang menang?

▼ **Intip petunjuk**

Lihat kaki para pemain, bukan talinya. Gaya apa yang bekerja antara sandal dan tanah? Jawaban lengkapnya ada di Bab 7: Gesekan.

BAB 7 · GERAK & GAYA

07 Gesekan & Gerak Melingkar: Rahasia Tarik Tambang dan Tong Setan

Siapa sebenarnya pemenang tarik tambang? Mengapa pembalap di Mandalika memiringkan motornya, dan mengapa motor di tong setan tidak jatuh dari dinding? Jawabannya ada pada dua "pahlawan tak terlihat": gaya gesek dan gaya sentripetal.

Setelah bab ini, kamu bisa

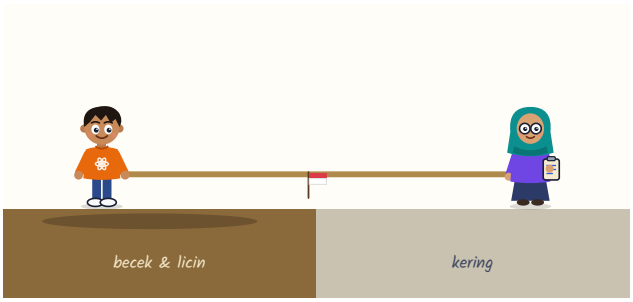
- membedakan gesekan **statis** dan **kinetis**, lalu memakai $f_s \leq \mu_s N$ dan $f_k = \mu_k N$;
- menganalisis benda di **bidang miring** dan menentukan sudut kritis $\tan\theta_c = \mu_s$;
- memakai besaran sudut (radian, ω, f, T) dan hubungan $v = \omega r$;
- menghitung **gaya sentripetal** pada tikungan datar, tikungan miring, dan tong setan;
- menganalisis gerak melingkar vertikal (kora-kora, roller coaster) tanpa memakai "gaya sentrifugal" yang keliru.

RAHASIA TARIK TAMBANG

KOMIK · 4 PANEL

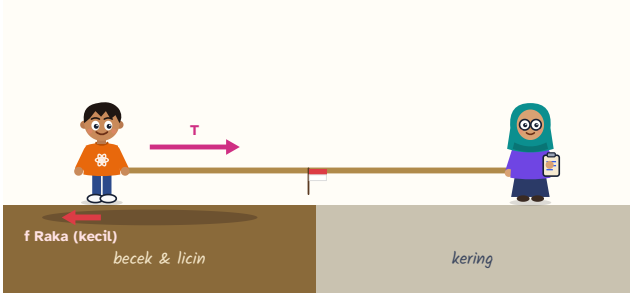
7.1 Gesekan statis dan kinetis: jawaban teka-teki tarik tambang

Ingat teka-teki di akhir Bab 6? Dalam tarik tambang, tali yang ringan menarik kedua tim dengan gaya yang **sama besar**. Jadi tali tidak menentukan pemenang. Mari kita lihat gaya-gaya *pada setiap tim*, persis dengan diagram benda bebas yang kamu pelajari di Bab 6.

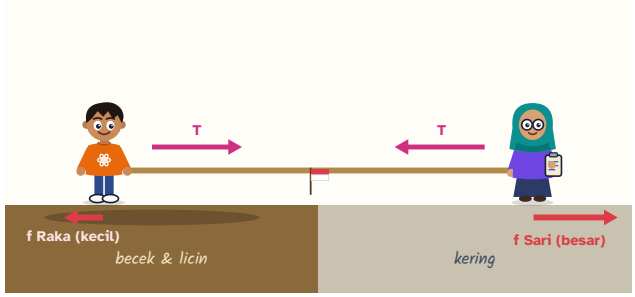


Langkah 1. Raka berdiri di tanah becek dengan sandal jepit. Sari berdiri di tanah kering dengan sepatu bergerigi. Siapa yang menang?

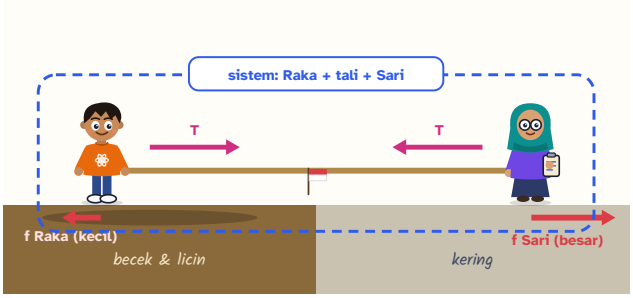
Langkah 2. Kedua tim menarik ujung-ujung tali. Karena talinya ringan, tarikan di kedua ujung sama besar, T. Tali tidak "memihak".



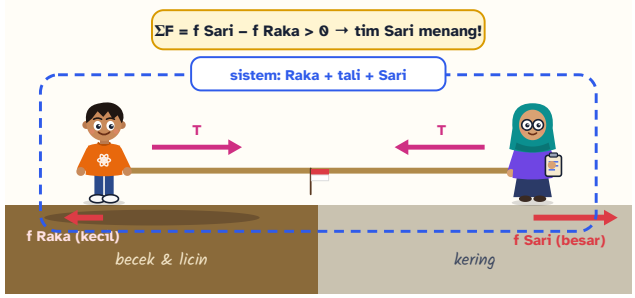
Langkah 3. Diagram gaya Raka (arah mendatar): tali menarik Raka ke kanan dengan T, dan tanah menggesek kaki Raka ke kiri. Di lumpur licin, gesekan ini **kecil**.



Langkah 4. Diagram gaya Sari: tali menarik Sari ke kiri dengan T, dan tanah kering menggesek kaki Sari ke kanan. Gesekan ini bisa **jauh lebih besar**.



Langkah 5. Sekarang lihat keduanya sebagai satu sistem. Gaya T adalah gaya *di dalam* sistem, jadi saling meniadakan. Gaya luar mendatar yang tersisa hanyalah dua gaya gesek dari tanah.



Langkah 6. Gaya total mengarah ke kanan, sehingga seluruh sistem dipercepat ke arah Sari. **Pemenang tarik tambang adalah tim yang mendapat gaya gesek terbesar dari tanah.**

Bahasa sederhana · Gampangnya: tali menarik kedua tim sama kuat. Yang menang adalah tim yang kakinya paling "mencengkeram" tanah. Sepatu bergerigi di tanah kering mencengkeram jauh lebih kuat daripada sandal di lumpur.

Gaya gesek muncul karena permukaan benda tidak pernah benar-benar mulus. Dilihat dengan mikroskop, permukaan yang tampak licin pun penuh tonjolan kecil yang saling mengait dan "menempel". Gaya gesek selalu **sejajar** permukaan dan melawan gerak (atau kecenderungan gerak) **relatif** antara kedua permukaan.

	Gesekan statis f_s	**Gesekan kinetis f_k**
Kapan?	Permukaan belum saling bergeser	Permukaan sedang saling bergeser

Besarnya	Menyesuaikan diri: $0 \leq f_s \leq \mu_s N$	Hampir tetap: $f_k = \mu_k N$
Contoh	Lemari yang didorong tetapi belum bergeser; kaki yang mendorong tanah saat berjalan	Kardus yang sedang meluncur di lantai; ban yang selip

N adalah gaya normal (Bab 6), sedangkan μ_s dan μ_k adalah **koefisien gesek** statis dan kinetis. Koefisien gesek tidak bersatuan dan bergantung pada **pasangan** permukaannya. Biasanya $\mu_k < \mu_s$: sekali benda bergerak, menjaganya tetap bergerak lebih mudah daripada memulainya.

Tebak Dulu!

Raka mendorong lemari 50 kg dengan gaya mendatar 100 N, tetapi lemari tidak bergeser sedikit pun. Koefisien gesek statisnya 0,4 ($g = 9{,}8$ m/s²). Berapa gaya gesek lantai pada lemari?

196 N, karena $f = \mu_s N = 0{,}4 \times 50 \times 9{,}8$.

0 N, karena lemari tidak bergerak.

100 N, berlawanan arah dengan dorongan Raka.

Lebih dari 100 N, karena gesekan "menang".

Jawabannya: 100 N. Lemari diam, jadi gaya totalnya nol (Hukum I). Gesekan statis harus tepat mengimbangi dorongan: 100 N. Angka 196 N hanyalah **batas maksimum** gesekan statis. Jika Raka mendorong 150 N, gesekannya ikut menjadi 150 N. Baru setelah dorongan melebihi 196 N, lemari mulai bergeser. Gesekan statis itu "penurut": ia hanya sekuat yang diperlukan.

RUMUS HIDUP

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).

- μ_s Koefisien gesek statis
- m Massa benda kg
- $f_{s,\text{maks}}$ Gesekan statis maksimum N

GESEKAN STATIS MAKSIMUM

196

N

Lemari **50** kg di lantai dengan μs = **0,4**: dorongan harus melebihi **196** N agar lemari mulai bergeser. Dorongan yang lebih kecil dilawan gesekan statis yang sama besar.

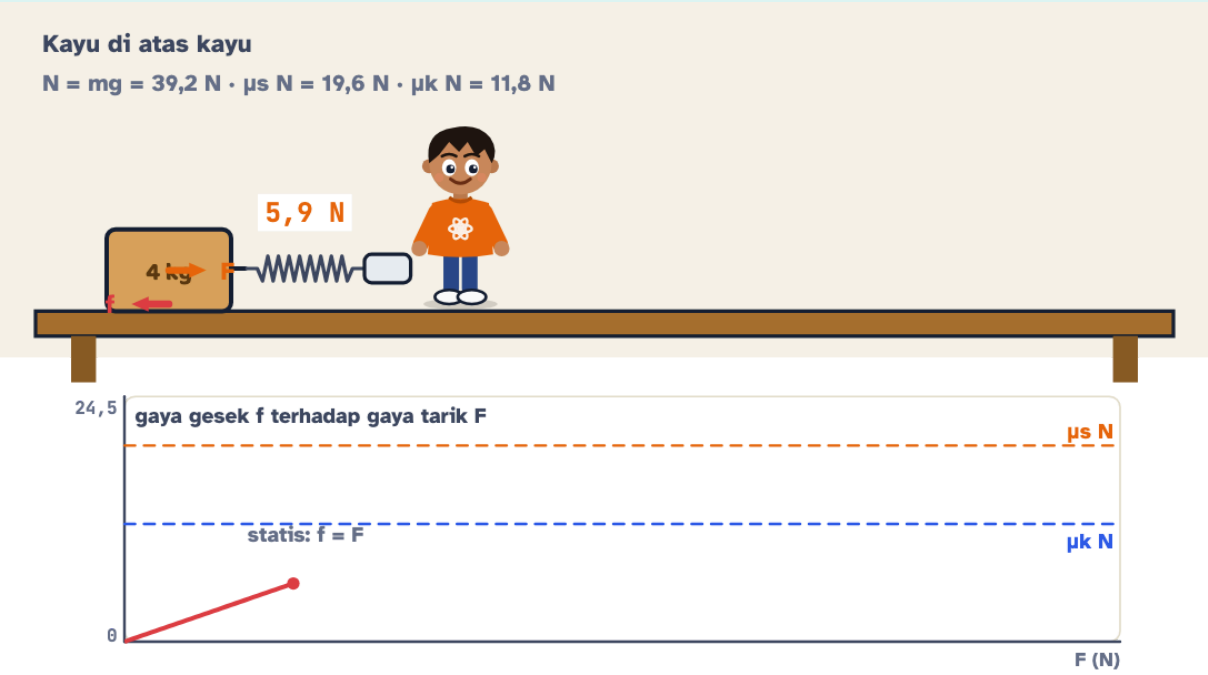
Satuan Nusantara: ≈ 80% dari berat karung beras 25 kg · ≈ 40% dari berat orang 50 kg · ≈ 2% dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: μ_s tidak bersatuan, jadi satuan gesekan sama dengan satuan gaya normal: newton.

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

LAB MINI **Tarik balok dengan neraca pegas**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-7



Bacaan neraca F	Gaya gesek f	Kecepatan balok
5,9 N	5,9 N	0 m/s

Keadaan
Diam: gesekan statis menahan

Mode **gaya naik terus**: amati grafik gesekan terhadap gaya tarik. Ada "puncak" sebelum balok mulai bergeser! Mode **tangan bergerak pelan** meniru percobaan di laboratorium sekolah: perhatikan angka neraca yang naik-turun saat balok "tersendat". Fenomena yang sama membuat engsel pintu berderit dan sepatu berdecit.

Pasangan permukaan (kira-kira)	μ_s	μ_k
Karet ban di beton/aspal kering	1,0	0,8
Karet ban di aspal basah	±0,6	±0,4
Kaca di atas kaca	0,94	0,4
Baja di atas baja (kering)	0,74	0,57
Kayu di atas kayu	0,25–0,5	±0,2
Es di atas es	0,1	0,03

Lapisan antilengket wajan (PTFE) di atas PTFE	0,04	0,04
Sendi lutut manusia (berpelumas cairan sendi)	0,01	0,003

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Rumus $f_s = \mu_s N$ **bukan** rumus gesekan statis, melainkan rumus **batas maksimumnya**. Langkah aman: (1) anggap benda diam, lalu hitung gesekan yang diperlukan dari $\Sigma F = 0$; (2) bandingkan dengan $\mu_s N$. Jika yang diperlukan lebih kecil, benda memang diam. Jika lebih besar, benda bergerak dan gesekannya menjadi $f_k = \mu_k N$.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Sekitar tahun 1500, Leonardo da Vinci menulis di buku catatannya bahwa gesekan sebanding dengan berat benda dan tidak bergantung pada luas bidang sentuh. Catatannya baru ditemukan berabad-abad kemudian. Guillaume Amontons menemukan ulang hukum ini pada 1699. Charles-Augustin de Coulomb (1781), orang yang sama dengan hukum Coulomb di Bab 22, lalu membedakan gesekan statis dan kinetis. Itulah sebabnya model $f = \mu N$ sering disebut "gesekan Coulomb".

7.2 Bidang miring dan sudut kritis

Letakkan buku di atas papan, lalu angkat salah satu ujung papan perlahan. Awalnya buku diam, lalu pada sudut tertentu buku tiba-tiba meluncur. Untuk memahaminya, uraikan berat mg menjadi dua komponen:

- sejajar lereng (menarik benda turun): $mg \sin\theta$;
- tegak lurus lereng (menekan permukaan): $mg \cos\theta$, sehingga $N = mg \cos\theta$.

Benda tetap diam selama $mg \sin\theta \leq \mu_s\, mg \cos\theta$, yaitu $\tan\theta \leq \mu_s$. Kemiringan saat benda *tepat akan* meluncur disebut **sudut kritis** (atau sudut *repose*):

RUMUS HIDUP **Sudut kritis bidang miring**

$$\tan \theta_c = \mu_s$$

Kemiringan saat benda tepat akan meluncur hanya bergantung pada koefisien gesek, tidak pada massa benda!

μ_s Koefisien gesek statis

θ_c Sudut kritis °

SUDUT KRITIS

26,6

°

Dengan μs = **0,5**, benda mulai meluncur saat lereng dimiringkan lebih dari **26,6°**. Benda berat dan ringan dari bahan yang sama meluncur pada sudut yang sama.

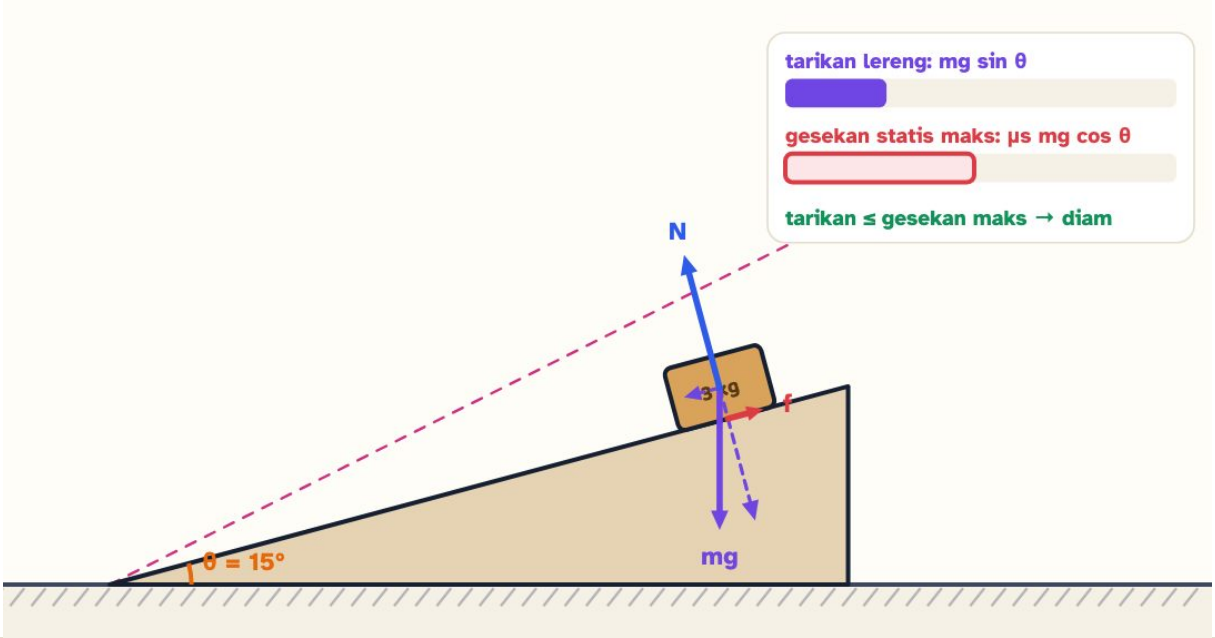
Cek satuan: μ_s tidak bersatuan, sehingga θ_c murni sebuah sudut.

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

Setelah meluncur, gesekannya menjadi kinetis, sehingga percepatan benda menuruni lereng adalah $a = g(\sin\theta - \mu_k \cos\theta)$.

LAB MINI Bidang miring: kapan balok mulai meluncur?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-7



mg sin θ (ke bawah lereng)	Gesekan statis maks	Percepatan
7,6 N	14,2 N	0 m/s²

Keadaan
Diam: gesekan statis menahan

Tekan **Naikkan sudut perlahan**, lalu catat sudut saat balok mulai meluncur. Bandingkan dengan Rumus Hidup sudut kritis di atas. Ubah massa balok: apakah sudut kritisnya berubah? Lihat diagram batang: kapan "tarikan lereng" mengalahkan "gesekan maksimum"?

KERJAKAN BERSAMA Perosotan di taman bermain

Perosotan miring 37° ($\sin 37^\circ \approx 0{,}6$, $\cos 37^\circ \approx 0{,}8$). Koefisien gesek kinetis antara celana dan perosotan 0,25. Berapa percepatan anak yang meluncur? Gunakan $g = 10$ m/s².

1. Gaya sejajar lereng ke bawah: $mg \sin\theta = m(10)(0{,}6) = 6m$.
2. Gaya normal: $N = mg\cos\theta = 8m$, sehingga $f_k = 0{,}25 \times 8m = 2m$ ke atas lereng.
3. $\Sigma F = 6m - 2m = 4m = ma$ → $a = 4$ m/s².

Percepatannya 4 m/s², berapa pun massa anaknya. Massa muncul di setiap suku sehingga saling meniadakan, seperti pada jatuh bebas.

FISIKA INDONESIA: LERENG, PASIR, DAN LONGSOR

Tumpukan pasir kering di toko bangunan selalu membentuk kerucut dengan kemiringan sekitar 30–35°. Itulah sudut kritis butiran pasir. Saat musim hujan, air yang meresap ke tanah lereng membuat butiran lebih mudah tergelincir satu sama lain dan menambah beban tanah. Lereng yang tadinya aman bisa melewati sudut kritisnya dan longsor. Itulah sebabnya terasering, tanaman berakar kuat, dan saluran air sangat penting untuk lereng-lereng di Indonesia.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BALOK DI ATAS BALOK

Balok A (massa m) diletakkan di atas balok B (massa M) yang berada di lantai licin. Koefisien gesek statis antara A dan B adalah μ_s. Jika B ditarik dengan gaya F, satu-satunya gaya mendatar yang mempercepat A adalah gesekan dari B. Percepatan maksimum A tanpa tergelincir adalah $a_{\text{maks}} = \mu_s g$. Agar keduanya bergerak bersama, $F \leq (m + M)\,\mu_s g$. Jika F lebih besar, B "lolos" dari bawah A, seperti taplak yang ditarik cepat dari bawah piring. Perhatikan: gesekan pada A justru **searah** geraknya!

7.3 Gesekan: kawan atau lawan?

Gesekan sering dianggap pengganggu. Padahal tanpa gesekan kamu tidak bisa berjalan, menulis, mengikat tali sepatu, atau mengerem motor. Saat kamu melangkah, telapak kakimu mendorong tanah ke belakang. Gesekan statis dari tanah mendorong kakimu ke **depan** (ingat Hukum III di Bab 6). Gesekan itulah yang membuatmu maju!

Gesekan yang menguntungkan	Gesekan yang merugikan
Ban mencengkeram jalan saat melaju, berbelok, dan mengerem	Mesin cepat aus dan panas, sehingga perlu oli
Alur ban membuang air agar ban tetap menapak di jalan basah	Rantai sepeda yang kering boros tenaga dan cepat rusak
Sol sandal dan sepatu bergerigi agar tidak terpeleset	Gesekan udara memperlambat kendaraan dan memboroskan bahan bakar
Menulis dengan pensil atau kapur di papan tulis	Lantai kamar mandi yang licin justru kekurangan gesekan

TRIK KAK NARA: REM ABS DAN "JANGAN SAMPAI SELIP"

Karena $\mu_s > \mu_k$, ban yang **masih menggelinding** (titik sentuhnya diam sesaat terhadap jalan, sehingga gesekannya statis) mengerem lebih kuat daripada ban yang terkunci dan selip (gesekan kinetis). Sistem rem ABS memompa rem berkali-kali per detik agar roda tidak terkunci. Bonusnya, roda yang masih berputar tetap bisa dibelokkan.

KERJAKAN BERSAMA **Panjat pinang berlumur oli**

Peserta panjat pinang bermassa 50 kg bertahan diam memeluk batang pinang tegak. Ia menjepit batang dengan tangan dan kaki, sehingga total gaya normal pada batang adalah N. Gunakan $g = 10$ m/s². Berapa N minimum jika (a) batang bersih dengan $\mu_s = 0{,}6$; (b) batang dilumuri oli sehingga $\mu_s = 0{,}15$?

1. Batang tegak, jadi gaya normalnya mendatar (dari jepitan). Satu-satunya gaya ke atas adalah gesekan statis, yang harus mengimbangi berat: $f_s = mg = 500$ N.
2. Syarat tidak merosot: $\mu_s N \geq 500$ N, sehingga $N_{\min} = 500/\mu_s$.
3. (a) $N_{\min} = 500/0{,}6 \approx 833$ N.
4. (b) $N_{\min} = 500/0{,}15 \approx 3.333$ N, empat kali lebih besar! Hampir mustahil dijepit sekuat itu.

Oli menurunkan μ sehingga jepitan yang dibutuhkan melonjak. Karena itu peserta membentuk "menara manusia": peserta di bawah menopang yang di atas, dan sedikit demi sedikit oli terhapus oleh baju mereka.

FISIKA INDONESIA: PANJAT PINANG

Panjat pinang adalah lomba khas 17 Agustus. Batang pinang dilumuri oli atau gemuk, lalu hadiah digantung di puncaknya. Strateginya murni fisika: kurangi "beban" peserta yang memanjat dengan menara manusia, gosok oli dengan kain atau baju untuk menaikkan μ, dan bekerja sama. Satu orang sekuat apa pun hampir mustahil menang sendirian.

MITOS

"Gaya gesek selalu melawan arah gerak benda."

FAKTA

Gesekan melawan gerak **relatif** antara dua permukaan. Saat kamu berjalan, gesekan tanah pada kaki justru mengarah ke depan. Kardus di bak truk yang mulai melaju juga didorong ke depan oleh gesekan.

MITOS

"Makin luas permukaan yang bersentuhan, makin besar gesekannya."

FAKTA

Dalam model sederhana, gesekan hanya bergantung pada μ dan gaya normal, bukan luas. Balok bata yang diletakkan rebah atau berdiri butuh dorongan yang hampir sama untuk digeser.

7.4 Besaran sudut: radian, kecepatan sudut, periode

Untuk benda yang berputar, lebih mudah mengukur **sudut** daripada jarak. Fisikawan mengukur sudut dalam **radian**: sudut θ (rad) = panjang busur s dibagi jari-jari r. Satu putaran penuh = $2\pi r/r = 2\pi$ rad = 360°, jadi 1 rad ≈ 57,3°.

Besaran	Simbol & rumus	Satuan	Arti
Periode	T	s	waktu untuk satu putaran
Frekuensi	$f = 1/T$	Hz (putaran/s)	banyaknya putaran tiap sekon
Kecepatan sudut	$\omega = \dfrac{\Delta\theta}{\Delta t} = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi f$	rad/s	sudut yang disapu tiap sekon
Kecepatan linear	$v = \omega r$	m/s	kelajuan titik sejauh r dari poros

Semua titik pada bianglala (kincir ria) punya ω yang sama, tetapi penumpang di ujung bergerak paling cepat karena r-nya paling besar. Mesin dan kipas angin sering memakai satuan rpm (putaran per menit): $\omega = 2\pi \times \mathrm{rpm}/60$.

TRIK KAK NARA: RANTAI SAMA V, POROS SAMA Ω

Roda-roda yang dihubungkan **rantai atau sabuk** (gir depan dan gir belakang sepeda) punya kecepatan linear tepi yang sama: $\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$. Roda-roda pada **satu poros** (gir belakang dan roda belakang) punya kecepatan sudut yang sama. Itulah sebabnya gir belakang yang kecil membuat roda berputar lebih cepat.

FAKTA UNIK DARI TARSI

Bumi berputar sekali dalam ±24 jam. Orang di Tugu Khatulistiwa, Pontianak, berjarak ±6.378 km dari sumbu Bumi, sehingga ikut bergerak dengan $v = \omega r \approx 465$ m/s, sekitar 1.670 km/jam! Di dekat kutub, kecepatannya hampir nol. Indonesia yang dilintasi garis khatulistiwa termasuk wilayah "tercepat" di permukaan Bumi.

CONTOH **Roda motor**

Roda motor berjari-jari 0,3 m berputar 10 kali setiap sekon. Berapa periode, kecepatan sudut, dan kelajuan motor (anggap roda tidak selip)?

1. Frekuensi $f = 10$ Hz, sehingga periode $T = 1/10 = 0{,}1$ s.
2. $\omega = 2\pi f = 2\pi(10) \approx 62{,}8$ rad/s.
3. Roda yang tidak selip memindahkan motor sejauh satu keliling setiap putaran: $v = \omega r = 62{,}8 \times 0{,}3 \approx 18{,}8$ m/s.

Motor melaju ±18,8 m/s, kira-kira 68 km/jam.

7.5 Percepatan dan gaya sentripetal

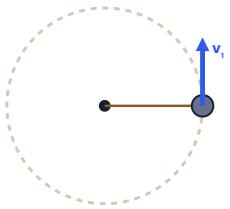
Benda yang bergerak melingkar dengan kelajuan tetap ternyata tetap mengalami **percepatan**! Kecepatan adalah vektor, dan arahnya terus berubah. Perubahan arah itu menunjuk ke **pusat lingkaran**, sehingga disebut **percepatan sentripetal** ("mencari pusat").

Tebak Dulu!

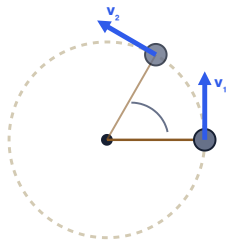
Raka memutar batu yang diikat tali di atas kepalanya (lingkaran mendatar). Tiba-tiba tali putus. Ke mana batu itu terbang (dilihat dari atas)?

- Lurus menjauhi pusat lingkaran, terlempar keluar.
- Tetap melingkar sebentar, lalu lurus.
- Lurus, menyinggung lingkaran di titik tempat tali putus.
- Berputar spiral makin jauh dari pusat.

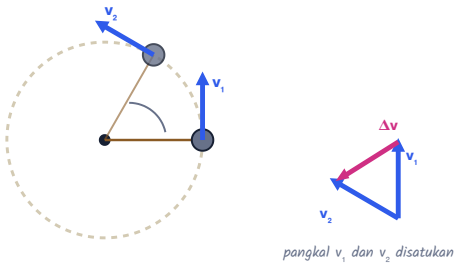
Jawabannya: lurus menyinggung lingkaran. Begitu tali putus, tidak ada lagi gaya ke pusat. Menurut Hukum I Newton, batu meneruskan geraknya dengan kecepatan saat itu, yang arahnya menyinggung lingkaran. Tidak ada "gaya sentrifugal" yang melemparnya keluar. Batu tampak menjauhi pusat hanya karena ia bergerak lurus, sementara lingkarannya melengkung.



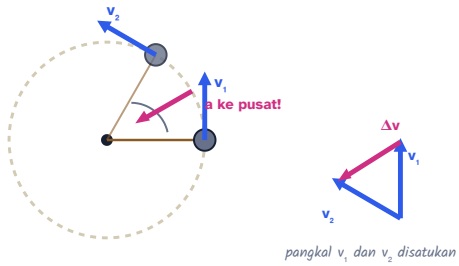
Langkah 1. Dilihat dari atas, batu berputar berlawanan arah jarum jam. Kecepatannya v_1 selalu **menyinggung** lingkaran, tegak lurus tali.



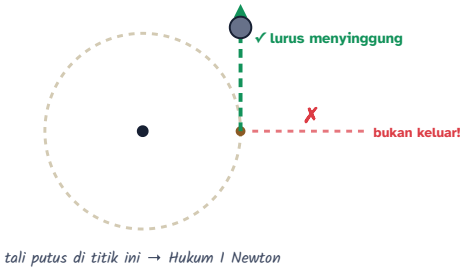
Langkah 2. Sesaat kemudian batu sudah di posisi lain, dengan kecepatan v_2. Besarnya sama, tetapi **arahnya** berbeda.



Langkah 3. Satukan pangkal v_1 dan v_2. Perubahan kecepatan Δv adalah panah dari ujung v_1 ke ujung v_2.



Langkah 4. Pindahkan Δv ke tengah lintasan: arahnya tepat **menuju pusat**! Karena percepatan searah Δv, percepatannya juga menuju pusat. Tali memberi gaya tarik ke pusat itu.



Langkah 5. Jika tali putus, gaya ke pusat hilang. Batu bergerak lurus menyinggung lingkaran (Hukum I), bukan terlempar keluar.

Besarnya percepatan sentripetal adalah:

RUMUS HIDUP **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× → percepatan 4×!

v Kelajuan m/s | r Jari-jari lintasan m | a_s Percepatan sentripetal m/s²

PERCEPATAN SENTRIPETAL

4,5

m/s²

Bergerak **15** m/s pada lingkaran berjari-jari **50** m → percepatan ke pusat **4,5** m/s². Untuk motor dan pengendara 150 kg, gaya ke pusat yang dibutuhkan adalah 150 × **4,5** N.

Cek satuan: $\frac{(\mathrm{m/s})^2}{\mathrm{m}} = \mathrm{m/s^2}$

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

Menurut Hukum II Newton, harus ada **gaya sentripetal** $F_s = m\frac{v^2}{r}$ yang menuju pusat. Gaya sentripetal **bukan jenis gaya baru**. Ia adalah peran yang dimainkan gaya-gaya biasa: tegangan tali (batu diputar), gesekan ban (motor menikung), gaya normal dinding (tong setan), atau gravitasi (Bulan mengelilingi Bumi).

⚠️ **AWAS JEBAKAN: "GAYA SENTRIFUGAL"**

Saat angkot menikung tajam, tubuhmu terasa "terlempar" ke sisi luar. Tidak ada gaya yang mendorongmu keluar! Tubuhmu hanya ingin terus lurus (kelembaman), sedangkan angkotnya berbelok. Dinding angkot lalu mendorongmu ke **dalam** sebagai gaya sentripetal. "Gaya sentrifugal" hanyalah *gaya semu* yang muncul jika kamu menganalisis dari dalam angkot yang berputar (ingat trik kerangka acuan di Bab 6). Jangan gambar gaya sentrifugal di diagram benda bebas!

CONTOH **Motor di bundaran**

Kak Nara (total dengan motor 150 kg) mengitari bundaran berjari-jari 20 m dengan kelajuan tetap 10 m/s. Berapa percepatan dan gaya sentripetalnya? Gaya apa yang menyediakannya?

1. $a_s = v^2/r = 10^2/20 = 5$ m/s².
2. $F_s = ma_s = 150 \times 5 = 750$ N, menuju pusat bundaran.
3. Gaya ini berasal dari **gesekan statis** antara ban dan aspal, yang mengarah ke pusat.

Gesekan ban harus menyediakan 750 N ke arah pusat. Jika jalan berpasir dan gesekan maksimum kurang dari 750 N, motor akan tergelincir ke sisi luar.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERCEPATAN TANGENSIAL

Jika kelajuan juga berubah (misalnya motor yang mengegas sambil menikung), ada **percepatan tangensial** $a_t = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ yang menyinggung lingkaran, di samping percepatan sentripetal $a_s = v^2/r$. Keduanya saling tegak lurus, sehingga percepatan total $a = \sqrt{a_s^2 + a_t^2}$. Jika kecepatan sudut berubah, besaran $\alpha = \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ disebut percepatan sudut, dengan $a_t = \alpha r$. Cengkeraman ban terbatas: percepatan totalnya tidak bisa melebihi μg. Mengerem keras sambil menikung "menghabiskan" jatah gesekan yang seharusnya untuk berbelok. Inilah sebabnya pengendara diajari mengerem *sebelum* masuk tikungan.

7.6 Tikungan datar, tikungan miring, dan tong setan

Tikungan datar: gesekan yang membelokkan

Di jalan datar, satu-satunya gaya mendatar pada mobil atau motor adalah gesekan statis ban. Syarat aman: $mv^2/r \leq \mu_s mg$. Jadi:

RUMUS HIDUP **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!

- μ_s Koefisien gesek ban–jalan
- r Jari-jari tikungan m
- v_{maks} Kecepatan maksimum m/s

KECEPATAN MAKSIMUM

19,8

m/s

Tikungan berjari-jari **50** m dengan μs = **0,8** → kecepatan maksimum **19,8** m/s. Kalikan 3,6 untuk mendapat km/jam. Massa kendaraan tidak berpengaruh!

Satuan Nusantara: ≈ 1,8 × ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 20% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 14 × jalan kaki santai

Cek satuan: $\sqrt{(\mathrm{m/s^2})(\mathrm{m})} = \mathrm{m/s}$

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

Tikungan miring dan motor yang dimiringkan

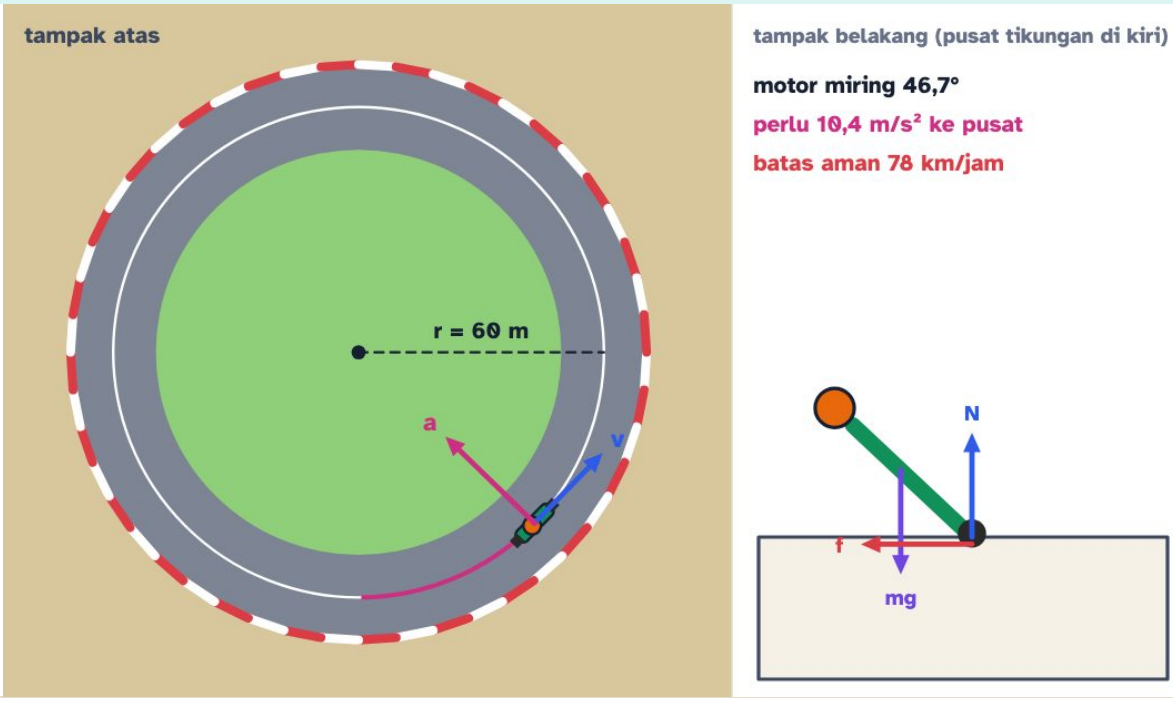
Jika jalan dibuat miring ke arah dalam dengan sudut θ, gaya normal ikut condong ke pusat. Komponen mendatarnya bisa menyediakan gaya sentripetal tanpa bantuan gesekan sama sekali, asalkan kendaraan melaju pada **kecepatan rancangan**:

$$\tan\theta = \frac{v^2}{r\,g} \qquad \Longleftrightarrow \qquad v_{\text{rancangan}} = \sqrt{r\,g\tan\theta}$$

Rumus yang sama menentukan seberapa miring pengendara harus memiringkan motornya di tikungan datar, dengan θ = sudut miring motor terhadap garis tegak. Makin cepat atau makin tajam tikungannya, makin miring motornya.

LAB MINI **Tikungan sirkuit: aman atau tergelincir?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-7



Percepatan ke pusat perlu	Kecepatan maks aman	Kemiringan motor	Keadaan
10,42 m/s²	78 km/jam	46,7 °	Menikung…

Atur kecepatan, jari-jari tikungan, koefisien gesek, dan kemiringan jalan, lalu jalankan. Panel kanan menunjukkan pandangan dari belakang motor: gaya normal, gesekan, dan berat. Coba jalan basah (μ kecil) dengan kecepatan yang sama. Kemudian miringkan jalannya: apakah kecepatan maksimumnya naik?

FISIKA INDONESIA: SIRKUIT MANDALIKA

Sejak 2021, Sirkuit Mandalika di Lombok, Nusa Tenggara Barat, menjadi tuan rumah balapan motor kelas dunia. Di tikungan, pembalap memiringkan motornya lebih dari 60° terhadap garis tegak, sampai lutut dan siku hampir menyentuh aspal. Dari $\tan\theta = v^2/(rg)$, kemiringan 60° berarti ban harus menyediakan gaya ke pusat sekitar $\tan 60^\circ \approx 1{,}7$ kali berat motor dan pembalapnya! Itulah sebabnya ban balap dibuat khusus agar sangat lengket, dan dipanaskan sebelum balapan.

Tong setan: menempel di dinding

Di pasar malam, pengendara tong setan melaju di dinding tegak sebuah tong kayu raksasa. Dinding mendorong motor ke arah pusat (gaya normal), dan gaya inilah gaya sentripetalnya: $N = mv^2/r$. Berat motor ditahan oleh **gesekan statis** yang mengarah ke atas. Syarat tidak merosot: $\mu_s N \geq mg$, sehingga $\mu_s\, mv^2/r \geq mg$.

RUMUS HIDUP

Kecepatan minimum di tong setan

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{g\,r}{\mu_s}}$$

Makin cepat motor, makin keras dinding mendorongnya, makin besar gesekan yang menahannya agar tidak merosot. Terlalu pelan? Motor merosot ke dasar.

- r Jari-jari tong m
- μ_s Koefisien gesek ban–kayu
- $v_{\min}$ Kecepatan minimum m/s

KECEPATAN MINIMUM

7,5

m/s

Tong berjari-jari **4** m dengan μs = **0,7** → motor harus melaju minimal **7,5** m/s agar tidak merosot. Massa pengendara tidak berpengaruh!

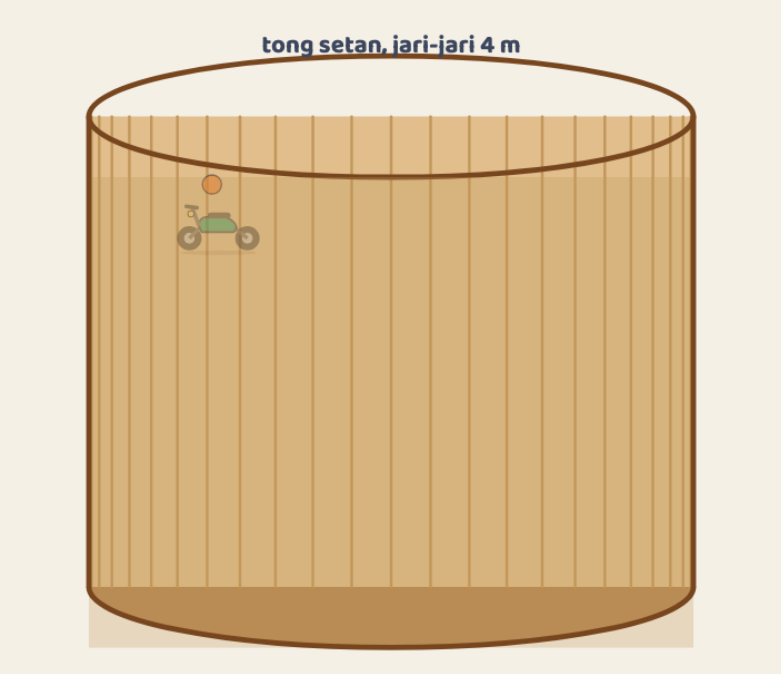
Satuan Nusantara: ≈ 68% dari ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 5,3 × jalan kaki santai · ≈ 8% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\sqrt{(\mathrm{m/s^2})(\mathrm{m})} = \mathrm{m/s}$, sedangkan μ_s tidak bersatuan.

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

LAB MINI Tong setan: berapa kecepatan minimumnya?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-7



Dorongan dinding N	Gesekan maks μs N	Kecepatan minimum	Keadaan
5.859 N	3.516 N	29 km/jam	Menempel di dinding

Jalankan, lalu turunkan kecepatan motor pelan-pelan dengan slider. Pada kecepatan berapa motor mulai merosot? Bandingkan dengan Rumus Hidup di atas. Diagram batang membandingkan berat motor dengan gesekan maksimum.

COBA SENDIRI Tong setan di pasar malam

Tong setan berdiameter 8 m. Koefisien gesek statis antara ban dan papan kayu 0,6. (a) Berapa kecepatan minimum motor agar tidak merosot ($g = 9{,}8$ m/s²)? (b) Jika pengendara melaju 12 m/s, berapa kali berat badannya gaya dorong dinding pada motor?

1. Jari-jari $r = 4$ m. (a) $v_{\min} = \sqrt{gr/\mu_s} = \sqrt{9{,}8 \times 4/0{,}6} \approx 8{,}1$ m/s, sekitar 29 km/jam.
2. (b) Gaya normal $N = mv^2/r$. Bandingkan dengan berat: $\dfrac{N}{mg} = \dfrac{v^2}{rg} = \dfrac{144}{4 \times 9{,}8} \approx 3{,}7$.
3. Pengendara "ditekan" ke dinding dengan gaya ±3,7 kali beratnya, seperti berbaring di lantai sambil ditindih tiga orang lagi!

(a) ±8,1 m/s. (b) Gaya normal ±3,7 kali berat. Karena jauh di atas kecepatan minimum, gesekan yang tersedia ($0{,}6 \times 3{,}7 \approx 2{,}2$ kali berat) lebih dari cukup untuk menahan motor.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TIKUNGAN MIRING DENGAN GESEKAN DAN AYUNAN KONIS

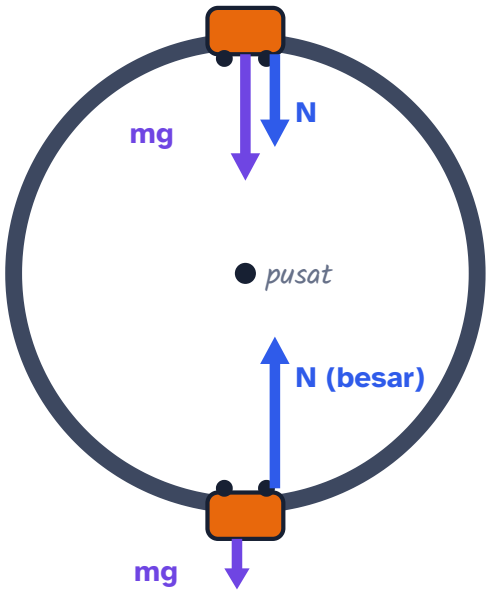
Jika tikungan miring θ juga punya gesekan μ_s, kecepatan maksimumnya

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{rg\,\frac{\sin\theta + \mu_s\cos\theta}{\cos\theta - \mu_s\sin\theta}}.$$

Untuk $\theta = 0$ rumus ini kembali menjadi $\sqrt{\mu_s g r}$. Wahana "kursi terbang" di pasar malam adalah **ayunan konis**: rantai sepanjang L membentuk sudut θ dengan garis tegak, dengan $\tan\theta = v^2/(rg)$. Periodenya $T = 2\pi\sqrt{L\cos\theta/g}$ (jika rantai digantung di sumbu putar), tidak bergantung pada massa penumpang. Penumpang gemuk dan kurus berayun pada sudut yang sama!

7.7 Lingkaran vertikal: kora-kora dan roller coaster

Pada lingkaran vertikal, gravitasi ikut "bermain". Ambil arah ke pusat sebagai positif:



Di puncak (kepala di bawah):

$N + mg = m\,v^2/r$

$N = 0$ saat $v = \sqrt{g\,r}$ → batas lolos

terasa ringan, bahkan melayang

Di titik terbawah:

$N - mg = m\,v^2/r$

$N = m(g + v^2/r) > mg$

terasa lebih berat, tertekan ke kursi

Gaya pada kereta roller coaster. Di puncak, gaya normal dan berat sama-sama mengarah ke bawah (ke pusat). Di dasar, gaya normal harus mengalahkan berat sekaligus menyediakan gaya sentripetal.

Di puncak lingkaran, kereta paling "kritis". Gaya normal tidak boleh negatif (rel hanya bisa *mendorong*), sehingga kecepatan di puncak minimal $v_{\text{puncak}} = \sqrt{gr}$. Jika lebih pelan, kereta akan lepas dari rel. Itulah sebabnya ember berisi air yang diputar cepat secara vertikal tidak tumpah. Di puncak, gerak melingkar menuntut percepatan ke pusat (ke bawah) sebesar v^2/r. Jika v^2/r lebih besar dari g, gravitasi saja tidak cukup, sehingga dasar ember justru ikut mendorong air ke bawah dan air tetap menempel di ember.

Wahana **kora-kora** (perahu ayun) bergerak pada busur lingkaran. Di titik terbawah, kelajuannya paling besar, sehingga kursi mendorongmu paling kuat dan kamu merasa "lebih berat". Di dekat puncak ayunan, kelajuan kecil dan gaya normal mengecil, sehingga perut terasa melayang, persis seperti di lift Bab 6.

COBA SENDIRI **Merasa lebih berat di kora-kora**

Sari (45 kg) duduk di kora-kora yang berayun pada lengan sepanjang 10 m. Di titik terbawah kelajuannya 9 m/s. Dengan $g = 9{,}8$ m/s², berapa gaya dorong kursi pada Sari, dan berapa "berat yang terasa" (dalam kg)?

1. Di titik terbawah, pusat lingkaran ada di atas Sari. Hukum II: $N - mg = mv^2/r$.
2. $N = m(g + v^2/r) = 45(9{,}8 + 81/10) = 45(17{,}9) \approx 806$ N.
3. "Berat terasa" = $N/g = 806/9{,}8 \approx 82$ kg, hampir dua kali massanya ($N/mg \approx 1{,}8$).

Kursi mendorong Sari ±806 N, sehingga ia merasa seberat ±82 kg, sekitar 1,8 kali berat biasanya. Massanya tetap 45 kg.

MITOS

"Di puncak loop roller coaster, ada gaya ke atas yang menahan penumpang agar tidak jatuh."

FAKTA

Di puncak, berat
dan
gaya normal sama-sama mengarah ke bawah. Penumpang sebenarnya sedang "jatuh" ke pusat lingkaran, tetapi bergerak ke samping cukup cepat sehingga lintasannya tetap melengkung mengikuti rel.

MITOS

"Air di mesin pengering terlempar keluar oleh gaya sentrifugal."

FAKTA

Tabung mendorong pakaian ke pusat. Air yang lolos lewat lubang tidak lagi didorong, sehingga bergerak lurus menyinggung tabung (Hukum I) dan keluar. Yang "hilang" adalah gaya ke pusat, bukan munculnya gaya keluar.

Ban beralur saat hujan

Alur ban membuang air dari bawah ban agar karet tetap menyentuh aspal. Ban gundul bisa "mengapung" di atas lapisan air dan kehilangan gesekan.

Rem ABS

Mencegah roda terkunci agar gesekan tetap statis (lebih besar) dan setir tetap bisa dikendalikan saat mengerem mendadak.

Bianglala & kora-kora

Wahana pasar malam adalah laboratorium gerak melingkar: terasa berat di bawah, terasa ringan di atas.

Mesin cuci pengering

Tabung berputar ±1.000 rpm. Air lolos lewat lubang karena tidak ada lagi yang mendorongnya ke pusat.

Tikungan jalan dimiringkan

Tikungan jalan raya dan jalan layang dibuat sedikit miring ke dalam agar kendaraan tidak hanya bergantung pada gesekan ban.

Cek Cepat

Lemari didorong 80 N tetapi tidak bergeser. Gaya gesek statis pada lemari adalah...

- 0 N
- lebih dari 80 N
- 80 N, berlawanan arah dorongan
- selalu sama dengan $\mu_s mg$

Saat kamu berjalan maju, gaya gesek lantai pada telapak kakimu mengarah...

- ke depan
- ke belakang
- ke atas
- tidak ada, karena kaki tidak tergelincir

Batu diputar dengan tali dalam lingkaran mendatar, lalu talinya putus. Batu akan bergerak...

- lurus menjauhi pusat
- tetap melingkar
- spiral ke arah pusat
- lurus menyinggung lingkaran di titik putus

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: gelas air yang tidak tumpah

Bahan: gelas plastik kecil (jangan kaca), tali rafia ±60 cm, sedikit air, stopwatch HP, meteran. Lakukan di halaman terbuka, jauh dari orang lain, dan siap basah!

1. Ikat gelas plastik dengan tali seperti pegangan ember. Isi air kira-kira seperempat gelas.
2. Putar gelas dalam lingkaran vertikal di samping tubuhmu dengan cepat dan mantap. Air tidak tumpah walaupun gelas terbalik di puncak!
3. Ukur jari-jari lingkaran r (dari bahu sampai dasar gelas) dan waktu 10 putaran. Hitung kelajuan $v = 2\pi r/T$.
4. Bandingkan dengan kelajuan minimum di puncak, $\sqrt{gr}$. Lalu putar makin pelan (dengan hati-hati) sampai air mulai tumpah.

Pertanyaan: Apakah kelajuanmu lebih besar dari $\sqrt{gr}$? Mengapa air tidak tumpah di puncak, padahal tidak ada yang "menahannya" dari bawah? Gaya apa yang menyediakan gaya sentripetal pada air di puncak?

RINGKASAN KILAT **Bab 7 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- membedakan gesekan **statis** dan **kinetis**, lalu memakai $f_s \leq \mu_s N$ dan $f_k = \mu_k N$
- menganalisis benda di **bidang miring** dan menentukan sudut kritis $\tan\theta_c = \mu_s$
- memakai besaran sudut (radian, ω, f, T) dan hubungan $v = \omega r$
- menghitung **gaya sentripetal** pada tikungan datar, tikungan miring, dan tong setan
- menganalisis gerak melingkar vertikal (kora-kora, roller coaster) tanpa memakai "gaya sentrifugal" yang keliru

Istilah kunci

Gaya gesek | koefisien gesek | sudut kritis | radian | percepatan sentripetal | gaya sentripetal

Rumus penting

$$f_{s,\text{maks}} = \mu_s N = \mu_s m g$$

Gesekan statis maksimum. 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).

$$\tan \theta_c = \mu_s$$

Sudut kritis bidang miring. Kemiringan saat benda tepat akan meluncur hanya bergantung pada koefisien gesek, tidak pada massa benda!

$$a_s = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

Percepatan sentripetal. Makin cepat dan makin tajam tikungannya (r kecil), makin besar percepatan ke pusat yang dibutuhkan. Kecepatan 2× → percepatan 4×!

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{\mu_s g r}$$

Kecepatan maksimum di tikungan datar. Di tikungan datar, hanya gesekan ban yang menarik kendaraan ke pusat. Jalan licin (μ kecil) atau tikungan tajam (r kecil) berarti harus pelan!

$$v_{\text{min}} = \sqrt{\frac{g r}{\mu_s}}$$

Kecepatan minimum di tong setan. Makin cepat motor, makin keras dinding mendorongnya, makin besar gesekan yang menahannya agar tidak merosot. Terlalu pelan? Motor merosot ke dasar.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Rumus $f_s = \mu_s N$ bukan rumus gesekan statis, melainkan rumus batas maksimumnya.
- Saat angkot menikung tajam, tubuhmu terasa "terlempar" ke sisi luar.

⛰️ 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=7

Teka-teki untuk Bab 8

Kereta roller coaster tidak punya mesin. Ia hanya ditarik ke puncak lintasan, lalu dilepas. Agar kereta lolos melewati loop berjari-jari R tanpa jatuh, kamu tahu kecepatannya di puncak loop minimal $\sqrt{gR}$. Dari ketinggian berapa kereta harus dilepas? Lebih tinggi dari puncak loop ($2R$), tetapi berapa tepatnya?

▼ **Intip petunjuk**

Hukum Newton saja sulit menjawabnya, karena gaya pada kereta terus berubah sepanjang lintasan. Gunakan "mata uang" baru yang selalu kekal: **energi**. Jawabannya ternyata $h = 2{,}5R$, dan cara mendapatkannya ada di Bab 8: Usaha, Energi, dan Daya.

BAB 8 · GERAK & GAYA

08 Usaha, Energi & Daya: Mata Uang Alam Semesta

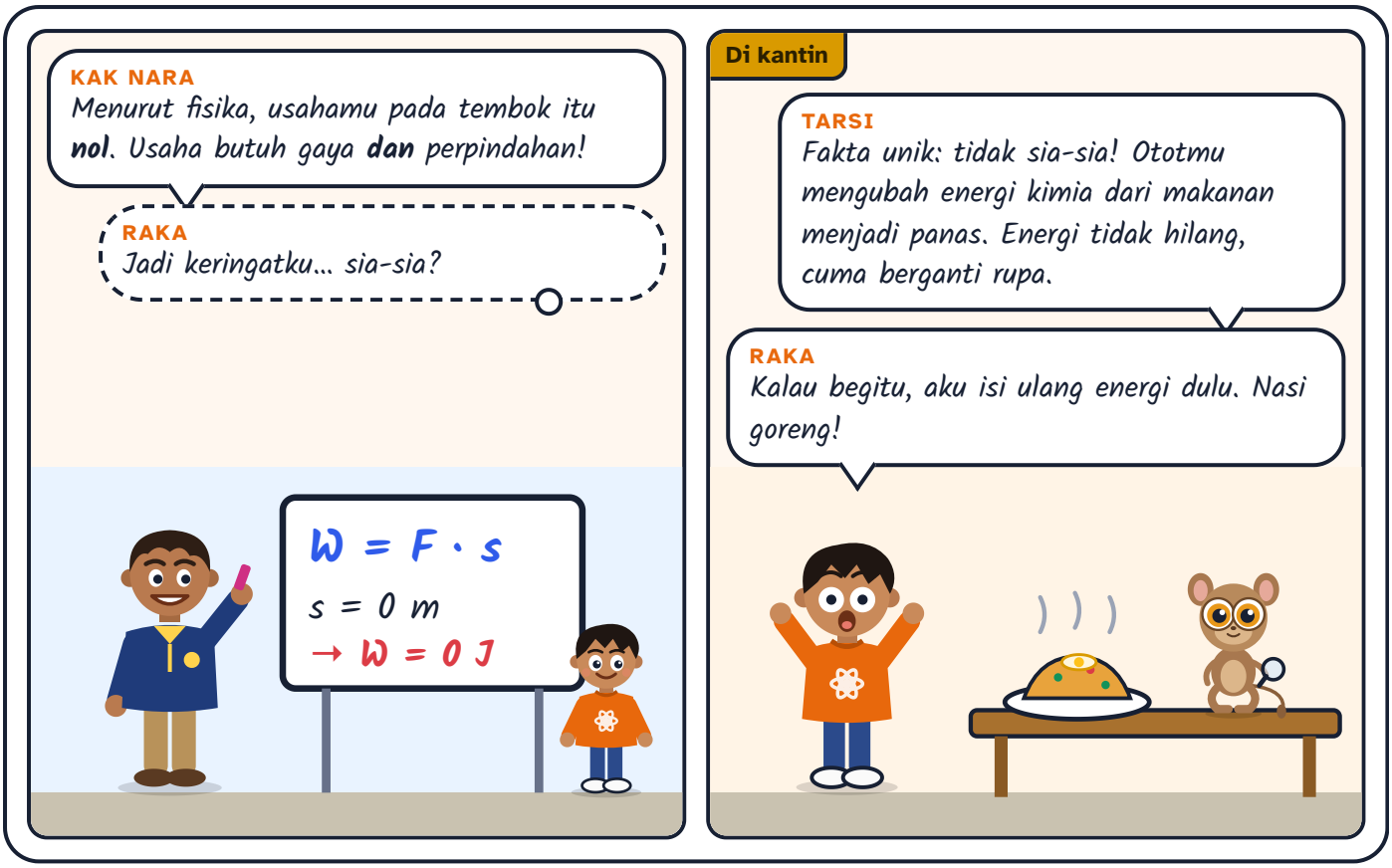
Raka mendorong tembok sampai bermandi keringat, tetapi kata fisika usahanya nol. Roller coaster meluncur naik-turun tanpa mesin. Rahasianya satu: energi tidak pernah hilang, ia hanya berganti rupa.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **usaha** $W = Fs\cos\theta$ dan menjelaskan kapan usaha bernilai positif, negatif, atau nol;
- memakai **teorema usaha-energi** serta menghitung energi kinetik, energi potensial gravitasi, dan energi pegas;
- menerapkan **kekekalan energi mekanik** pada roller coaster, ayunan, dan benda jatuh, termasuk saat ada gesekan;
- menghitung **daya**, **efisiensi**, dan energi listrik dalam kWh;
- menjelaskan cara tuas, katrol, takal, dan bidang miring "menukar" gaya dengan jarak (**keuntungan mekanis**).

TEMBOK YANG TAK MAU BERGESER

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Raka mendorong tembok dengan gaya 200 N selama 10 menit, tetapi tembok sama sekali tidak bergeser. Berapa usaha yang dilakukan Raka pada tembok?

- 2.000 J, karena 200 N × 10 menit.
- 120.000 J, karena 200 N × 600 detik.
- 0 J, karena tembok tidak berpindah.
- Tidak bisa dihitung tanpa massa tembok.

Jawabannya: 0 J. Dalam fisika, usaha adalah gaya dikali *perpindahan*, bukan gaya dikali *waktu*. Tembok tidak berpindah, jadi tembok tidak menerima energi sedikit pun. Rasa capek Raka nyata, tetapi energinya berubah menjadi panas di dalam ototnya sendiri, bukan masuk ke tembok.

8.1 Usaha: gaya yang membuat benda berpindah

Dalam bahasa sehari-hari, "usaha" berarti berjuang keras. Dalam fisika, artinya lebih tegas. **Usaha** (W, dari *work*) terjadi jika sebuah gaya membuat benda **berpindah**, dan gaya itu (atau sebagian darinya) searah perpindahan. Usaha adalah cara memindahkan energi: siapa yang melakukan usaha, memberikan energi kepada benda.

Usaha oleh gaya tetap. $W = F\,s\cos\theta$, dengan θ sudut antara arah gaya dan arah perpindahan. Satuannya **joule** (J): 1 J adalah usaha gaya 1 N yang memindahkan benda sejauh 1 m.

Bahasa sederhana · Gampangnya: **usaha = dorongan × jarak pindah**. Kalau kamu mendorong lemari dan lemarinya bergeser, kamu melakukan usaha. Kalau lemarinya tidak bergeser sedikit pun, usahamu nol, walaupun kamu kelelahan.

Sudut θ	$\cos\theta$	**Usaha**	**Contoh**
0° (gaya searah gerak)	1	positif, maksimum: $W = Fs$	mendorong gerobak bakso ke depan
antara 0° dan 90°	antara 0 dan 1	positif, tetapi lebih kecil	menarik koper dengan pegangan miring
90° (tegak lurus)	0	**nol**	memikul pikulan sambil berjalan mendatar; gaya normal lantai
180° (berlawanan)	–1	**negatif**: mengambil energi	gaya gesek dan rem pada motor yang melaju

RUMUS HIDUP

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'.

- F Gaya N
- s Perpindahan m
- θ Sudut gaya–perpindahan °
- W Usaha J

USAHA

399,3

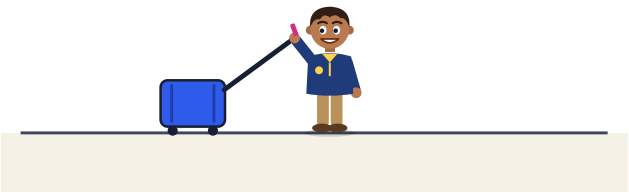
J

Gaya **50** N, perpindahan **10** m, sudut **37°** → usaha **399,3** J. Coba sudut 90°: usahanya nol! Lebih dari 90°: usahanya negatif.

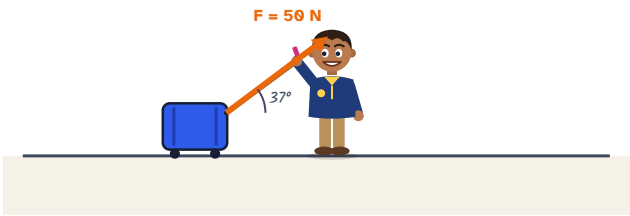
Satuan Nusantara: ≈ 10% dari 1 kkal (kalori makanan)

Cek satuan: $1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{N} \cdot 1\,\mathrm{m}$. Satu joule kira-kira usaha mengangkat sebutir apel kecil setinggi 1 meter.

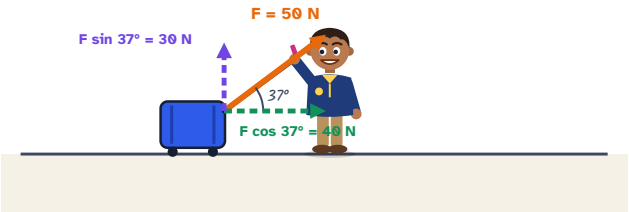
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-USAHA-GAYA



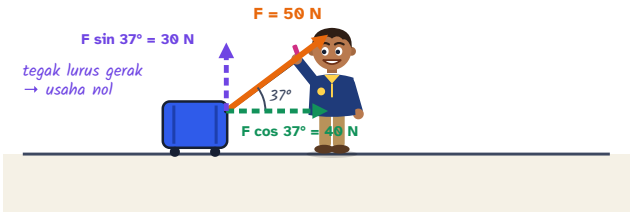
Langkah 1. Kak Nara menarik koper beroda sejauh 10 m dengan gaya 50 N. Pegangannya membentuk sudut 37° terhadap lantai. Berapa usahanya?



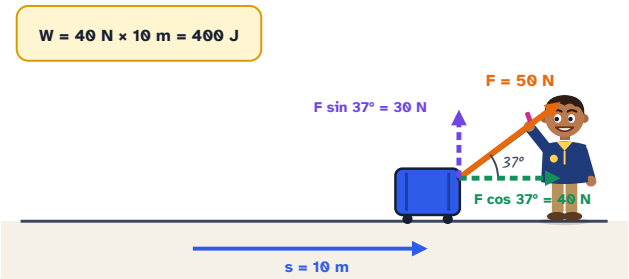
Langkah 2. Gaya tarik $F = 50$ N mengarah miring, sepanjang pegangan koper.



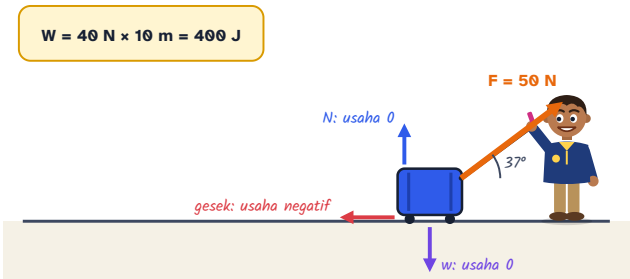
Langkah 3. Uraikan gaya menjadi dua komponen (pakai $\cos 37^\circ \approx 0{,}8$ dan $\sin 37^\circ \approx 0{,}6$): mendatar 40 N searah gerak, tegak 30 N.



Langkah 4. Komponen tegak hanya "mengangkat sedikit" koper dan tegak lurus perpindahan, sehingga **tidak melakukan usaha**. Yang bekerja hanya 40 N.



Langkah 5. Koper berpindah 10 m. Usahanya $W = F\cos\theta \cdot s = 40 \times 10 = 400$ J.



Langkah 6. Bonus: berat dan gaya normal tegak lurus gerak, jadi usahanya nol. Gesekan roda berlawanan arah gerak, jadi usahanya **negatif**: ia mengambil energi dari koper.

⚠️ **AWAS JEBAKAN: USAHA ≠ CAPEK**

Memikul tas sambil diam, menahan galon di atas kepala, atau berjalan mendatar sambil memikul pikulan: semuanya melelahkan, tetapi usaha gaya angkatmu pada beban **nol**. Pada dua kasus pertama bebannya tidak berpindah. Pada kasus ketiga gaya angkatmu (ke atas) tegak lurus perpindahan (mendatar). Contoh paling ekstrem: gravitasi Bumi terus menarik satelit yang mengorbit melingkar, tetapi karena gayanya selalu tegak lurus gerak, gravitasi tidak melakukan usaha dan kelajuan satelit tetap.

CONTOH **Mendorong gerobak sayur**

Bu Ani mendorong gerobak sayur dengan gaya mendatar 80 N sejauh 25 m. Berapa usaha yang dilakukannya?

1. Gaya searah perpindahan, jadi $\theta = 0^\circ$ dan $\cos\theta = 1$.
2. $W = F\,s = 80 \times 25 = 2000$ J.

Usahanya 2.000 J = 2 kJ. Energi sebanyak itu berpindah dari otot Bu Ani ke gerobak (lalu sebagian besar menjadi panas akibat gesekan roda).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

USAHA OLEH GAYA YANG BERUBAH = LUAS DI BAWAH GRAFIK

Jika gaya berubah sepanjang lintasan, usaha adalah **luas di bawah grafik** F–x: $W = \int F\,\mathrm{d}x$. Dalam bentuk vektor, $W = \int F \cdot \mathrm{d}r$, yaitu hasil kali titik (Bab 3). Contoh: menarik pegas dari $x = 0$ sampai x dengan gaya $F = kx$ menghasilkan luas segitiga $\frac{1}{2} \cdot x \cdot kx = \frac{1}{2}kx^2$. Itulah energi pegas yang akan kita temui di 8.3.

8.2 Energi kinetik dan teorema usaha-energi

Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Bayangkan energi sebagai **mata uang alam semesta**: bisa ditabung (energi potensial), dibelanjakan (energi kinetik), ditukar ke mata uang lain (panas, listrik, bunyi), tetapi jumlah totalnya tidak pernah berubah.

Benda yang bergerak memiliki **energi kinetik**. Bola yang melaju bisa memecahkan kaca, dan air sungai yang deras bisa memutar kincir. Makin besar massa dan kecepatannya, makin besar energi kinetiknya, dan kecepatan berpengaruh **kuadrat**!

RUMUS HIDUP **Energi kinetik**

$$E_k = \frac{1}{2}\, m\, v^2$$

Energi gerak = setengah × massa × kecepatan kuadrat. Kecepatan dua kali lipat → energi empat kali lipat!

m Massa kg | v Kecepatan m/s | E_k Energi kinetik J

ENERGI KINETIK
30.000
J

Benda **150** kg yang melaju **20** m/s membawa energi kinetik **30.000** J. Gandakan kecepatannya: energinya menjadi 4 kali!

Satuan Nusantara: ≈ 7,2 × 1 kkal (kalori makanan)

Cek satuan: $\mathrm{kg} \cdot (\mathrm{m/s})^2 = \mathrm{kg\,m^2/s^2} = \mathrm{N\,m} = \mathrm{J}$

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

Teorema usaha-energi. Usaha total (usaha oleh *semua* gaya) pada benda sama dengan perubahan energi kinetiknya: $W_{\text{total}} = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2_{\text{akhir}} - \frac{1}{2}mv^2_{\text{awal}}$.

Teorema ini menjelaskan sesuatu yang penting di jalan raya. Saat motor mengerem, gaya rem melakukan usaha negatif $-F_{\text{rem}}\, s$ yang menghabiskan energi kinetik $\frac{1}{2}mv^2$. Jadi jarak pengereman $s = \dfrac{mv^2}{2F_{\text{rem}}}$ **sebanding dengan** v^2. Ngebut dua kali lebih cepat berarti butuh jarak rem empat kali lebih jauh.

KERJAKAN BERSAMA **Jarak pengereman motor**

Motor beserta pengendaranya bermassa 150 kg melaju 72 km/jam. Rem memberi gaya rata-rata 1.200 N. Berapa jarak pengereman? Berapa jaraknya jika motor melaju 144 km/jam?

1. Ubah satuan: 72 km/jam $= 20$ m/s.
2. Energi kinetik awal: $E_k = \frac{1}{2} \times 150 \times 20^2 = 30\,000$ J.
3. Teorema usaha-energi: $-Fs = 0 - E_k \rightarrow s = \dfrac{30\,000}{1200} = 25$ m.
4. Pada 144 km/jam (40 m/s), $E_k = \frac{1}{2} \times 150 \times 40^2 = 120\,000$ J, sehingga $s = 100$ m.

Kecepatan dua kali lipat membuat jarak pengereman empat kali lipat (25 m → 100 m). Itu sebabnya batas kecepatan di jalan sekolah sangat rendah.

TRIK KAK NARA: SATUAN ENERGI DARI PIRING MAKAN

Energi kinetik motor tadi (30.000 J) kira-kira sama dengan energi dalam **7 kkal**, kurang dari sebutir permen! Sebaliknya, energi **sepiring nasi goreng (±2,5 juta joule)** cukup untuk mempercepat motor itu dari diam sampai 72 km/jam lebih dari 80 kali. Tubuh kita ternyata "baterai" yang luar biasa.

8.3 Energi potensial: tabungan energi

Energi potensial adalah energi yang "ditabung" karena posisi atau bentuk benda. Kelapa di puncak pohon, air di bendungan, dan ketapel yang diregangkan menyimpan energi yang siap "dicairkan" menjadi gerak.

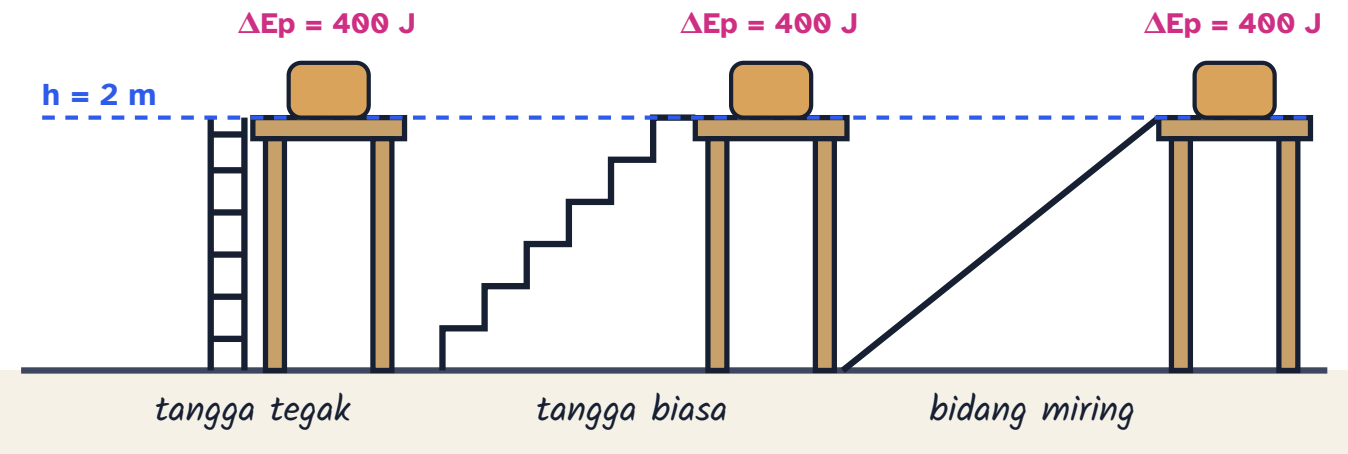
Energi potensial gravitasi

Untuk mengangkat benda bermassa m setinggi h dengan pelan-pelan, kamu harus melawan beratnya mg sejauh h. Usaha itu tersimpan sebagai $E_p = mgh$. Ketinggian h diukur dari **titik acuan** yang boleh kamu pilih sendiri (lantai, meja, atau permukaan laut). Yang selalu bermakna secara fisis adalah **perubahan** ΔE_p, bukan nilai mutlaknya.

Bahasa sederhana · Makin tinggi dan makin berat sebuah benda, makin besar energi tabungannya. Itu sebabnya buah kelapa yang jatuh dari pohon tinggi sangat berbahaya: energi tabungannya besar dan berubah menjadi energi gerak saat jatuh.

Energi potensial pegas

Pegas yang ditarik atau ditekan sejauh x menyimpan energi $E_p = \frac{1}{2}kx^2$, dengan k konstanta pegas (N/m). Energi ini berasal dari usaha melawan gaya pegas $F = kx$ yang makin besar saat pegas makin teregang (luas segitiga di grafik F–x). Shock absorber motor, trampolin, dan busur panah memakai tabungan energi semacam ini.



Karung beras 20 kg dinaikkan ke lantai rumah panggung setinggi 2 m ($g = 10$ m/s²) lewat tiga jalur berbeda. Pertambahan energi potensialnya selalu $mgh = 400$ J. Gravitasi tidak peduli jalan mana yang kamu pilih: inilah ciri **gaya konservatif**.

	Gaya konservatif	Gaya nonkonservatif
Contoh	gravitasi, gaya pegas, gaya listrik	gesekan, hambatan udara, dorongan otot, rem
Usaha bergantung jalur?	tidak; hanya posisi awal dan akhir	ya; jalur lebih panjang, usaha gesek lebih besar
Usaha pada lintasan tertutup (kembali ke titik awal)	nol	tidak nol (energi "bocor" menjadi panas)
Punya energi potensial?	ya (mgh, $\frac{1}{2}kx^2$)	tidak

COBA SENDIRI **Peluncur bola mainan**

Peluncur mainan memiliki pegas dengan $k = 500$ N/m yang ditekan 4 cm. Pegas melontarkan bola plastik 10 g tegak ke atas. Abaikan gesekan dan gunakan $g = 10$ m/s². Berapa kecepatan bola saat lepas, dan setinggi apa bola naik?

1. Energi pegas: $E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 500 \times 0{,}04^2 = 0{,}4$ J.
2. Semua berubah menjadi energi kinetik (abaikan kenaikan kecil selama 4 cm): $\frac{1}{2}mv^2 = 0{,}4 \rightarrow v = \sqrt{2 \times 0{,}4/0{,}01} = \sqrt{80} \approx 8{,}9$ m/s.
3. Di puncak, semua menjadi energi potensial gravitasi: $mgh = 0{,}4 \rightarrow h = \dfrac{0{,}4}{0{,}01 \times 10} = 4$ m.

Bola melesat ±8,9 m/s dan naik sampai 4 m, setinggi atap rumah! Itu sebabnya mainan pelontar tidak boleh diarahkan ke mata siapa pun.

8.4 Kekekalan energi mekanik: roller coaster tanpa mesin

Tebak Dulu!

Di taman air ada dua perosotan dari menara yang sama tingginya. Perosotan A lurus dan curam. Perosotan B panjang dan berkelok-kelok. Keduanya sangat licin (gesekan diabaikan). Siapa yang tiba di kolam dengan kelajuan lebih besar?

- Perosotan A, karena lebih curam.
- Perosotan B, karena lintasannya lebih panjang untuk mempercepat.
- Sama besar, karena ketinggiannya sama.
- Bergantung pada berat anak yang meluncur.

Jawabannya: sama besar. Tanpa gesekan, energi potensial mgh di puncak berubah seluruhnya menjadi energi kinetik di bawah: $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$, sehingga $v = \sqrt{2gh}$. Bentuk lintasan dan massa tidak muncul dalam rumus! Yang berbeda hanyalah **waktu** tempuhnya: perosotan curam lebih cepat sampai.

Energi mekanik adalah jumlah energi kinetik dan energi potensial: $E_m = E_k + E_p$. Jika hanya gaya konservatif yang melakukan usaha (tanpa gesekan dan hambatan udara), energi mekanik **kekal**. Energi hanya berpindah bolak-balik antara bentuk kinetik dan potensial.

Hukum kekekalan energi mekanik. $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$, atau $\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$.

RUMUS HIDUP **Kelajuan setelah turun setinggi h (tanpa gesekan)**

$$v = \sqrt{{v_0}^2 + 2g\,h}$$

Energi potensial yang 'dicairkan' saat turun setinggi h berubah menjadi tambahan energi kinetik. Massa tidak berpengaruh!

h Penurunan tinggi m

v_0 Kelajuan awal m/s

v Kelajuan di bawah m/s

KELAJUAN DI BAWAH

19,8

m/s

Turun **20** m dengan kelajuan awal **0** m/s → kelajuan di bawah **19,8** m/s, berapa pun massanya dan apa pun bentuk lintasannya (asal tanpa gesekan).

Satuan Nusantara: ≈ 1,8 × ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 20% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 14 × jalan kaki santai

Cek satuan: $\sqrt{\mathrm{m/s^2 \cdot m}} = \sqrt{\mathrm{m^2/s^2}} = \mathrm{m/s}$

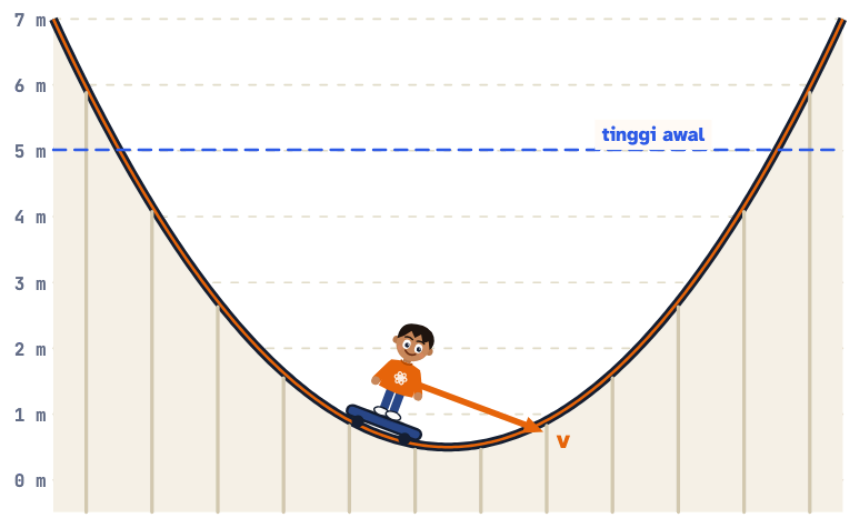
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-KEKEKALAN-EM

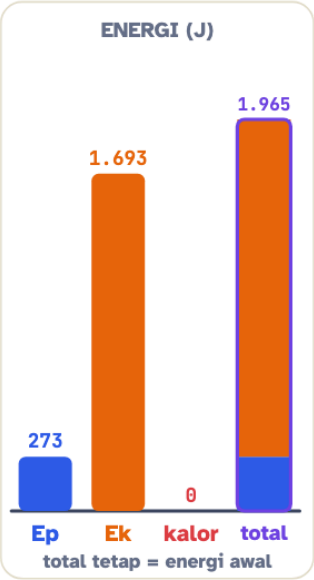
✏️ **TRIK KAK NARA: DERET 5–20–45**

Dengan $g = 10$ m/s² dan mulai dari diam: jatuh **5 m** → 10 m/s, jatuh **20 m** → 20 m/s, jatuh **45 m** → 30 m/s, jatuh **80 m** → 40 m/s. Polanya $h = 5n^2$ → $v = 10n$. Hafalkan empat pasangan ini, dan banyak soal pilihan ganda bisa kamu jawab dalam hitungan detik.

LAB MINI **Taman skate energi: seret Raka, lalu lepaskan!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-8

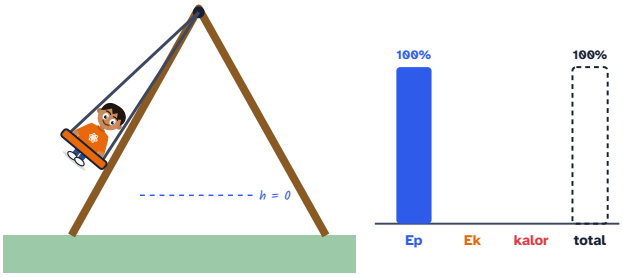




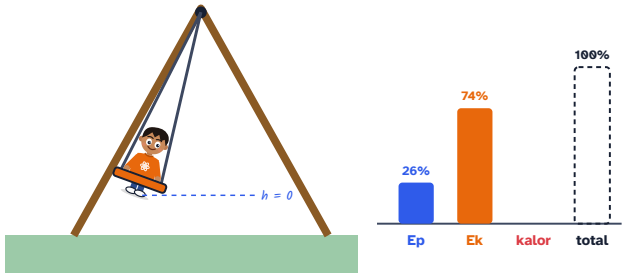
Tinggi	Kelajuan	Ep	Ek	Kalor
0,7 m	9,2 m/s	273 J	1.693 J	0 J

Keadaan
Meluncur (tanpa gesekan)

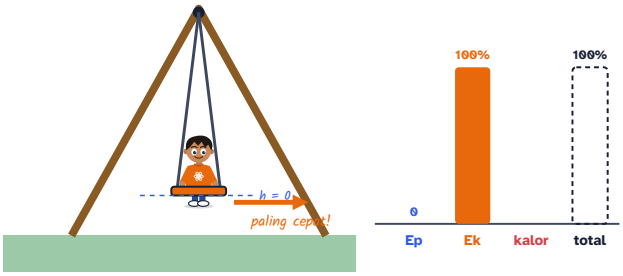
Ketuk atau seret lintasan untuk memilih titik awal, lalu tekan **Jalankan**. Perhatikan batang energi: biru = E_p, oranye = E_k, merah = kalor. Dengan gesekan nol, apakah Raka bisa melewati bukit yang *lebih tinggi* dari titik awalnya? Lalu naikkan gesekan: ke mana energinya "pergi"?



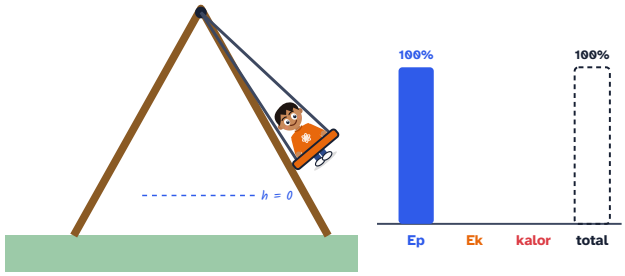
Langkah 1. Kak Nara menarik ayunan Raka ke belakang (simpangan 40°), lalu melepaskannya. Di titik tertinggi kecepatannya nol: semua energi berupa E_p.



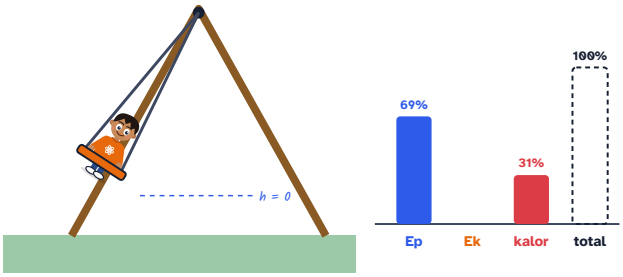
Langkah 2. Di tengah perjalanan turun (simpangan 20°), tinggi Raka tinggal sekitar seperempat tinggi awal. Sebagian besar E_p sudah berubah menjadi E_k.



Langkah 3. Di titik terendah, E_p (terhadap titik terendah) nol dan E_k maksimum. Di sinilah ayunan paling cepat.



Langkah 4. Ayunan naik lagi sampai ketinggian yang sama di sisi lain (jika gesekan diabaikan). E_k kembali menjadi E_p.



Langkah 5. Kenyataannya, hambatan udara dan gesekan di engsel mengubah sebagian energi menjadi panas. Ayunan makin rendah, tetapi **total** energi ($E_p + E_k$ + kalor) tetap 100%.

Jika ada gesekan, energi mekanik **berkurang**, tetapi energi total tetap kekal. Selisihnya berubah menjadi **kalor** (energi termal) dan sedikit bunyi: $E_{m1} = E_{m2} + Q_{\text{gesek}}$. Ini adalah bentuk umum **hukum kekekalan energi**: energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya berubah bentuk.

KERJAKAN BERSAMA **Perosotan taman air yang tidak licin sempurna**

Sari (40 kg) meluncur dari puncak perosotan setinggi 5 m, mulai dari diam. Di bawah, kelajuannya 8 m/s. Gunakan $g = 10$ m/s². Berapa energi yang berubah menjadi kalor?

1. Energi mekanik di puncak: $E_p = mgh = 40 \times 10 \times 5 = 2000$ J (dan $E_k = 0$).
2. Energi mekanik di bawah: $E_k = \frac{1}{2} \times 40 \times 8^2 = 1280$ J (dan $E_p = 0$).
3. Kalor gesekan: $Q = 2000 - 1280 = 720$ J.

Sebanyak 720 J (36%) berubah menjadi panas pada celana renang dan perosotan. Tanpa gesekan, Sari akan tiba dengan $v = \sqrt{2 \times 10 \times 5} = 10$ m/s.

TAMU DARI MASA LALU

Pada tahun 1840-an, **James Prescott Joule** (1818–1889), putra pemilik pabrik bir di Inggris, menjatuhkan beban yang memutar kincir kecil di dalam air. Gesekan kincir memanaskan air, dan Joule mengukur kenaikan suhu yang sangat kecil itu dengan termometer amat teliti. Hasilnya: usaha mekanik tertentu *selalu* menghasilkan panas dalam jumlah tertentu. Panas ternyata bukan "zat", melainkan bentuk energi. Untuk menghormatinya, satuan energi dinamai **joule**.

MITOS

"Energi bisa habis. Buktinya, bola yang memantul akhirnya berhenti."

FAKTA

Energi bola tidak lenyap. Setiap pantulan mengubah sebagian energi menjadi panas (bola dan lantai sedikit menghangat) dan bunyi "tuk". Energi totalnya tetap; hanya bentuknya yang tidak lagi berguna untuk memantul.

MITOS

"Anak yang lebih berat meluncur lebih cepat di perosotan licin."

FAKTA

Tanpa gesekan,
$v = \sqrt{2gh}$
sama sekali tidak bergantung pada massa. Anak berat memang punya energi lebih besar, tetapi juga butuh energi lebih besar untuk bergerak dengan kecepatan yang sama.

8.5 Daya dan efisiensi: seberapa cepat energi berpindah

Raka dan Sari sama-sama naik ke lantai tiga sekolah. Usaha melawan gravitasi kira-kira sama, tetapi Raka berlari dan sampai lebih dulu. Raka mengeluarkan **daya** lebih besar. Daya adalah **laju** usaha: berapa banyak energi yang dipindahkan setiap detik.

Daya. $P = \dfrac{W}{t}$, satuannya **watt** (W): 1 W = 1 J/s. Untuk benda yang didorong gaya F dengan kecepatan v, $P = Fv$.

RUMUS HIDUP **Daya saat naik tangga**

$$P = \frac{m\,g\,h}{t}$$

Daya = energi yang dipakai untuk naik (mgh) dibagi waktu. Naik secepat kilat = daya besar.

m Massa tubuh kg | h Tinggi yang dinaiki m | t Waktu s | P Daya W

DAYA
368
W

Tubuh **50** kg naik setinggi **6** m dalam **8** s → daya **368** W. Bandingkan dengan lampu LED 10 W!

Satuan Nusantara: ≈ 92% dari rice cooker saat memasak · ≈ 6% dari mesin motor bebek · ≈ 37 × lampu LED

Cek satuan: $\dfrac{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m/s^2}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = \mathrm{W}$

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

Sumber atau alat	Daya (kira-kira)
Lampu LED rumah	5–15 W
Kipas angin berdiri	±45 W
Rice cooker saat memasak	±400 W
Remaja berlari menaiki tangga	±300–700 W (sebentar saja)
Mesin motor bebek	±6.000 W = 6 kW

PLTA Cirata (Jawa Barat)	±1.000.000.000 W = 1 GW

kWh: satuan energi di tagihan listrik

PLN tidak menagih daya, melainkan **energi**. Satuannya kilowatt-jam (kWh): energi yang dipakai alat 1.000 W selama 1 jam. $1\ \mathrm{kWh} = 1000\ \mathrm{W} \times 3600\ \mathrm{s} = 3{,}6$ juta joule. Rice cooker 400 W yang memasak 30 menit memakai $0{,}4 \times 0{,}5 = 0{,}2$ kWh.

Efisiensi: tidak ada mesin yang sempurna

Setiap mesin mengubah energi masukan menjadi energi berguna, ditambah energi "terbuang" (biasanya panas). **Efisiensi** $\eta = \dfrac{\text{energi (atau daya) keluaran berguna}}{\text{energi (atau daya) masukan}} \times 100\%$. Lampu pijar kuno hanya ±5% efisien (sisanya panas!), lampu LED jauh lebih baik, dan motor listrik besar bisa di atas 90%.

KERJAKAN BERSAMA **Pompa air untuk tandon**

Pompa air menaikkan 600 liter air (600 kg) ke tandon setinggi 10 m dalam 5 menit. Efisiensi pompa 50%. Berapa daya listrik yang dipakai pompa? ($g = 10$ m/s²)

1. Energi berguna (menaikkan air): $mgh = 600 \times 10 \times 10 = 60\,000$ J.
2. Daya keluaran: $P_{\text{out}} = \dfrac{60\,000}{300\ \mathrm{s}} = 200$ W.
3. Daya masukan: $P_{\text{in}} = \dfrac{P_{\text{out}}}{\eta} = \dfrac{200}{0{,}5} = 400$ W.

Pompa menyedot 400 W dari listrik rumah. Separuhnya (200 W) terbuang sebagai panas dan gesekan di motor serta pipa.

FISIKA INDONESIA: TANGGA ENERGI SUNGAI CITARUM

Sungai Citarum di Jawa Barat dibendung tiga kali berturut-turut: **Saguling** (±700 MW), **Cirata** (±1.000 MW), dan **Jatiluhur**. Air yang ditahan di waduk menyimpan energi potensial raksasa. Saat dialirkan turun lewat pipa pesat, energi potensial menjadi energi kinetik, memutar turbin, lalu generator mengubahnya menjadi listrik untuk jutaan rumah di Jawa dan Bali. Daya PLTA kira-kira $P = \eta\, \rho\, Q\, g\, h$: makin besar debit air Q dan beda tinggi h, makin besar dayanya. Di desa-desa Sumatra Barat dan Jawa, kincir air bambu memakai prinsip yang sama untuk mengangkat air ke sawah.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA MOBIL PUNYA KECEPATAN MAKSIMUM?

Pada kecepatan tetap di jalan datar, gaya dorong mesin sama dengan gaya hambat. Hambatan udara kira-kira sebanding dengan v^2, sehingga daya yang dibutuhkan $P = F_{\text{hambat}}\, v \propto v^3$. Menggandakan kecepatan membutuhkan daya **delapan kali** lipat! Kecepatan maksimum tercapai saat daya mesin tidak sanggup lagi mengimbangi $F_{\text{hambat}}\, v$. Ini juga alasan kendaraan jauh lebih boros bahan bakar saat ngebut.

8.6 Pesawat sederhana: menukar gaya dengan jarak

Pesawat sederhana adalah alat yang membuat pekerjaan terasa lebih ringan: tuas, katrol, bidang miring, roda berporos, baji, dan sekrup. Rahasianya adalah satu prinsip: **usaha tidak bisa dihemat, tetapi gaya bisa ditukar dengan jarak**. Jika kamu ingin memakai gaya separuhnya, kamu harus menariknya sejauh dua kali lipat. Usaha = gaya × jarak tetap sama (atau sedikit lebih besar karena gesekan).

Keuntungan mekanis. $KM = \dfrac{\text{beban } (w)}{\text{kuasa } (F)}$. Untuk alat ideal (tanpa gesekan), $KM = \dfrac{\text{jarak tempuh kuasa}}{\text{jarak tempuh beban}}$.

Tuas (pengungkit)

Tuas adalah batang kaku yang berputar pada **titik tumpu**. Syarat seimbangnya: beban × lengan beban = kuasa × lengan kuasa, sehingga $KM = \dfrac{\text{lengan kuasa}}{\text{lengan beban}}$. Rahasia putar-memutar ini akan kita bongkar lebih dalam di Bab 10 (torsi).

Jenis tuas	Urutan	Contoh	KM
Kelas I	beban – **titik tumpu** – kuasa	linggis, jungkat-jungkit, gunting, tang, dacin (timbangan gantung pasar)	bisa > 1, = 1, atau < 1
Kelas II	titik tumpu – **beban** – kuasa	gerobak sorong, pemecah kemiri, pembuka tutup botol, stapler	selalu > 1
Kelas III	titik tumpu – **kuasa** – beban	sekop, pinset, joran pancing, sapu, lengan bawahmu	selalu < 1 (tetapi gerakan beban cepat dan jauh)

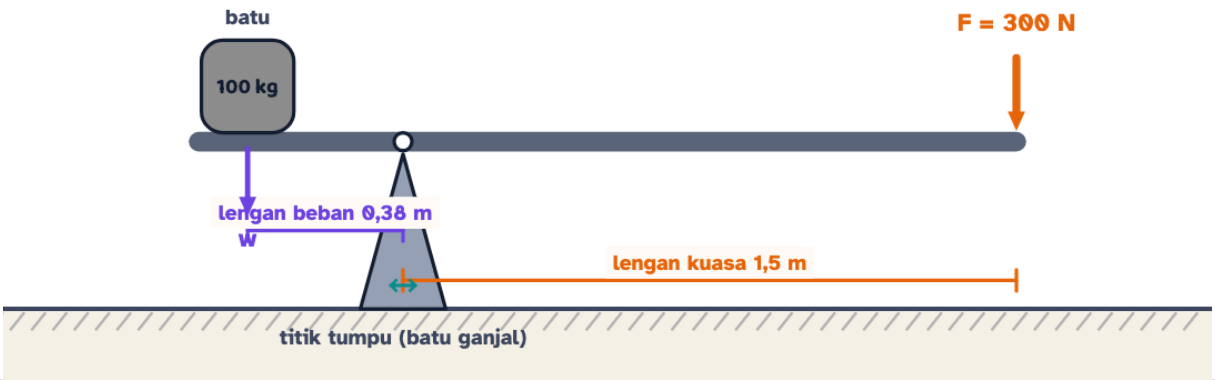
LAB MINI **Lab tuas: linggis, gerobak sorong, dan joran**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-8

Kelas I · linggis

KM = 1,5 / 0,38 = 3,95 → F min = 248 N

berat beban w = 980 N



Keuntungan mekanis	Gaya minimum	Tangan bergerak	Beban naik
3,95	248 N	0 cm	0 cm

Hasil

Cukup kuat: tekan Ungkit!

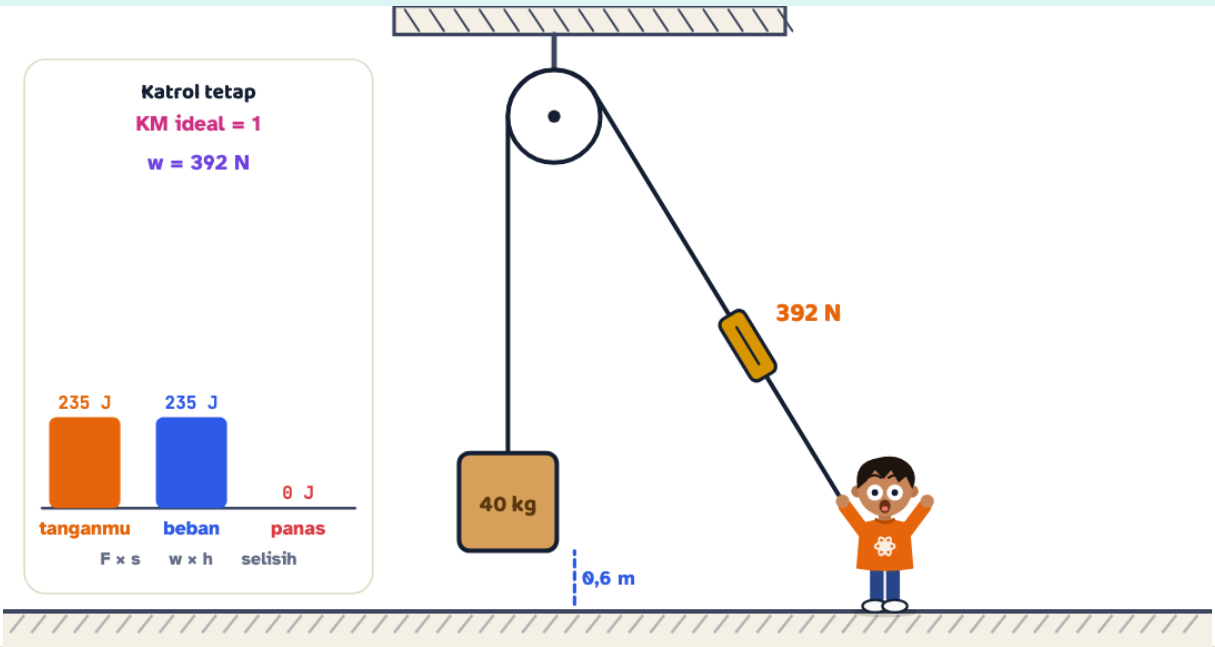
Pilih kelas tuas, geser bagian yang bertanda ↔, atur massa beban dan gaya tanganmu, lalu tekan **Ungkit!**. Bandingkan jarak tempuh tangan dan beban. Apakah usaha tanganmu pernah lebih kecil daripada usaha pada beban?

Katrol dan takal

Katrol tetap (seperti kerekan timba sumur dan tiang bendera) tidak mengurangi gaya ($KM = 1$), tetapi mengubah arah tarikan: menarik ke bawah jauh lebih nyaman karena kamu bisa memakai berat badanmu. **Katrol bebas** ikut naik bersama beban dan ditopang dua tali, sehingga $KM = 2$. **Takal** (gabungan beberapa katrol, dipakai di pelabuhan dan bengkel) punya KM sama dengan **jumlah tali yang menopang beban**.

LAB MINI **Katrol & takal: tarik talinya!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-8



Gaya tarik	Tali ditarik	Beban naik	Usaha tangan	Usaha pada beban
392 N	0,6 m	0,6 m	235 J	235 J

Pilih susunan katrol dan massa beban, lalu tekan **Jalankan** untuk menarik tali sejauh 2 m. Bandingkan angka dinamometer dengan berat beban. Turunkan efisiensi: berapa usaha yang berubah menjadi panas?

Bidang miring

Mendorong drum ke bak truk lewat papan miring lebih ringan daripada mengangkatnya langsung. Untuk bidang miring licin dengan panjang s dan tinggi h: $F \cdot s = w \cdot h$, sehingga $KM = \frac{s}{h}$. Makin landai (makin panjang), makin ringan gaya dorongnya, tetapi makin jauh jaraknya. Jalan berkelok di pegunungan, tangga, sekrup, dan dongkrak ulir adalah bidang miring yang "dilipat".

COBA SENDIRI **Takal di pelabuhan**

Buruh pelabuhan mengangkat peti 200 kg memakai takal dengan 4 tali penopang. Ia ternyata perlu menarik dengan gaya 625 N. Berapa efisiensi takal, dan berapa meter tali yang ditarik untuk menaikkan peti 1,5 m? ($g = 10$ m/s²)

1. Berat peti: $w = 200 \times 10 = 2000$ N. Takal ideal butuh $F = w/4 = 500$ N.
2. Panjang tali yang ditarik: $4 \times 1{,}5 = 6$ m (setiap tali penopang memendek 1,5 m).
3. Usaha keluaran: $wh = 2000 \times 1{,}5 = 3000$ J. Usaha masukan: $Fs = 625 \times 6 = 3750$ J.
4. $\eta = \dfrac{3000}{3750} \times 100\% = 80\%$.

Efisiensi 80%. Gaya 625 N masih jauh lebih ringan daripada 2.000 N, tetapi buruh harus menarik 6 m tali, dan 750 J terbuang menjadi panas di poros-poros katrol.

MITOS

"Katrol dan tuas menghemat usaha."

FAKTA

Pesawat sederhana menghemat **gaya**, bukan usaha. Gaya kecil dibayar dengan jarak yang jauh. Karena ada gesekan, usaha yang kamu keluarkan malah sedikit *lebih besar* daripada tanpa alat. Untungnya: pekerjaan berat jadi mungkin dilakukan.

MITOS

"Mesin dengan efisiensi 100% bisa dibuat kalau bahannya cukup bagus."

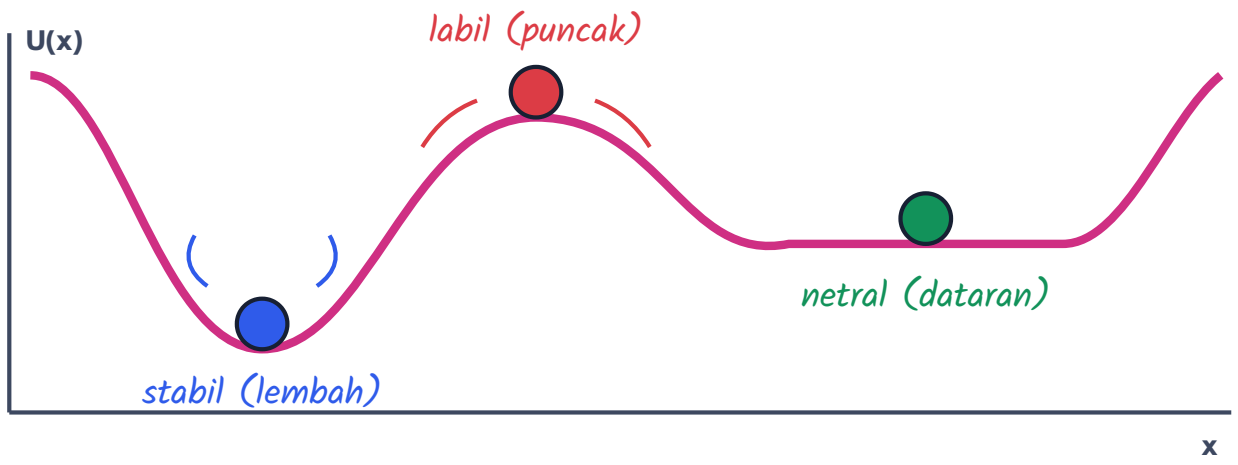
FAKTA

Selalu ada gesekan, hambatan udara, atau panas yang tak terhindarkan. Efisiensi bisa mendekati 100%, tetapi tidak pernah mencapainya. Mesin yang menghasilkan energi lebih banyak daripada masukannya (mesin abadi) melanggar hukum kekekalan energi.

8.7 Lanjut: keseimbangan dan grafik energi potensial

Bahasa sederhana · Bagian ini untuk yang penasaran. Intinya sederhana: kelereng di dasar mangkuk akan kembali ke dasar jika disenggol (stabil), sedangkan kelereng di atas bola terbalik akan menggelinding pergi (labil).

Gambarkan energi potensial U sebagai "pemandangan bukit dan lembah". Sebuah benda selalu "ingin" bergerak ke arah energi potensial yang lebih rendah, seperti kelereng yang menggelinding ke dasar lembah. Dari grafik $U(x)$ kita bisa membaca tiga jenis keseimbangan.



Lembah = keseimbangan **stabil** (disenggol, kembali). Puncak = **labil** (disenggol, menjauh). Dataran = **netral** (disenggol, diam di tempat baru).

Contoh nyata: bola di dasar mangkuk (stabil), pensil yang berdiri di ujung runcingnya (labil), dan bola di lantai datar (netral). Di Bab 10 kamu akan melihat hubungannya dengan **titik berat**: benda stabil jika titik beratnya naik saat benda dimiringkan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

GAYA ADALAH "KEMIRINGAN" ENERGI POTENSIAL

Untuk gaya konservatif, $F = -\dfrac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}$. Tanda minus berarti gaya selalu menunjuk ke arah U yang **menurun**, seperti kelereng yang menuruni lereng. Di titik keseimbangan $\mathrm{d}U/\mathrm{d}x = 0$. Jika $\mathrm{d}^2U/\mathrm{d}x^2 > 0$ (lembah), keseimbangannya stabil; jika < 0 (puncak), labil. Contoh: untuk pegas $U = \frac{1}{2}kx^2$, sehingga $F = -kx$ (hukum Hooke) dan $x = 0$ stabil. Dekat lembah mana pun, U mirip parabola, jadi benda akan bergetar harmonik. Itulah alasan getaran harmonik (Bab 12) muncul di mana-mana di alam.

PLTA di waduk

Energi potensial air di Saguling dan Cirata diubah menjadi listrik. Makin tinggi air jatuh, makin besar dayanya.

Kelok 44, Sumatra Barat

Jalan menuju Danau Maninjau berkelok 44 kali. Jalan yang landai adalah bidang miring panjang: tanjakan terasa ringan, tetapi jaraknya jauh.

Rem regeneratif kereta listrik

Saat mengerem, motor listrik kereta modern bekerja sebagai generator. Energi kinetik diubah kembali menjadi listrik, bukan dibuang sebagai panas.

Dongkrak ulir

Ulir dongkrak adalah bidang miring yang dililitkan. Puluhan putaran engkol yang ringan mengangkat mobil beberapa sentimeter saja.

Dacin di pasar

Timbangan gantung tradisional adalah tuas kelas I: anak timbangan kecil yang jauh dari titik gantung menyeimbangkan karung berat yang dekat.

Pikulan pedagang

Berjalan mendatar sambil memikul: gaya angkat bahu tegak lurus gerak, jadi usahanya pada dagangan nol. Capeknya berasal dari otot yang terus bekerja.

Cek Cepat

Pada peristiwa berikut, gaya yang usahanya nol adalah...

- gaya dorong Raka pada gerobak yang bergerak maju
- gaya gesek lantai pada lemari yang digeser
- gaya berat pada kelapa yang jatuh
- gaya normal lantai pada koper yang ditarik mendatar

Bola 2 kg melaju 3 m/s. Energi kinetiknya...

- 9 J
- 6 J
- 18 J
- 3 J

Lampu LED 10 W menyala 5 jam. Energi listrik yang dipakai...

- 50 kWh
- 2 kWh
- 0,05 kWh
- 0,5 kWh

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. A · 3. C

Tantangan Rumah: ukur daya otot kakimu

Bahan: tangga di rumah atau sekolah, meteran, stopwatch HP, timbangan badan, teman sebagai pencatat

1. Ukur tinggi satu anak tangga, lalu kalikan dengan jumlah anak tangga untuk mendapat tinggi total h.
2. Timbang massamu m.
3. Naiki tangga dengan berjalan biasa sambil teman mencatat waktunya t. Ulangi dengan berjalan cepat (**jangan berlari**, pegang pegangan tangga).
4. Hitung daya $P = mgh/t$ untuk kedua cara.

Pertanyaan: Berapa watt dayamu? Setara berapa lampu LED 10 W? Mengapa usaha melawan gravitasi kedua cara itu sama, padahal rasa capeknya berbeda?

RINGKASAN KILAT **Bab 8 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menghitung **usaha** $W = Fs\cos\theta$ dan menjelaskan kapan usaha bernilai positif, negatif, atau nol
- memakai **teorema usaha-energi** serta menghitung energi kinetik, energi potensial gravitasi, dan energi pegas
- menerapkan **kekekalan energi mekanik** pada roller coaster, ayunan, dan benda jatuh, termasuk saat ada gesekan
- menghitung **daya**, **efisiensi**, dan energi listrik dalam kWh
- menjelaskan cara tuas, katrol, takal, dan bidang miring "menukar" gaya dengan jarak (**keuntungan mekanis**)

Istilah kunci

Usaha | Energi | energi kinetik | Energi potensial | Energi mekanik | hukum kekekalan energi | daya | Efisiensi | Pesawat sederhana

Rumus penting

$$W = F\,s\,\cos\theta$$

Usaha oleh gaya tetap. Usaha = gaya × perpindahan × kosinus sudut di antara keduanya. Hanya bagian gaya yang searah gerak yang 'dihitung'.

$$E_k = \frac{1}{2}\,m\,v^2$$

Energi kinetik. Energi gerak = setengah × massa × kecepatan kuadrat. Kecepatan dua kali lipat → energi empat kali lipat!

$$v = \sqrt{{v_0}^2 + 2g\,h}$$

Kelajuan setelah turun setinggi h (tanpa gesekan). Energi potensial yang 'dicairkan' saat turun setinggi h berubah menjadi tambahan energi kinetik. Massa tidak berpengaruh!

$$P = \frac{m\,g\,h}{t}$$

Daya saat naik tangga. Daya = energi yang dipakai untuk naik (mgh) dibagi waktu. Naik secepat kilat = daya besar.

Jangan sampai terjebak

- Memikul tas sambil diam, menahan galon di atas kepala, atau berjalan mendatar sambil memikul pikulan: semuanya melelahkan, tetapi usaha gaya angkatmu pada beban nol.

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=8

Teka-teki untuk Bab 9

Sebuah truk 10 ton dan sebuah sepeda motor melaju dengan **energi kinetik yang sama**. Keduanya direm dengan gaya yang sama besar. Menurut teorema usaha-energi, keduanya berhenti setelah menempuh *jarak* yang sama. Tetapi apakah keduanya berhenti dalam *waktu* yang sama?

▼ Intip petunjuk

Gaya × jarak mengubah energi kinetik. Gaya × **waktu** mengubah besaran lain: **momentum** $p = mv$. Dengan energi kinetik sama, momentumnya $p = \sqrt{2mE_k}$, jadi truk punya momentum jauh lebih besar dan butuh waktu pengereman lebih lama. Kita bongkar di Bab 9: Momentum, Impuls & Tumbukan.

BAB 9 · GERAK & GAYA

09 Momentum: Siapa Paling Susah Dihentikan?

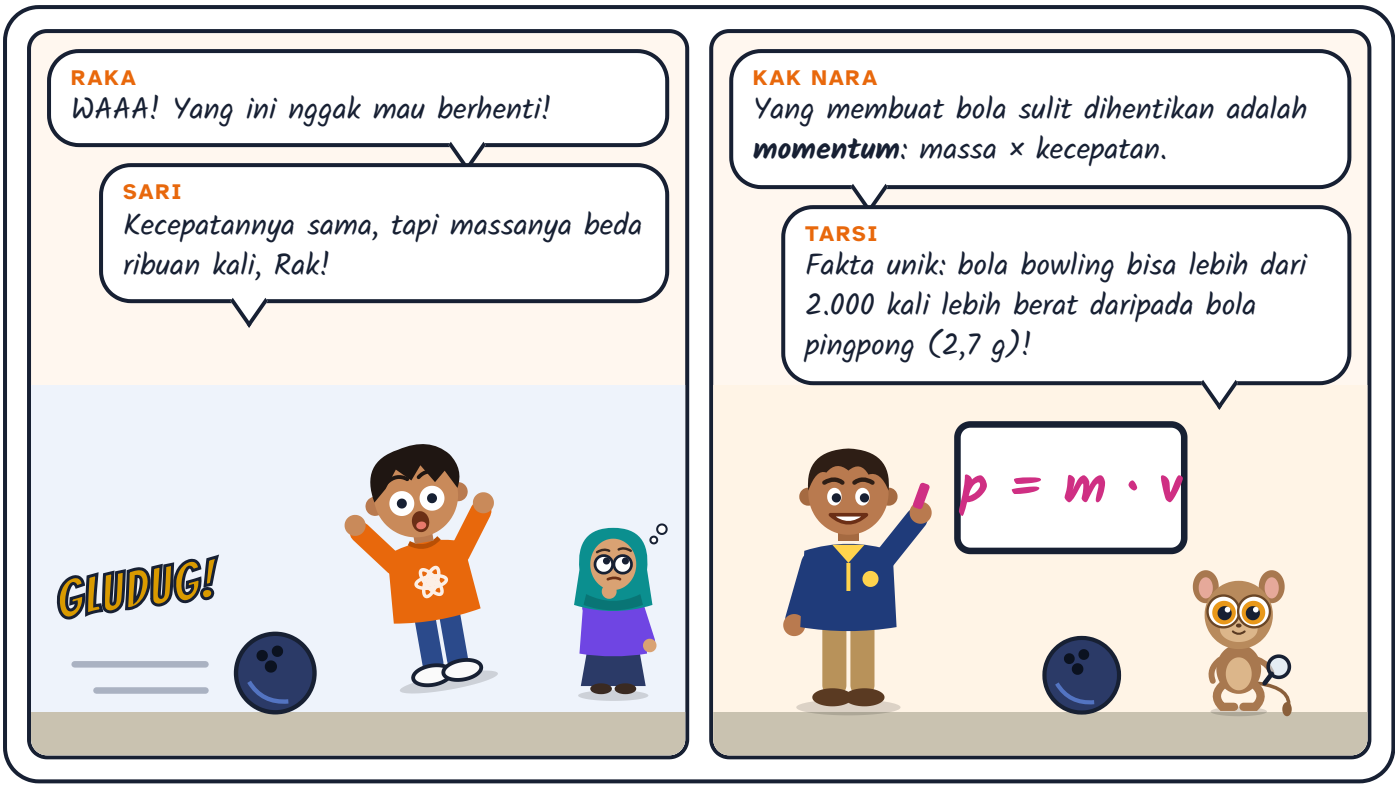
Bola pingpong dan bola bowling menggelinding sama cepat. Kamu berani menghentikan yang mana dengan kakimu? Bab ini membongkar besaran yang membuat airbag, helm, dan roket bekerja.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **momentum** $p = mv$ dan **impuls** $I = F\Delta t$, serta membaca impuls sebagai luas di bawah grafik F–t;
- menjelaskan mengapa airbag, helm, dan matras mengurangi gaya benturan;
- memakai **hukum kekekalan momentum** untuk tolakan (rekoil), ledakan, dan tumbukan;
- membedakan tumbukan **lenting sempurna**, **lenting sebagian**, dan **tidak lenting sama sekali** memakai koefisien restitusi e;
- menentukan **pusat massa** dan memahami mengapa geraknya tidak terpengaruh ledakan.

PINGPONG LAWAN BOWLING

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Bola pingpong (2,7 g) dan bola bowling (6 kg) menggelinding sama-sama 2 m/s. Kamu ingin menghentikan masing-masing dalam waktu 0,5 detik. Gaya yang diperlukan...

- sama besar, karena kecepatannya sama.
- untuk bola bowling lebih dari 2.000 kali lebih besar.
- untuk bola pingpong lebih besar, karena bola ringan lebih lincah.
- tidak bisa ditentukan, karena bola bowling tidak mungkin dihentikan.

Jawabannya: bola bowling butuh gaya lebih dari 2.000 kali lebih besar. Gaya penghenti = perubahan momentum ÷ waktu. Kecepatannya sama, tetapi massanya berbeda $6/0{,}0027 \approx 2200$ kali, jadi momentumnya juga berbeda sekitar 2.200 kali. Bola pingpong cukup disentuh ±0,01 N. Bola bowling butuh ±24 N, kira-kira berat dua setengah kilogram beras!

9.1 Momentum: "jumlah gerak" sebuah benda

Newton menyebutnya *quantitas motus*, "jumlah gerak". Sekarang kita menyebutnya **momentum**: hasil kali massa dan kecepatan. Momentum mengukur seberapa **sulit** sebuah benda dihentikan (atau dibelokkan).

Momentum. $p = mv$. Satuannya kg·m/s. Momentum adalah **vektor**: arahnya sama dengan arah kecepatan. Bola yang melaju ke kanan dan bola yang melaju ke kiri dengan kelajuan sama punya momentum yang berlawanan tanda.

Bahasa sederhana · Gampangnya: benda yang **berat** dan **cepat** punya momentum besar, sehingga sulit dihentikan. Truk yang pelan pun bisa punya momentum lebih besar daripada motor yang ngebut.

Benda	Massa	Kecepatan	Momentum (kg·m/s)
Kelereng yang disentil	5 g	2 m/s	0,01
Bola pingpong saat dismes	2,7 g	20 m/s	±0,05
Bola sepak saat tendangan keras	0,43 kg	25 m/s	±11
Pelari cepat	60 kg	10 m/s	600
Motor + pengendara	150 kg	15 m/s (54 km/jam)	2.250
Truk bermuatan	10.000 kg	20 m/s (72 km/jam)	200.000

JAWABAN TEKA-TEKI BAB 8

Truk dan motor punya energi kinetik sama, lalu direm dengan gaya sama. Keduanya berhenti dalam *jarak* yang sama (gaya × jarak = energi kinetik), tetapi **tidak** dalam *waktu* yang sama. Gaya × waktu mengubah momentum, dan untuk energi kinetik yang sama, momentum truk jauh lebih besar. Jadi truk butuh waktu pengereman lebih lama.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MOMENTUM DAN ENERGI KINETIK SALING TERHUBUNG

Dari $p = mv$ dan $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ diperoleh $E_k = \dfrac{p^2}{2m}$ atau $p = \sqrt{2mE_k}$. Untuk energi kinetik yang sama, benda bermassa 100 kali lebih besar punya momentum 10 kali lebih besar. Perhatikan juga perbedaan sifatnya: momentum adalah vektor (bisa saling meniadakan), sedangkan energi kinetik skalar dan tidak pernah negatif.

9.2 Impuls: gaya × waktu

Untuk mengubah momentum, kamu perlu gaya yang bekerja **selama selang waktu tertentu**. Hasil kali gaya dan waktu disebut **impuls**. Dari Hukum II Newton dalam bentuk aslinya, $F = \Delta p/\Delta t$, kita mendapatkan teorema impuls-momentum.

Teorema impuls-momentum. $I = F\,\Delta t = \Delta p = mv_{\text{akhir}} - mv_{\text{awal}}$. Satuan impuls N·s, sama dengan kg·m/s.

Rumus ini menyimpan rahasia keselamatan. Perubahan momentum saat benda berhenti sudah tertentu ($\Delta p = mv$). Tetapi kita bisa memilih **waktunya**: makin lama waktu pengereman, makin kecil gaya yang diterima. Lutut yang ditekuk saat mendarat, sarung tinju, helm berbusa, airbag, dan zona remuk mobil semuanya bekerja dengan memperpanjang waktu benturan.

RUMUS HIDUP **Gaya rata-rata saat benda dihentikan**

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m\,v}{\Delta t}$$

Gaya penghenti = momentum yang harus dihapus dibagi waktu menghapusnya. Perpanjang waktunya, gayanya mengecil!

m Massa kg

v Kelajuan sebelum berhenti m/s

Δt Lama benturan s

F Gaya rata-rata N

GAYA RATA-RATA

1.000

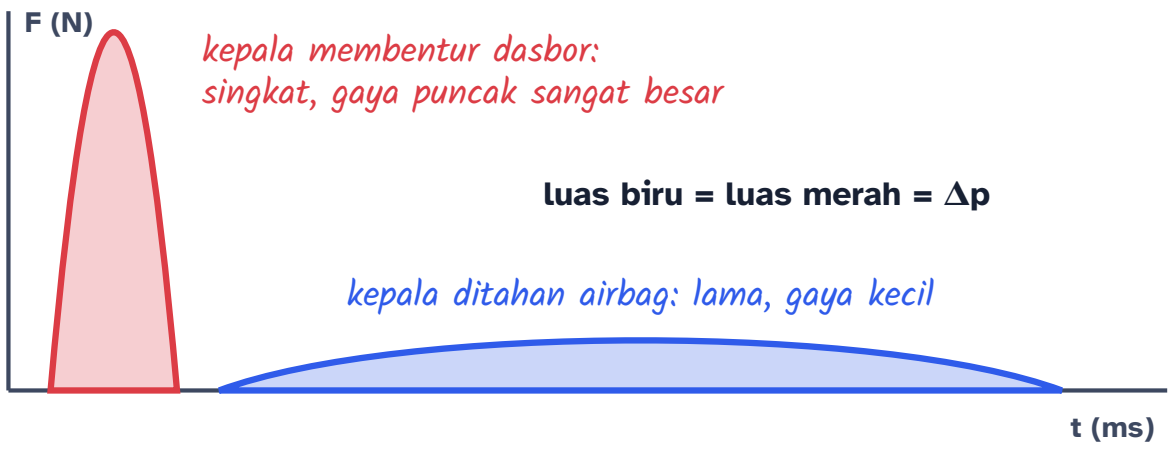
N

Benda **50** kg yang melaju **6** m/s lalu berhenti dalam **0,3** s menerima gaya rata-rata **1.000** N. Coba perkecil Δt menjadi 0,01 s: gayanya melonjak 30 kali!

Satuan Nusantara: ≈ 2 × berat orang 50 kg · ≈ 4,1 × berat karung beras 25 kg · ≈ 10% dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: $\frac{\mathrm{kg\,m/s}}{\mathrm{s}} = \mathrm{kg\,m/s^2} = \mathrm{N}$

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



Impuls adalah **luas di bawah grafik** F–t. Kedua benturan menghentikan kepala yang sama dari kecepatan yang sama, jadi luasnya sama. Airbag "meratakan" grafik: waktunya panjang, puncaknya rendah.

Tebak Dulu!

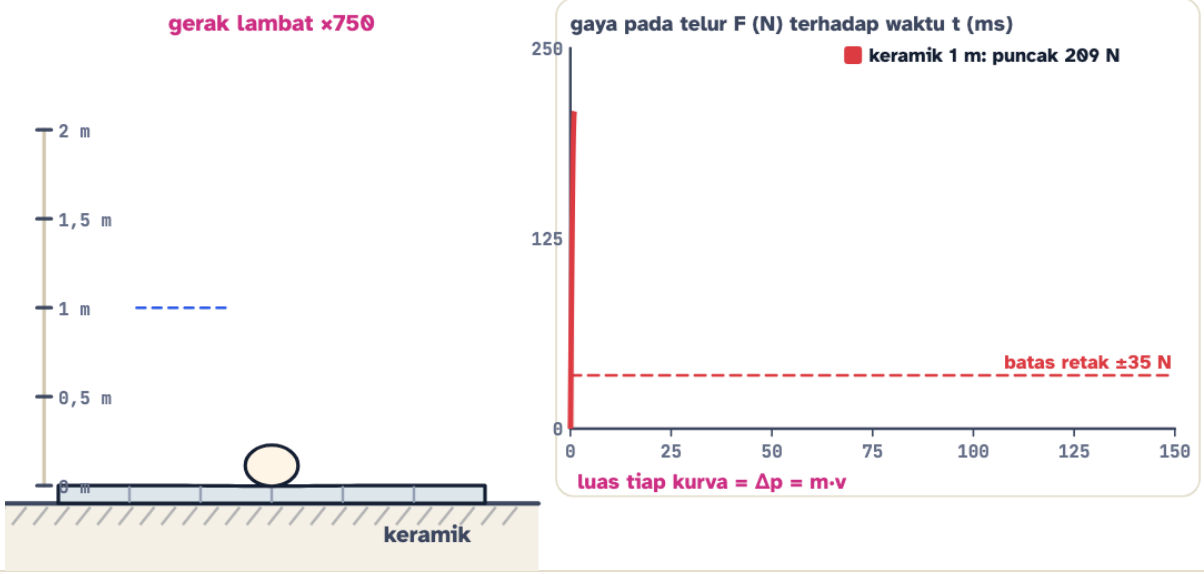
Telur dijatuhkan dari ketinggian yang sama ke lantai keramik dan ke kasur. Di kasur, telur tidak pecah. Mengapa?

- Kasur mengurangi perubahan momentum telur.
- Kasur menyerap momentum telur sampai habis.
- Kasur memperpanjang waktu benturan, sehingga gaya pada telur lebih kecil.
- Telur menjadi lebih ringan saat jatuh ke kasur.

Jawabannya: waktu benturan lebih lama. Di keramik maupun di kasur, telur berhenti dari kecepatan yang sama, jadi perubahan momentumnya *sama*. Bedanya, keramik menghentikan telur dalam ±0,002 detik, sedangkan kasur ±0,1 detik, 50 kali lebih lama. Gaya rata-ratanya pun 50 kali lebih kecil. Buktikan sendiri di Lab Mini berikut!

LAB MINI **Lab jatuhkan telur: keramik, karpet, busa, atau kasur?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-9



Kelajuan saat menyentuh	Δp = luas grafik	Lama benturan	F rata-rata	F puncak
4,43 m/s	0,266 N·s	2 ms	132,8 N	208,6 N

Telur
Benturan (gerak lambat ×750)

Pilih permukaan dan ketinggian, lalu tekan **Jalankan**. Benturan diputar dalam gerak lambat dan grafik F–t tergambar. Ulangi dengan permukaan lain: luas di bawah kurva (Δp) tetap sama, tetapi puncaknya? Garis merah putus-putus adalah perkiraan gaya yang membuat cangkang retak.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Airbag, helm, dan matras **tidak** mengurangi perubahan momentum. Mereka hanya memperpanjang waktunya. Lebih mengejutkan lagi: benda yang **memantul** mengalami perubahan momentum *lebih besar* daripada benda yang berhenti menempel. Bola yang datang 10 m/s lalu memantul 10 m/s mengalami $\Delta v = 20$ m/s, dua kali lipat! Itu sebabnya bantalan pengaman dirancang agar tidak memantulkan benda.

CONTOH **Tendangan penalti**

Bola 0,4 kg yang diam ditendang hingga melaju 25 m/s. Kaki menyentuh bola selama 0,01 s. Berapa impuls dan gaya rata-rata kaki pada bola?

1. Impuls = perubahan momentum: $I = mv - 0 = 0{,}4 \times 25 = 10$ N·s.
2. Gaya rata-rata: $F = \dfrac{I}{\Delta t} = \dfrac{10}{0{,}01} = 1000$ N.

Kaki menghantam bola dengan gaya rata-rata 1.000 N, setara berat orang bermassa 100 kg, tetapi hanya selama seperseratus detik.

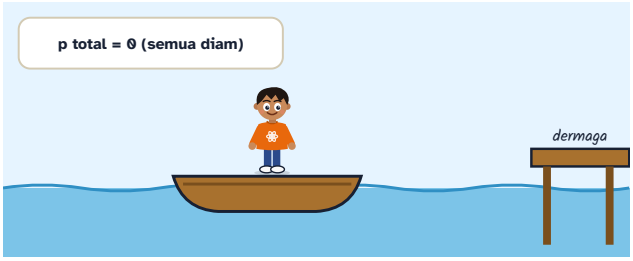
FISIKA INDONESIA: MENGAPA BOM IKAN DILARANG

Indonesia berada di jantung **Segitiga Terumbu Karang** dunia. Sayangnya, masih ada yang menangkap ikan dengan bahan peledak. Ledakan di air menghasilkan gelombang tekanan yang memberi impuls sangat besar dalam waktu sangat singkat. Gaya puncaknya merobek organ dalam ikan (termasuk ikan kecil yang tidak ditangkap) dan menghancurkan karang yang butuh puluhan tahun untuk tumbuh. Karena merusak dan berbahaya bagi nelayan sendiri, penangkapan ikan dengan bahan peledak dilarang undang-undang.

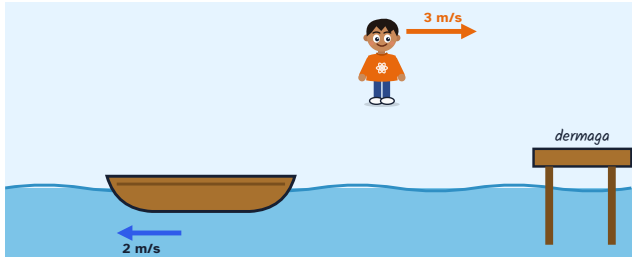
9.3 Hukum kekekalan momentum

Bayangkan dua benda, A dan B, saling mendorong (bertumbukan, meledak, atau saling melempar). Menurut Hukum III Newton, gaya A pada B sama besar dan berlawanan arah dengan gaya B pada A, dan keduanya bekerja **selama waktu yang sama**. Jadi impulsnya juga sama besar dan berlawanan: momentum yang "hilang" dari A persis "pindah" ke B.

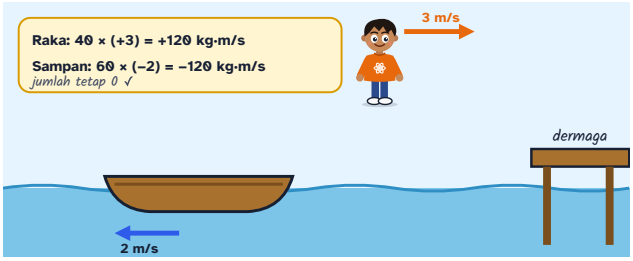
Hukum kekekalan momentum. Jika gaya luar total pada suatu sistem nol, momentum total sistem tetap: $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$.



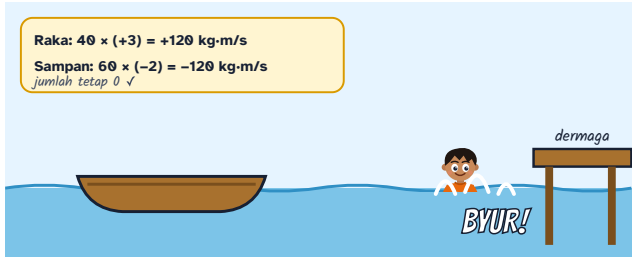
Langkah 1. Raka (40 kg) berdiri di atas sampan (60 kg) yang diam di Sungai Musi. Momentum total sistem Raka + sampan = 0.



Langkah 2. Raka melompat ke arah dermaga dengan kecepatan 3 m/s. Kakinya mendorong sampan ke belakang, dan sampan mendorong Raka ke depan (Hukum III).



Langkah 3. Momentum total harus tetap nol, jadi sampan terdorong ke belakang: $60\,v = -120 \rightarrow v = -2$ m/s.



Langkah 4. Akibatnya, dorongan lompatan "terbagi" dengan sampan, dan dermaga ternyata terlalu jauh... BYUR! Pelajaran: tambatkan sampan ke dermaga dulu. Tali tambat memberi **gaya luar** yang menahan sampan.

KERJAKAN BERSAMA — Melempar karung dari papan beroda

Kak Nara (60 kg) berdiri di atas papan beroda (5 kg) yang diam, sambil memeluk karung beras 25 kg. Ia melempar karung ke depan dengan kecepatan 2 m/s. Gesekan roda diabaikan. Berapa kecepatan Kak Nara setelah melempar?

1. Sistem: Kak Nara + papan + karung. Mula-mula diam, jadi $p_{\text{awal}} = 0$.
2. Setelah melempar: $25 \times 2 + (60 + 5)\,v = 0$.
3. $v = -\dfrac{50}{65} \approx -0{,}77$ m/s.

Kak Nara meluncur mundur ±0,77 m/s. Tanda minus berarti arahnya berlawanan dengan lemparan. Inilah prinsip rekoil (tolakan) yang juga mendorong roket.

TRIK KAK NARA: "SEBELUM = SESUDAH, JANGAN LUPA TANDA"

Pilih satu arah sebagai positif (misalnya ke kanan), lalu tulis semua kecepatan dengan tandanya. Benda yang bergerak ke kiri diberi tanda minus. Hampir semua kesalahan soal momentum berasal dari tanda yang terlupa!

9.4 Tumbukan: memantul, setengah memantul, atau menempel

Tebak Dulu!

Kelereng A menabrak lurus kelereng B yang diam. Massa keduanya sama, dan tumbukannya lenting sempurna (tidak ada energi yang hilang). Setelah tumbukan...

- keduanya bergerak bersama dengan setengah kecepatan A.
- A berhenti, B melaju dengan kecepatan awal A.
- A memantul balik, B tetap diam.
- B melaju dua kali kecepatan A.

Jawabannya: A berhenti, B melaju dengan kecepatan A. Pilihan "bergerak bersama setengah kecepatan" memenuhi kekekalan momentum, tetapi energi kinetiknya tinggal separuh, jadi tidak lenting sempurna. Satu-satunya cara agar momentum *dan* energi sama-sama kekal adalah A dan B "bertukar" kecepatan. Kamu bisa melihatnya pada permainan gundu dan bola biliar.

Dalam setiap tumbukan (tanpa gaya luar yang berarti), **momentum selalu kekal**. Yang berbeda adalah nasib energi kinetiknya.

Jenis tumbukan	Momentum	Energi kinetik	Koefisien restitusi	Contoh
Lenting sempurna	kekal	kekal	$e = 1$	tumbukan antarmolekul gas; kira-kira bola biliar
Lenting sebagian	kekal	berkurang	$0 < e < 1$	bola memantul, kelereng, mobil bertabrakan lalu terpisah
Tidak lenting sama sekali	kekal	berkurang paling banyak	$e = 0$	gerbong kereta tersambung, anak panah menancap di sasaran, lumpur menempel

RUMUS HIDUP

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.

- m_1 Massa gerbong 1 ton
- v_1 Kecepatan gerbong 1 m/s
- m_2 Massa gerbong 2 ton
- v_2 Kecepatan gerbong 2 m/s
- v' Kecepatan bersama m/s

KECEPATAN BERSAMA

2

m/s

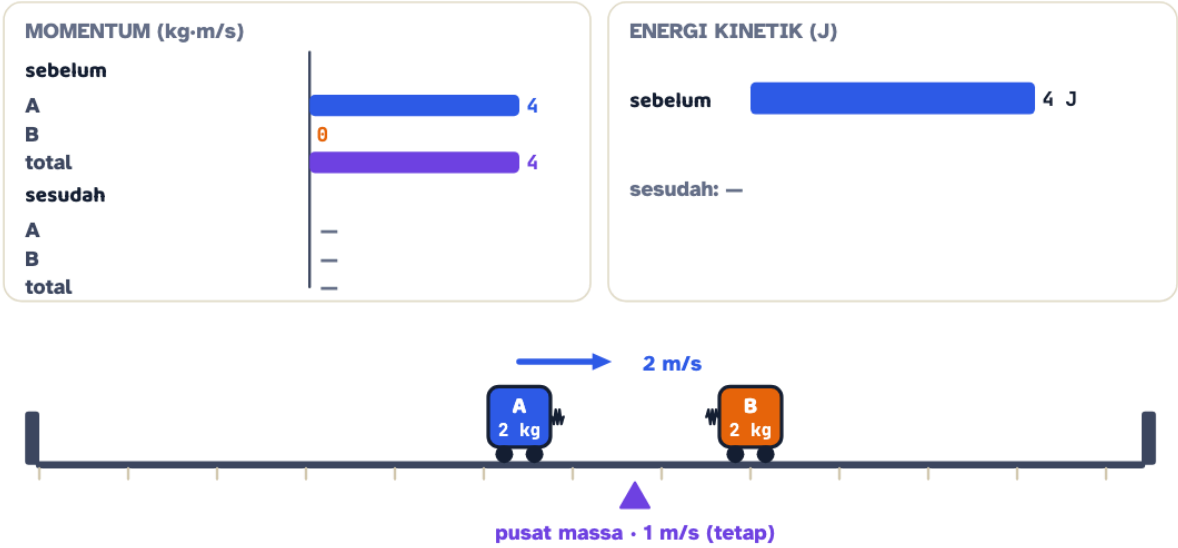
Gerbong **20** ton (kecepatan **3** m/s) tersambung dengan gerbong **10** ton (**0** m/s). Setelah tersambung keduanya melaju **2** m/s.

Cek satuan: $\frac{\text{ton} \cdot \text{m/s}}{\text{ton}} = \text{m/s}$: satuan massa saling menghapus.

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

LAB MINI Rel tumbukan: dua troli, satu hukum

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-9



Σp sebelum	Σp sesudah	Ek sebelum	Ek sesudah	v A sesudah	v B sesudah
4 kg·m/s	—	4 J	—	—	—

Keadaan
Mendekat…

Atur massa, kecepatan, dan koefisien restitusi e, lalu tekan **Jalankan**. Bandingkan batang momentum dan energi sebelum dan sesudah. Segitiga ungu adalah **pusat massa**: apakah kecepatannya berubah saat tumbukan? Coba juga $e = 0$ (troli menempel) dan dua troli bermassa sama dengan $e = 1$.

KERJAKAN BERSAMA Langsir gerbong di stasiun

Gerbong barang 20 ton melaju 3 m/s lalu menabrak dan tersambung dengan gerbong 10 ton yang diam. Berapa kecepatan bersamanya, dan berapa energi kinetik yang hilang?

1. Kekekalan momentum: $20\,000 \times 3 + 0 = 30\,000\,v'$ → $v' = 2$ m/s.
2. Energi kinetik sebelum: $\frac{1}{2} \times 20\,000 \times 3^2 = 90\,000$ J.
3. Energi kinetik sesudah: $\frac{1}{2} \times 30\,000 \times 2^2 = 60\,000$ J.
4. Hilang: $30\,000$ J, menjadi panas, bunyi "JEDUG!", dan deformasi pengait.

Kecepatan bersama 2 m/s, dan sepertiga energi kinetik (30 kJ) berubah bentuk. Momentum tetap utuh, tetapi energi kinetik tidak.

COBA SENDIRI **Kelereng kecil menabrak kelereng besar**

Kelereng 10 g yang melaju 2 m/s menabrak lurus gundu besar 30 g yang diam. Tumbukannya lenting sempurna. Tentukan kecepatan keduanya setelah tumbukan.

1. Momentum: $0{,}01 \times 2 = 0{,}01\, v_1' + 0{,}03\, v_2'$, atau $2 = v_1' + 3v_2'$.
2. Lenting sempurna ($e = 1$): kecepatan relatif berbalik, $v_2' - v_1' = 2 - 0 = 2$.
3. Kurangkan kedua persamaan: $4v_2' = 4$ → $v_2' = 1$ m/s, lalu $v_1' = -1$ m/s.
4. Cek energi: sebelum $\frac{1}{2}(0{,}01)(4) = 0{,}02$ J; sesudah $\frac{1}{2}(0{,}01)(1) + \frac{1}{2}(0{,}03)(1) = 0{,}02$ J. ✓

Kelereng kecil memantul balik 1 m/s, gundu besar maju 1 m/s. Pada tumbukan lenting sempurna, benda ringan yang menabrak benda berat yang diam selalu terpental balik.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

RUMUS UMUM TUMBUKAN LENTING SEMPURNA 1D

Jika m_2 mula-mula diam: $v_1' = \dfrac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1$ dan $v_2' = \dfrac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$. Tiga kasus istimewa: massa sama → bertukar kecepatan; benda sangat berat menabrak benda ringan → benda ringan melesat hampir $2v_1$; benda ringan menabrak tembok berat → memantul dengan kelajuan hampir sama. Trik elegan: pindah ke kerangka pusat massa. Di sana tumbukan lenting hanya membalik arah kecepatan masing-masing benda.

TAMU DARI MASA LALU: PERANG "VIS VIVA"

Pada abad ke-17 dan ke-18, para ilmuwan berdebat sengit. René Descartes berpendapat besaran yang kekal adalah "jumlah gerak" (kira-kira mv). Gottfried Leibniz membela *vis viva*, "gaya hidup" mv^2. Bertahun-tahun kemudian, **Émilie du Châtelet** mempopulerkan percobaan Willem 's Gravesande: bola logam dijatuhkan ke tanah liat. Bola dengan kecepatan dua kali lipat membuat lubang **empat kali** lebih dalam, sehingga v^2 memang penting. Ternyata keduanya benar! Momentum mv selalu kekal dalam tumbukan, sedangkan $\frac{1}{2}mv^2$ (energi kinetik) hanya kekal pada tumbukan lenting sempurna.

MITOS

"Dalam tumbukan, energi kinetik selalu kekal seperti momentum."

FAKTA

Hanya momentum yang selalu kekal (tanpa gaya luar). Energi kinetik biasanya berkurang karena berubah menjadi panas, bunyi, dan perubahan bentuk. Hanya tumbukan lenting sempurna yang menyimpan seluruh energi kinetiknya.

MITOS

"Benda yang lebih berat pasti punya momentum lebih besar."

FAKTA

Momentum bergantung pada massa **dan** kecepatan. Bola sepak 0,43 kg yang ditendang 25 m/s (±11 kg·m/s) punya momentum lebih besar daripada karung beras 5 kg yang didorong pelan 1 m/s (5 kg·m/s).

9.5 Koefisien restitusi: seberapa "membal" sebuah tumbukan

Koefisien restitusi e membandingkan kelajuan relatif kedua benda sesudah dan sebelum tumbukan: $e = -\frac{v_2' - v_1'}{v_2 - v_1}$. Nilainya antara 0 (menempel) dan 1 (lenting sempurna).

Untuk bola yang dijatuhkan ke lantai diam, rumus ini menjadi sangat praktis. Bola jatuh dari ketinggian h tiba dengan $\sqrt{2gh}$ dan memantul dengan $e\sqrt{2gh}$, sehingga naik setinggi $h' = e^2 h$. Jadi $e = \sqrt{h'/h}$: cukup ukur tinggi jatuh dan tinggi pantulan!

RUMUS HIDUP

Tinggi pantulan ke-n

$$h_n = h\,e^{2n}$$

Setiap kali memantul, tinggi bola dikali e². Bola dengan e = 0,8 kehilangan 36% energinya pada setiap pantulan.

- h Tinggi jatuh awal m
- e Koefisien restitusi
- n Pantulan ke-
- h_n Tinggi pantulan m

TINGGI PANTULAN

1,152

m

Bola dijatuhkan dari **1,8** m dengan e = **0,8**. Setelah pantulan ke-**1**, tingginya tinggal **1,152** m.

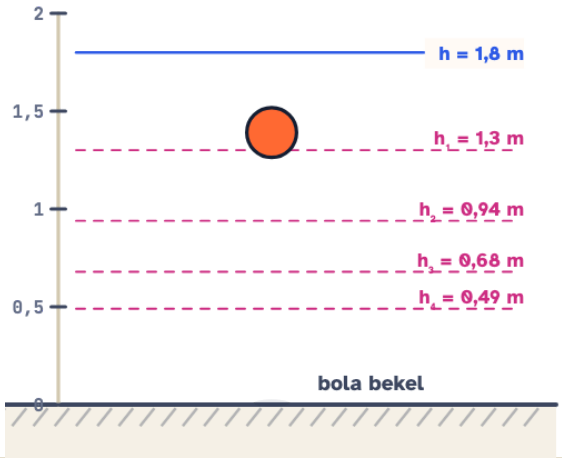
Satuan Nusantara: ≈ 77% dari tinggi Raka · ≈ 144 × semut rangrang

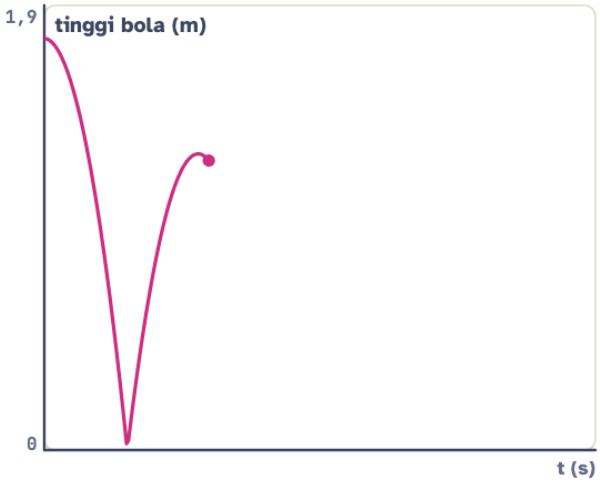
Cek satuan: e tidak bersatuan, sehingga h_n bersatuan meter seperti h.

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

LAB MINI Bola memantul: dari bola bekel sampai plastisin

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-9





Pantulan ke-1	Pantulan ke-2	Pantulan ke-3	Energi tersisa per pantulan	Jumlah pantulan
1,295 m	–	–	72 %	1

Waktu sampai diam (teori)
7,48 s

Pilih jenis bola (atau geser e sendiri) dan tinggi jatuh, lalu tekan **Jalankan**. Garis putus-putus menunjukkan ramalan $h_n = e^{2n}h$. Apakah bola menyentuh garis-garis itu? Bola dengan e berapa yang paling lama memantul?

Bola (di lantai keras)	e kira-kira	Energi tersisa per pantulan (e^2)
Bola pingpong	±0,9	±81%
Bola bekel (karet padat)	±0,85	±72%
Bola basket	±0,8	±64%
Bola tenis	±0,75	±56%
Gumpalan plastisin	±0	±0% (menempel)

KERJAKAN BERSAMA **Mengukur e bola basket**

Bola basket dijatuhkan dari ketinggian 1,8 m dan memantul setinggi 1,2 m. Berapa koefisien restitusinya, dan setinggi apa pantulan kedua?

1. $e = \sqrt{h'/h} = \sqrt{1{,}2/1{,}8} = \sqrt{0{,}667} \approx 0{,}82.$

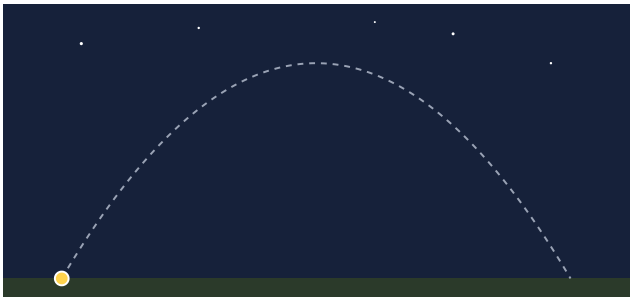
2. Pantulan kedua: $h_2 = e^2 \times h_1 = 0{,}667 \times 1{,}2 = 0{,}8$ m.

$e \approx 0{,}82$. **Setiap pantulan menyisakan dua pertiga tinggi sebelumnya: 1,8 m → 1,2 m → 0,8 m → ±0,53 m, dan seterusnya.**

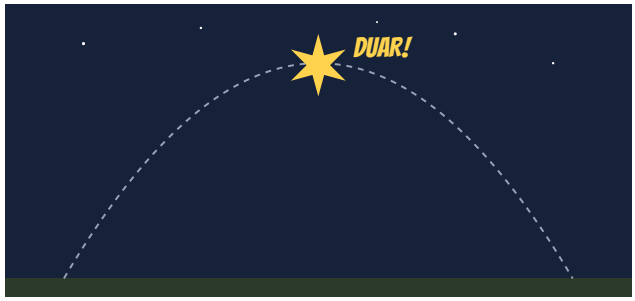
9.6 Pusat massa: titik yang "mewakili" seluruh sistem

Setiap sistem benda punya satu titik istimewa yang disebut **pusat massa**, yaitu posisi rata-rata massanya. Untuk benda-benda pada satu garis: $x_{\text{pm}} = \dfrac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$. Pusat massa lebih dekat ke benda yang lebih berat.

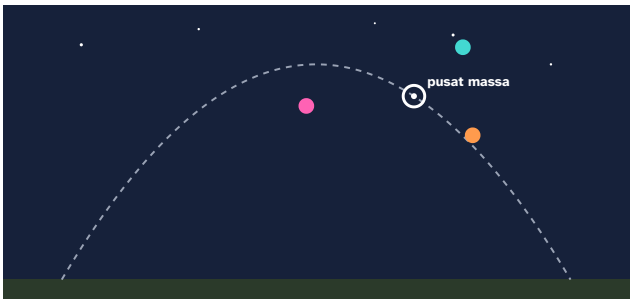
Gerak pusat massa. Pusat massa bergerak seolah-olah seluruh massa sistem terkumpul di sana dan semua **gaya luar** bekerja padanya. Gaya dalam (tumbukan, ledakan, dorongan antaranggota sistem) tidak bisa mengubah gerak pusat massa.



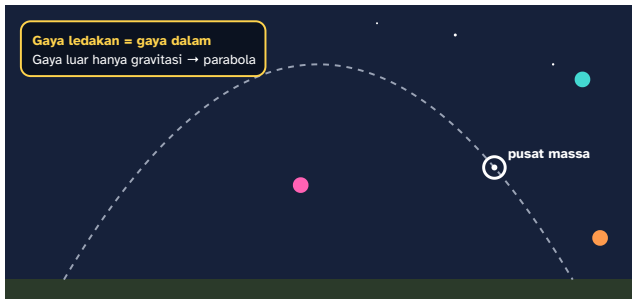
Langkah 1. Kembang api ditembakkan miring. Tanpa ledakan, ia akan mengikuti lintasan parabola (garis putus-putus), seperti di Bab 5.



Langkah 2. Di puncak lintasan, kembang api meledak menjadi tiga pecahan bermassa sama. DUAR!



Langkah 3. Pecahan terbang ke arah berbeda-beda. Tetapi lihat lingkaran putih, pusat massa ketiganya: ia tetap di garis parabola!



Langkah 4. Selama belum ada pecahan yang menyentuh tanah, pusat massa terus menempuh parabola semula. Ledakan adalah gaya dalam, jadi tidak mengubah gerak pusat massa. Satu-satunya gaya luar tetap gravitasi.

CONTOH **Pusat massa dua orang di perahu**

Raka (40 kg) duduk di ujung kiri perahu ($x = 0$) dan Kak Nara (60 kg) di ujung kanan ($x = 4$ m). Massa perahu diabaikan. Di mana pusat massa mereka?

1. $x_{\text{pm}} = \dfrac{40 \times 0 + 60 \times 4}{40 + 60} = \dfrac{240}{100}$.

2. $x_{\text{pm}} = 2{,}4$ m dari ujung kiri.

Pusat massa berada 2,4 m dari Raka, lebih dekat ke Kak Nara yang lebih berat. Jika keduanya bertukar tempat di perahu yang mengapung, pusat massa mereka tidak boleh berpindah (tidak ada gaya luar mendatar), sehingga perahunya yang bergeser!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BENDA KONTINU DAN TRIK "MASSA NEGATIF"

Untuk benda kontinu, jumlahan menjadi integral: $x_{\text{pm}} = \dfrac{1}{M}\int x\,\mathrm{d}m$. Hasil penting: setengah cakram pejal berjari-jari R punya pusat massa $\dfrac{4R}{3\pi}$ dari sisi lurusnya; kerucut pejal $\frac{h}{4}$ dari alasnya. Untuk benda yang dilubangi, anggap lubang sebagai benda bermassa **negatif**: $x_{\text{pm}} = \dfrac{Mx_{\text{utuh}} - mx_{\text{lubang}}}{M - m}$. Trik ini menyelesaikan soal "pelat berlubang" dalam satu baris.

9.7 Lanjut: roket, si pelempar gas

Bahasa sederhana · Roket terbang dengan cara "melempar" gas panas ke belakang sangat cepat. Gas terdorong ke belakang, roket terdorong ke depan, persis seperti Kak Nara yang melempar karung dari papan beroda.

Roket adalah contoh kekekalan momentum yang paling dramatis. Setiap detik, mesin roket menyemburkan massa Δm gas dengan kecepatan u relatif terhadap roket. Gas membawa momentum ke belakang, sehingga roket mendapat momentum ke depan. Gaya dorongnya $F = u\,\dfrac{\Delta m}{\Delta t}$: makin cepat dan makin banyak gas yang disemburkan, makin besar dorongannya.

TAMU DARI MASA LALU

Konstantin Tsiolkovsky (1857–1935) adalah guru matematika di sebuah kota kecil di Rusia. Ia hampir tuli sejak kecil dan banyak belajar sendiri di perpustakaan. Pada tahun 1903 ia menerbitkan persamaan yang menjadi dasar semua perjalanan antariksa, puluhan tahun sebelum roket pertama mencapai luar angkasa. Kalimatnya yang terkenal: "Bumi adalah buaian umat manusia, tetapi manusia tidak bisa tinggal di buaian selamanya."

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERSAMAAN ROKET TSIOLKOVSKY

Di ruang hampa tanpa gravitasi, kekekalan momentum untuk semburan kecil $\mathrm{d}m$ memberi $m\,\mathrm{d}v = -u\,\mathrm{d}m$. Integrasikan dari massa awal m_0 sampai massa akhir m_1:

$$\Delta v = u \ln \frac{m_0}{m_1}.$$

Logaritma ini kejam: untuk menggandakan Δv, perbandingan massa harus **dikuadratkan**. Itu sebabnya roket ke orbit hampir seluruhnya berisi bahan bakar dan dibuat bertingkat: tangki kosong dibuang supaya tidak ikut dipercepat. Indonesia juga mengembangkan roket sendiri, misalnya seri RX dari LAPAN (kini BRIN).

Helm berbusa

Busa di dalam helm remuk perlahan saat benturan, sehingga kepala berhenti dalam waktu lebih lama dan gaya pada kepala berkurang.

Zona remuk & airbag

Bagian depan mobil sengaja dibuat mudah ringsek. Lebih baik mobilnya yang remuk perlahan daripada penumpangnya berhenti mendadak.

Matras lompat tinggi

Atlet lompat tinggi mendarat di matras tebal. Waktu pendaratan bertambah lama, gaya pada punggung mengecil.

Main gundu

Gundu yang menabrak lurus gundu lain yang sama besar bisa berhenti di tempat, sementara gundu sasaran melesat: tukar kecepatan!

Selang pemadam kebakaran

Air yang menyembur deras ke depan mendorong selang ke belakang, sehingga petugas pemadam harus memegangnya dengan kuat. Itu rekoil!

Menangkap bola

Pemain yang menarik tangannya ke belakang saat menangkap bola memperpanjang waktu tangkapan, jadi telapak tangan tidak terasa perih.

Cek Cepat

Motor 150 kg melaju 10 m/s. Momentumnya...

- 15 kg·m/s
- 1.500 kg·m/s
- 7.500 kg·m/s
- 160 kg·m/s

Airbag mengurangi cedera karena...

- mengurangi massa penumpang
- mengurangi perubahan momentum penumpang
- membuat penumpang memantul kembali
- memperpanjang waktu penumpang berhenti

Bola dijatuhkan dari 2 m dan memantul setinggi 0,5 m. Koefisien restitusinya...

- 0,5
- 0,25
- 0,75
- 4

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: detektif pantulan

Bahan: beberapa bola berbeda (bola bekel, bola pingpong, bola plastik, bola tenis), meteran yang ditempel di dinding, HP dengan mode video gerak lambat (*slow motion*)

1. Tempelkan meteran tegak di dinding, mulai dari lantai.
2. Jatuhkan bola dari ketinggian 1 m (dasar bola sejajar angka 100 cm) tanpa didorong.
3. Rekam dengan video gerak lambat, lalu putar ulang untuk membaca tinggi pantulan pertama h'. Ulangi 3 kali dan ambil rata-ratanya.
4. Hitung $e = \sqrt{h'/1\ \mathrm{m}}$ untuk setiap bola. Coba juga di lantai keramik, karpet, dan rumput.

Pertanyaan: Bola mana yang paling "membal"? Apakah nilai e hanya milik bola, atau juga bergantung pada lantainya? Ke mana perginya energi yang hilang?

RINGKASAN KILAT — Bab 9 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menghitung **momentum** $p = mv$ dan **impuls** $I = F\Delta t$, serta membaca impuls sebagai luas di bawah grafik F–t
- menjelaskan mengapa airbag, helm, dan matras mengurangi gaya benturan
- memakai **hukum kekekalan momentum** untuk tolakan (rekoil), ledakan, dan tumbukan
- membedakan tumbukan **lenting sempurna**, **lenting sebagian**, dan **tidak lenting sama sekali** memakai koefisien restitusi e
- menentukan **pusat massa** dan memahami mengapa geraknya tidak terpengaruh ledakan

Istilah kunci

momentum | impuls | Koefisien restitusi | pusat massa

Rumus penting

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m\,v}{\Delta t}$$

Gaya rata-rata saat benda dihentikan. Gaya penghenti = momentum yang harus dihapus dibagi waktu menghapusnya. Perpanjang waktunya, gayanya mengecil!

$$v' = \frac{m_1\,v_1 + m_2\,v_2}{m_1 + m_2}$$

Kecepatan bersama setelah tumbukan menempel. Kedua benda menempel dan bergerak bersama. Momentum total sebelum dibagi massa total sesudah.

$$h_n = h\,e^{2n}$$

Tinggi pantulan ke-n. Setiap kali memantul, tinggi bola dikali e^2. Bola dengan e = 0,8 kehilangan 36% energinya pada setiap pantulan.

Jangan sampai terjebak

- Airbag, helm, dan matras tidak mengurangi perubahan momentum.

⛰️ 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=9

🧩 Teka-teki untuk Bab 10

Sari duduk di kursi putar sambil merentangkan tangan, lalu Raka memutarnya pelan. Tanpa ada yang mendorong lagi, Sari merapatkan tangannya ke dada, dan tiba-tiba ia berputar **jauh lebih cepat**! Tidak ada gaya luar yang mempercepatnya. Apakah ada "momentum" khusus untuk benda yang berputar, dan mengapa ia ikut kekal?

▼ Intip petunjuk

Untuk benda berputar, yang penting bukan hanya massa, tetapi juga **seberapa jauh** massa itu dari sumbu putar. Saat tangan dirapatkan, "kelembaman putar"-nya mengecil, sehingga kecepatan putarnya harus membesar. Besaran yang kekal bernama **momentum sudut**. Kita bongkar di Bab 10: Rotasi & Kesetimbangan Benda Tegar.

BAB 10 · GERAK & GAYA

10 Rotasi: Ilmu Memutar, Menyeimbangkan, dan Menggelinding

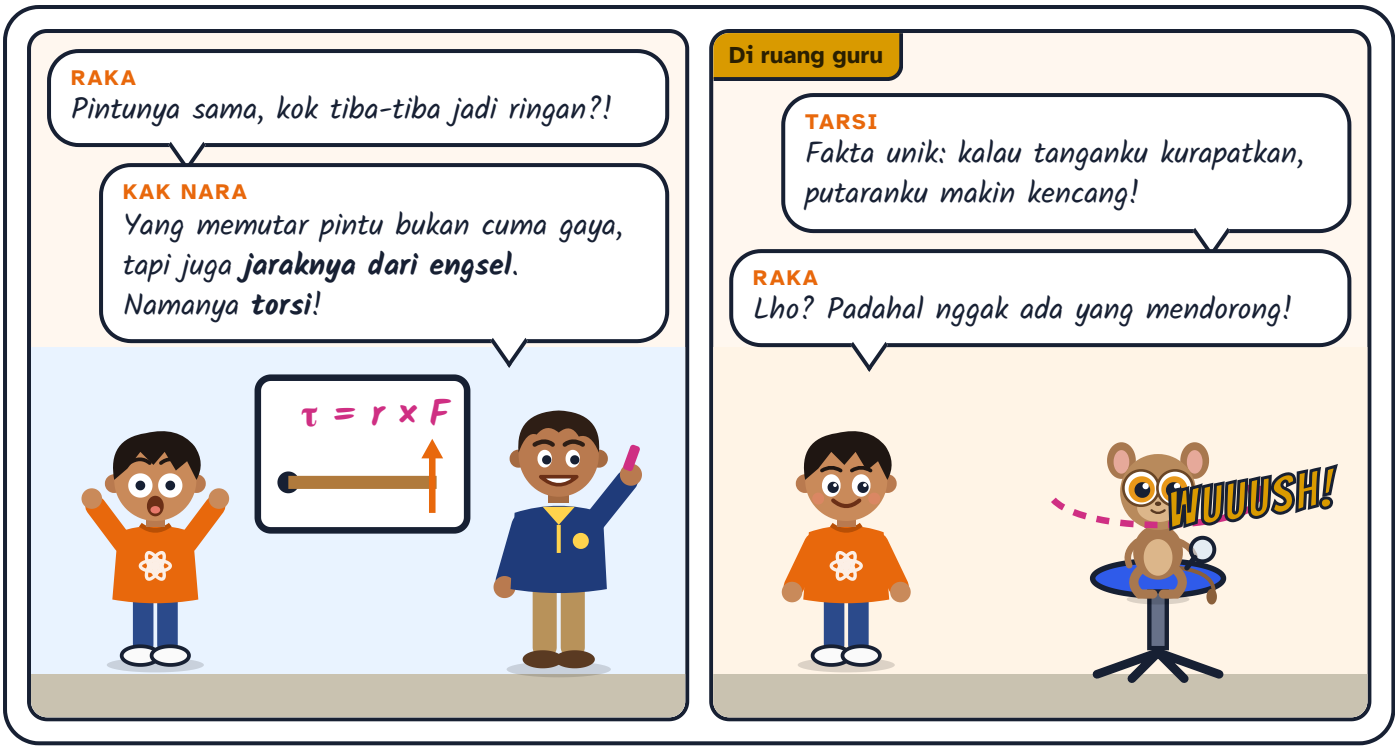
Mengapa gagang pintu selalu dipasang jauh dari engsel? Mengapa gasing yang berputar tidak roboh? Selamat datang di dunia benda yang berputar, tempat jarak sama pentingnya dengan gaya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **torsi** $\tau = rF\sin\theta$ dan menjelaskan peran lengan momen;
- memakai dua syarat **kesetimbangan benda tegar** ($\Sigma F = 0$ dan $\Sigma\tau = 0$) untuk jungkat-jungkit, pikulan, dan jembatan;
- menentukan **titik berat** dan menilai kapan benda stabil atau terguling;
- memahami **momen inersia**, memakai $\tau = I\alpha$, dan memprediksi pemenang balapan menggelinding;
- menerapkan **kekekalan momentum sudut** pada penari, gasing, dan peloncat indah.

PINTU KELAS YANG BANDEL

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Kamu ingin membuka pintu yang berat dengan gaya sekecil mungkin. Di mana dan ke arah mana sebaiknya kamu mendorong?

- Dekat engsel, tegak lurus daun pintu.
- Di tengah daun pintu, ke arah mana saja.
- Di tepi terjauh dari engsel, sejajar daun pintu (ke arah engsel).
- Di tepi terjauh dari engsel, tegak lurus daun pintu.

Jawabannya: di tepi terjauh, tegak lurus daun pintu. Efek memutar sebuah gaya (torsi) bergantung pada *besar gaya*, *jarak dari sumbu putar*, dan *arah gaya*. Jarak terbesar dan arah tegak lurus memberi efek putar paling besar. Mendorong sejajar daun pintu ke arah engsel tidak memutar pintu sama sekali, sekuat apa pun dorongannya!

10.1 Torsi: efek memutar sebuah gaya

Di Bab 6, gaya mengubah gerak **lurus**. Untuk gerak **berputar**, yang menentukan adalah **torsi** atau *momen gaya* (τ, dibaca "tau"). Torsi besar jika gayanya besar, jaraknya dari sumbu putar jauh, dan arahnya tegak lurus terhadap "lengan" yang menghubungkan sumbu dengan titik tangkap gaya.

Torsi. $\tau = r\,F \sin\theta = F \cdot d$, dengan r jarak sumbu ke titik tangkap gaya, θ sudut antara r dan F, dan $d = r \sin\theta$ disebut **lengan momen** (jarak tegak lurus dari sumbu ke garis kerja gaya). Satuannya N·m. Kita sepakati: torsi yang memutar **berlawanan arah jarum jam** bernilai positif.

Bahasa sederhana · Gampangnya: **torsi = gaya × jarak dari poros**. Makin jauh dari poros kamu mendorong, makin mudah benda berputar. Itu sebabnya gagang pintu dipasang di ujung, jauh dari engsel.

RUMUS HIDUP **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.

- r Jarak dari engsel m
- F Gaya dorong N
- θ Sudut gaya terhadap daun pintu °
- τ Torsi N·m

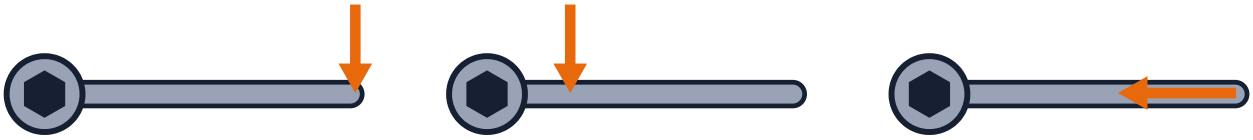
TORSI
16
N·m

Gaya **20** N di jarak **0,8** m dari engsel dengan sudut **90°** menghasilkan torsi **16** N·m. Geser jaraknya menjadi 0,2 m: kamu butuh gaya empat kali lebih besar untuk torsi yang sama.

Cek satuan: $\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}$. Walaupun sama-sama N·m, torsi **bukan** joule: torsi tidak memindahkan energi, hanya mengukur efek putar.

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

gaya sama-sama 100 N, efek putarnya berbeda



r = 0,30 m, tegak lurus	r = 0,10 m, tegak lurus	sejajar gagang (θ = 0°)
τ = 0,30 × 100 = 30 N·m	τ = 0,10 × 100 = 10 N·m	τ = 0: mur tidak berputar!

Kunci roda motor: gaya yang sama memberi torsi berbeda bergantung pada jarak dan arahnya. Montir yang kesulitan melepas mur sering menyambung gagang kunci dengan pipa agar lengannya lebih panjang.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Jarak yang dipakai adalah **lengan momen**, yaitu jarak *tegak lurus* dari sumbu ke garis kerja gaya, bukan sekadar jarak ke titik tangkap gaya. Gaya yang garis kerjanya melewati sumbu putar (misalnya menarik gagang pintu lurus menjauhi engsel) menghasilkan torsi **nol**, sebesar apa pun gayanya.

CONTOH **Melepas mur roda motor**

Raka mendorong ujung kunci roda sepanjang 25 cm dengan gaya 80 N tegak lurus gagang. Berapa torsinya? Jika mur butuh torsi 30 N·m untuk lepas, berhasilkah ia?

1. $\tau = rF\sin 90^\circ = 0{,}25 \times 80 \times 1 = 20$ N·m.
2. 20 N·m < 30 N·m, jadi mur belum lepas.
3. Dengan pipa sambungan, panjang lengan menjadi 40 cm: $\tau = 0{,}40 \times 80 = 32$ N·m > 30 N·m.

Gaya yang sama, lengan lebih panjang: mur pun lepas. Tidak perlu otot lebih besar, cukup fisika yang lebih cerdas!

10.2 Kesetimbangan benda tegar: tidak bergeser, tidak berputar

Benda titik cukup memenuhi $\Sigma F = 0$ agar seimbang. Tetapi papan jungkat-jungkit bisa saja tidak bergeser namun **berputar**. Benda tegar (benda yang bentuknya tidak berubah) baru benar-benar setimbang jika memenuhi **dua syarat**.

Syarat kesetimbangan benda tegar. (1) $\Sigma F = 0$: tidak ada percepatan lurus. (2) $\Sigma\tau = 0$ terhadap titik mana pun: tidak ada percepatan sudut. Trik jitu: pilih titik poros di tempat gaya yang tidak diketahui bekerja, agar torsinya nol dan hilang dari persamaan.

LAB MINI **Jungkat-jungkit: seret, timbang, seimbangkan!**

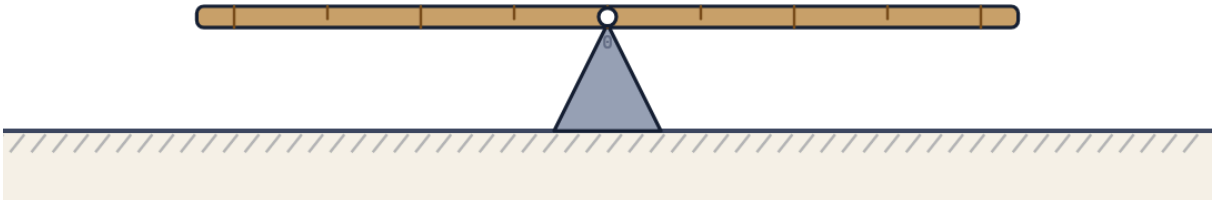
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-10

TORSI TERHADAP TITIK TUMPU

↺ kiri 0

↻ kanan 0

Papan kosong: seret beban ke papan



Torsi kiri (↺)	Torsi kanan (↻)	Στ (↺ positif)
0 N·m	0 N·m	0 N·m

Keadaan

Papan kosong: seret beban ke papan

Seret Raka, Sari, Kak Nara, atau karung beras ke atas papan (posisi melompat tiap 10 cm). Bandingkan torsi kiri dan kanan. Bisakah kamu menyeimbangkan Kak Nara (60 kg) hanya dengan Raka (40 kg)? Lalu geser titik tumpu: papan bermassa 20 kg pun ikut menyumbang torsi!

TAMU DARI MASA LALU

Archimedes dari Syracusa (±287–212 SM) adalah orang pertama yang menuliskan hukum tuas secara matematis: beban yang seimbang berbanding terbalik dengan jaraknya ke titik tumpu. Ia begitu yakin pada hukumnya sehingga konon berkata, "Berikan aku tempat berpijak dan tuas yang cukup panjang, maka akan kuangkat Bumi!" (Hitung sendiri: tuasnya harus panjang sekali.)

KERJAKAN BERSAMA

Pikulan pedagang sayur

Bu Siti memikul pikulan bambu sepanjang 1,5 m (massanya diabaikan). Keranjang kiri berisi 30 kg sayur, keranjang kanan 20 kg, digantung di kedua ujung. Di mana bahunya harus diletakkan agar pikulan setimbang? Berapa gaya yang ditanggung bahunya? ($g = 10$ m/s²)

1. Misalkan bahu berjarak x dari ujung kiri. Torsi terhadap bahu harus nol: $300 \cdot x = 200 \cdot (1{,}5 - x)$.
2. $300x + 200x = 300$ → $x = 0{,}6$ m dari ujung kiri (keranjang yang lebih berat).
3. $\Sigma F = 0$: gaya bahu $= 300 + 200 = 500$ N ke atas.

Bahu diletakkan 0,6 m dari keranjang 30 kg, lebih dekat ke beban yang berat. Pedagang berpengalaman melakukannya otomatis dengan menggeser pikulan sampai terasa "pas".

COBA SENDIRI

Jembatan papan di atas parit

Papan homogen sepanjang 6 m dan berat 300 N bertumpu pada kedua ujungnya di atas parit. Sari (berat 400 N) berdiri 2 m dari ujung kiri. Berapa gaya yang ditanggung tumpuan kiri dan kanan?

1. Pilih poros di tumpuan kiri, sehingga gaya tumpuan kiri N_A tidak muncul dalam persamaan torsi.
2. Berat papan bekerja di tengah (3 m). $\Sigma\tau = 0$: $N_B \times 6 = 300 \times 3 + 400 \times 2 = 1700$ → $N_B \approx 283$ N.
3. $\Sigma F = 0$: $N_A = 300 + 400 - 283 = 417$ N.

Tumpuan kiri menanggung ±417 N dan kanan ±283 N. Tumpuan yang lebih dekat dengan Sari menanggung lebih banyak. Cek: torsi terhadap tumpuan kanan $N_A \times 6 = 300 \times 3 + 400 \times 4 = 2500$ → $N_A \approx 417$ N. ✓

FISIKA INDONESIA: JEMBATAN YANG BISA "MENUNDUK"

Jembatan Ampera di Palembang, yang diresmikan tahun 1965, dulu punya bagian tengah yang bisa diangkat agar kapal tinggi bisa lewat di Sungai Musi. Agar mesin pengangkatnya tidak terlalu berat, setiap menara jembatan dilengkapi **bandul pemberat** (*counterweight*) yang mengimbangi berat bentang tengah, prinsip yang sama dengan jungkat-jungkit dan katrol. Karena proses mengangkatnya lama dan mengganggu lalu lintas, fungsi ini dihentikan sekitar tahun 1970, dan bandul pemberatnya kemudian diturunkan.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

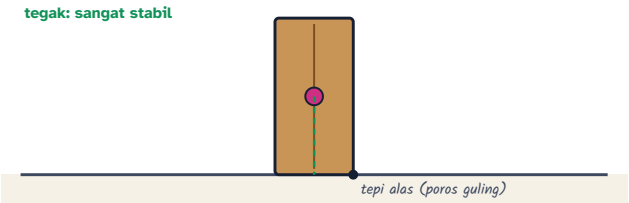
TANGGA BERSANDAR DAN GAYA ENGSEL

Tangga homogen bermassa m bersandar pada dinding licin dengan sudut θ terhadap lantai kasar. Gaya dinding N_w mendatar; lantai memberi $N = mg$ ke atas dan gesekan $f = N_w$. Torsi terhadap kaki tangga: $N_w L \sin\theta = mg\frac{L}{2}\cos\theta$, sehingga $f = \dfrac{mg}{2\tan\theta}$. Tangga tidak tergelincir jika $f \leq \mu mg$, yaitu $\tan\theta \geq \dfrac{1}{2\mu}$. Pada soal engsel, ingat bahwa gaya engsel punya **dua komponen** (mendatar dan tegak) yang biasanya dicari dengan $\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma F_y = 0$ setelah torsi terhadap engsel diselesaikan.

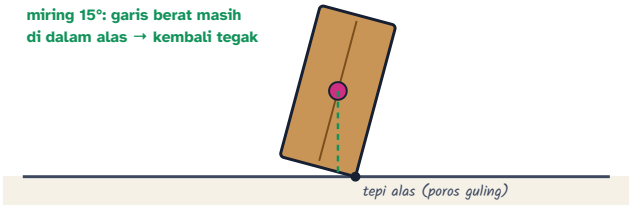
10.3 Titik berat dan kestabilan

Gravitasi menarik setiap bagian benda, tetapi efek totalnya sama seperti satu gaya yang bekerja di satu titik: **titik berat**. Untuk benda di dekat permukaan Bumi, titik berat sama dengan pusat massa (Bab 9). Pada benda homogen yang simetris, titik beratnya di tengah. Penggaris bisa kamu seimbangkan di satu jari jika jari tepat di bawah titik beratnya.

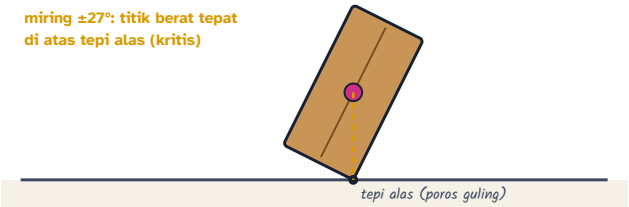
Syarat stabil. Benda yang berdiri tetap stabil selama **garis vertikal dari titik beratnya jatuh di dalam bidang alasnya**. Jika garis itu keluar dari alas, berat benda menghasilkan torsi yang menggulingkannya.



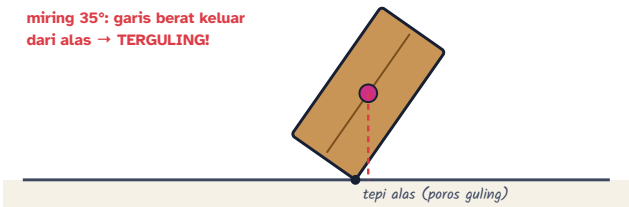
Langkah 1. Lemari tinggi berdiri tegak. Titik beratnya (bulatan merah muda) ada di tengah, dan garis vertikal darinya jatuh tepat di tengah alas.



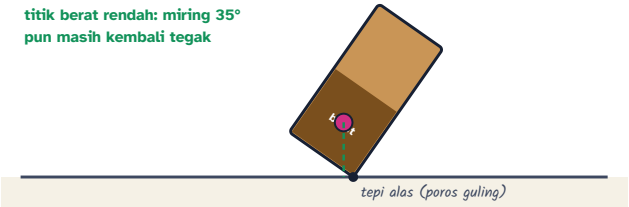
Langkah 2. Dimiringkan 15°: garis vertikal dari titik berat masih jatuh di dalam alas. Torsi berat lemari memutarnya kembali ke posisi tegak.



Langkah 3. Pada sudut kritis ($\tan\theta = \frac{\text{setengah lebar}}{\text{tinggi titik berat}} = \frac{40}{80}$, sekitar 27°), titik berat tepat di atas tepi alas. Sedikit saja lagi...



Langkah 4. ...garis berat keluar dari alas, torsi berat kini menggulingkan lemari. BRUK! Itu sebabnya lemari tinggi sebaiknya dipaku ke dinding.



Langkah 5. Lemari yang sama, tetapi laci bawahnya diisi barang berat. Titik beratnya turun, sudut kritisnya naik menjadi 45°. Titik berat rendah + alas lebar = stabil.

TRIK KAK NARA: MENEMUKAN TITIK BERAT DENGAN DUA JARI

Letakkan sapu atau penggaris panjang mendatar di atas kedua jari telunjukmu yang berjauhan. Geser kedua jari perlahan saling mendekat. Ajaib: jari-jarimu selalu bertemu tepat di titik berat! Jari yang lebih dekat ke titik berat menanggung beban lebih besar, sehingga gesekannya lebih besar dan ia "tertahan", sementara jari yang lain bergeser. Begitu bergantian, sampai keduanya bertemu.

MITOS

"Titik berat selalu berada di dalam bahan benda."

MITOS

"Benda yang lebih berat selalu lebih sulit terguling."

FAKTA

Tidak selalu! Titik berat cincin, bumerang, dan huruf L berada di ruang kosong. Pelompat tinggi gaya Fosbury melengkungkan tubuhnya sehingga titik beratnya bisa lewat
di bawah
mistar, padahal tubuhnya melewati di atasnya.

FAKTA

Yang menentukan sudut guling adalah
letak
titik berat dan
lebar
alas, bukan beratnya. Truk berat yang muatannya ditumpuk tinggi lebih mudah terguling di tikungan daripada mobil kecil yang rendah.

10.4 Momen inersia: "massa" untuk gerak berputar

Di gerak lurus, massa mengukur kelembaman: seberapa sulit benda dipercepat. Di gerak berputar, perannya diambil oleh **momen inersia** I. Bedanya, momen inersia tidak hanya bergantung pada *berapa banyak* massa, tetapi juga *di mana* massa itu berada terhadap sumbu putar. Massa yang jauh dari sumbu jauh lebih "malas" diputar.

Momen inersia. Untuk kumpulan partikel, $I = \sum m_i r_i^2$, dengan r_i jarak tiap partikel ke sumbu putar. Satuannya kg·m². Karena jaraknya dikuadratkan, massa yang dua kali lebih jauh menyumbang empat kali lebih besar.

Benda (massa M, jari-jari R atau panjang L)	Sumbu	Momen inersia	$k = I/(MR^2)$
Cincin atau pipa tipis (pelek sepeda)	pusat, tegak lurus bidang	MR^2	1
Silinder pejal atau cakram	sumbu silinder	$\frac{1}{2}MR^2$	0,5
Bola berongga tipis (bola pingpong)	diameter	$\frac{2}{3}MR^2$	0,67
Bola pejal (kelereng, bola bekel)	diameter	$\frac{2}{5}MR^2$	0,4
Batang tipis	tengah batang	$\frac{1}{12}ML^2$	–
Batang tipis	ujung batang	$\frac{1}{3}ML^2$	–

Bahasa sederhana · Contoh sehari-hari: memutar sapu yang dipegang di tengah terasa ringan, tetapi memutarnya sambil dipegang di ujung terasa berat. Massanya sama, tetapi letak massanya terhadap tanganmu berbeda.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TEOREMA SUMBU SEJAJAR DAN SUMBU TEGAK LURUS

Sumbu sejajar: jika sumbu digeser sejauh d dari sumbu yang melalui pusat massa, $I = I_{\text{pm}} + Md^2$. Contoh: batang terhadap ujungnya, $\frac{1}{12}ML^2 + M(\frac{L}{2})^2 = \frac{1}{3}ML^2$. **Sumbu tegak lurus** (khusus benda pipih di bidang xy): $I_z = I_x + I_y$. Contoh: cakram terhadap diameternya, $I_x = I_y = \frac{1}{2}I_z = \frac{1}{4}MR^2$. Momen inersia benda kontinu dihitung dengan integral $I = \int r^2 \, \mathrm{d}m$.

10.5 Dinamika rotasi: Hukum II Newton versi putar

Torsi total menyebabkan **percepatan sudut** α (rad/s²), persis seperti gaya total menyebabkan percepatan. Hampir setiap rumus gerak lurus punya "kembaran" rotasinya.

Hukum II Newton untuk rotasi. $\Sigma\tau = I\alpha$. Torsi sama, momen inersia lebih kecil → percepatan sudut lebih besar.

Gerak lurus	Gerak berputar	Penghubung
posisi x (m)	sudut θ (rad)	$s = r\theta$
kecepatan v	kecepatan sudut ω	$v = \omega r$
percepatan a	percepatan sudut α	$a_t = \alpha r$
massa m	momen inersia I	$I = \sum mr^2$
gaya $F = ma$	torsi $\tau = I\alpha$	$\tau = rF\sin\theta$
momentum $p = mv$	momentum sudut $L = I\omega$	$L = rp$ (untuk partikel)
energi kinetik $\frac{1}{2}mv^2$	energi kinetik rotasi $\frac{1}{2}I\omega^2$	

KERJAKAN BERSAMA **Timba sumur dengan kerekan**

Timba berisi air (5 kg) tergantung pada tali yang dililitkan di kerekan kayu berbentuk silinder pejal (massa 4 kg, jari-jari 0,1 m). Timba dilepas dan jatuh ke dalam sumur. Abaikan gesekan. Berapa percepatan timba? ($g = 10$ m/s²)

1. Timba (gerak lurus): $mg - T = ma$.
2. Kerekan (berputar): $TR = I\alpha = \frac{1}{2}MR^2 \cdot \frac{a}{R} \rightarrow T = \frac{1}{2}Ma$.
3. Jumlahkan: $mg = (m + \frac{1}{2}M)a \rightarrow a = \frac{5 \times 10}{5 + 2} \approx 7{,}1$ m/s².

Timba jatuh dengan ±7,1 m/s², lebih lambat dari jatuh bebas, karena sebagian energinya dipakai untuk memutar kerekan. Kerekan bermassa berperan seperti "massa tambahan" sebesar $I/R^2 = 2$ kg.

10.6 Energi kinetik rotasi dan balapan menggelinding

Benda yang berputar menyimpan **energi kinetik rotasi** $\frac{1}{2}I\omega^2$. Roda yang menggelinding melakukan dua gerak sekaligus: bergeser (translasi) dan berputar (rotasi). Jika tidak selip, titik roda yang menyentuh tanah sesaat diam dan $v = \omega R$.

Energi benda menggelinding. $E_k = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2(1 + k)$, dengan $k = \frac{I}{mR^2}$.

Tebak Dulu!

Bola pejal, silinder pejal, dan cincin (massa dan jari-jarinya sama) dilepas bersamaan dari puncak lereng yang sama. Semuanya menggelinding tanpa selip. Siapa yang tiba di bawah paling dulu?

- Cincin, karena massanya di tepi sehingga "terlempar" lebih cepat.
- Ketiganya bersamaan, karena massa dan jari-jarinya sama.
- Bola pejal.
- Silinder pejal, karena bentuknya paling stabil.

Jawabannya: bola pejal. Energi potensial yang sama harus dibagi untuk translasi dan rotasi. Benda yang massanya terkumpul dekat sumbu (k kecil) hanya perlu sedikit energi untuk berputar, sehingga sisa energinya untuk meluncur lebih banyak. Urutannya: bola pejal ($k = 0{,}4$), silinder pejal (0,5), cincin (1). Hebatnya, hasil ini sama untuk bola sebesar kelereng maupun sebesar batu besar!

RUMUS HIDUP

Kelajuan di dasar lereng (menggelinding tanpa selip)

$$v = \sqrt{\frac{2g\,h}{1+k}}$$

Mirip v = √(2gh), tetapi dibagi (1 + k) karena sebagian energi dipakai untuk berputar.

- h Tinggi lereng m
- k Faktor bentuk I/(mR²)
- v Kelajuan di dasar m/s

KELAJUAN DI DASAR

4,1

m/s

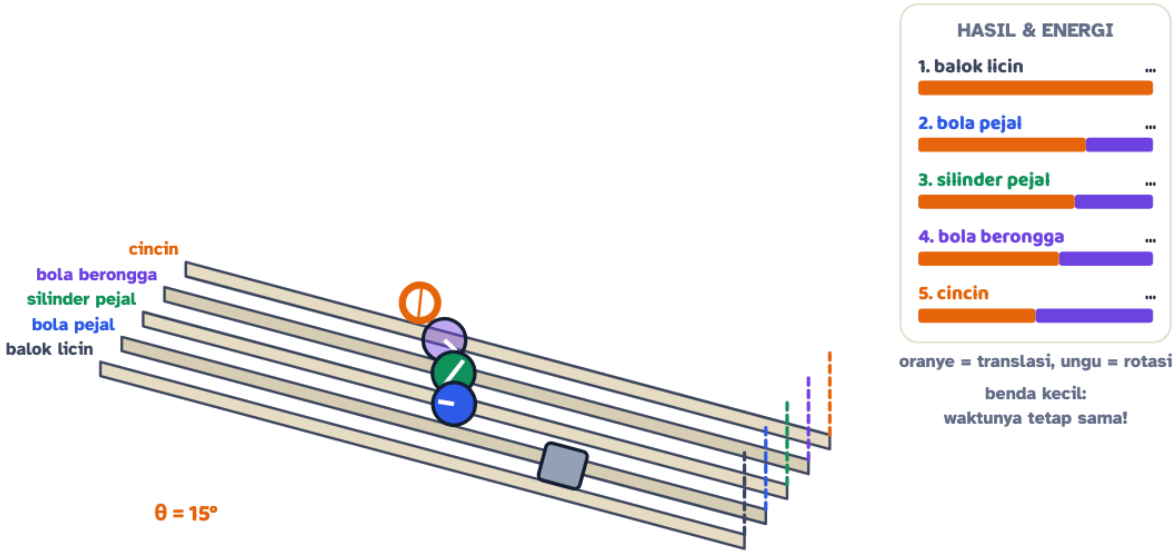
Dari lereng setinggi **1,2** m, benda dengan k = **0,4** tiba dengan kelajuan **4,1** m/s. Massa dan jari-jari tidak muncul di rumus!

Cek satuan: $\sqrt{\mathrm{m/s^2 \cdot m}} = \mathrm{m/s}$; k tidak bersatuan.

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

LAB MINI **Balapan menggelinding di lereng**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-10



Juara penggelinding	Waktu juara	Waktu cincin	Waktu bola pejal
—	—	—	—

Atur kemiringan lereng lalu tekan **Jalankan**. Lima peserta: balok licin (meluncur tanpa berputar), bola pejal, silinder pejal, bola berongga, dan cincin. Siapa juaranya? Aktifkan "benda besar & berat": apakah urutan dan waktunya berubah? Perhatikan juga batang pembagian energi translasi (oranye) dan rotasi (ungu).

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Benda yang menggelinding tanpa selip **tidak** kehilangan energi karena gesekan, walaupun ada gaya gesek statis. Titik yang menyentuh tanah sesaat diam, jadi gesekan statis tidak melakukan usaha. Gesekan itu hanya "mengalihkan" sebagian energi menjadi putaran. Energi baru hilang jika benda **selip** (gesekan kinetis).

10.7 Momentum sudut dan kekekalannya

Kembaran rotasi dari momentum adalah **momentum sudut** $L = I\omega$ (satuan kg·m²/s). Seperti momentum yang hanya berubah jika ada gaya luar, momentum sudut hanya berubah jika ada **torsi luar**.

Hukum kekekalan momentum sudut. Jika torsi luar total nol, $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$. Momen inersia mengecil → kecepatan sudut membesar, dan sebaliknya.

RUMUS HIDUP

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.

- I_1 Momen inersia awal kg·m²
- ω_1 Kecepatan sudut awal rad/s
- I_2 Momen inersia akhir kg·m²
- ω_2 Kecepatan sudut akhir rad/s

KECEPATAN SUDUT AKHIR

7,5

rad/s

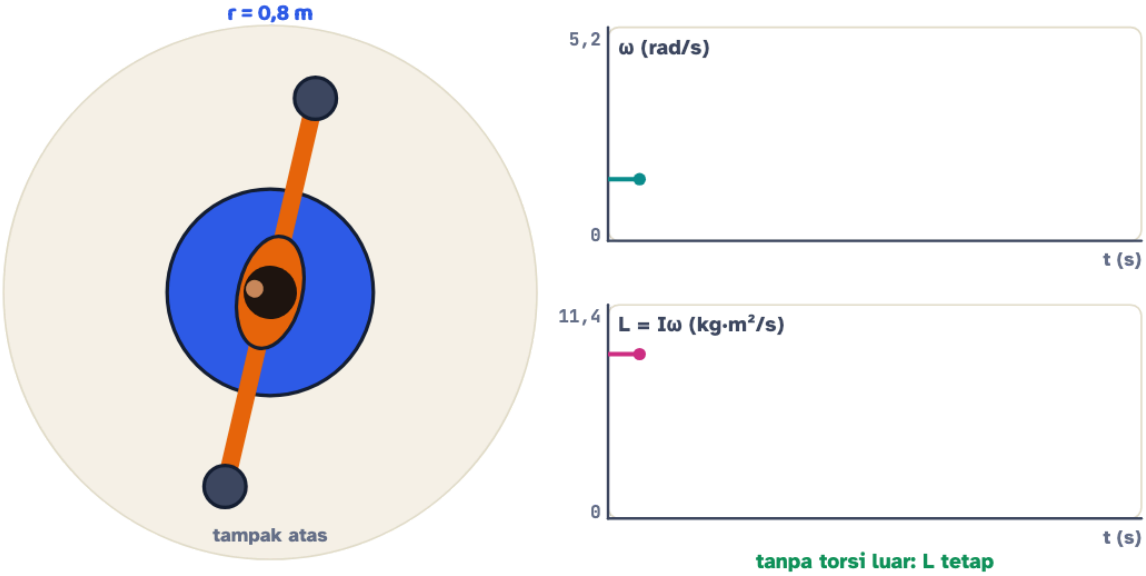
Momen inersia berubah dari **4** menjadi **1,6** kg·m², sehingga putaran berubah dari **3** menjadi **7,5** rad/s. Momentum sudut tetap sama!

Cek satuan: $\frac{\mathrm{kg\,m^2 \cdot rad/s}}{\mathrm{kg\,m^2}} = \mathrm{rad/s}$

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

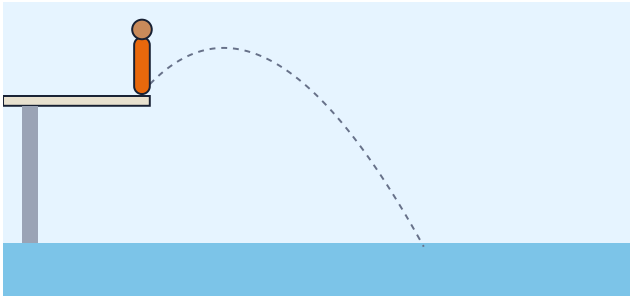
LAB MINI **Kursi putar & dumbel: rapatkan tanganmu!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-10

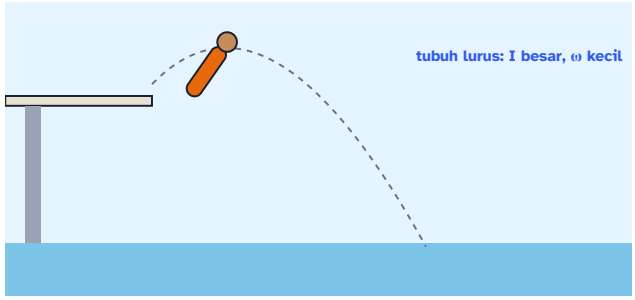


Momen inersia I	Kecepatan sudut ω	Putaran	Momentum sudut L	Ek rotasi
5,84 kg·m²	1,5 rad/s	14 rpm	8,76 kg·m²/s	6,6 J

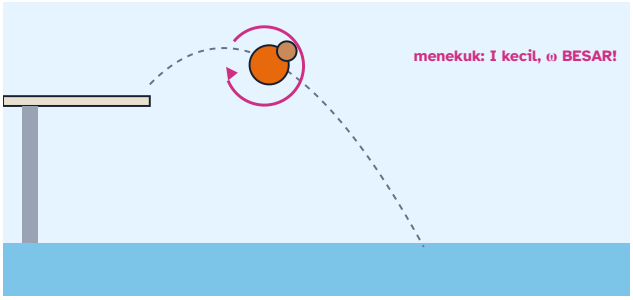
Tekan **Putar!** untuk memberi dorongan, lalu geser **jarak dumbel** saat kursi berputar. Amati ω dan L di grafik. Momentum sudut tetap, tetapi bagaimana dengan energi kinetik rotasinya? Nyalakan "gesekan poros" untuk melihat torsi luar mencuri momentum sudut.



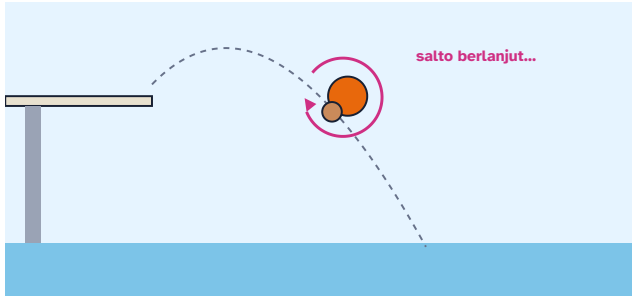
Langkah 1. Peloncat indah bersiap di ujung papan loncat. Saat menolak papan, kakinya memberi torsi sehingga tubuhnya mulai berputar pelan.



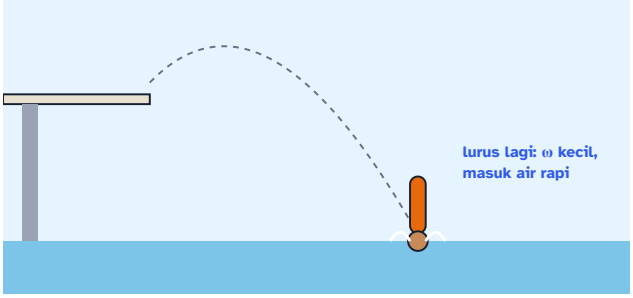
Langkah 2. Di udara tidak ada torsi luar (gravitasi bekerja di titik beratnya), jadi momentum sudut $L = I\omega$ tetap. Dengan tubuh lurus, I besar dan putarannya lambat.



Langkah 3. Ia menekuk tubuh (posisi *tuck*), memeluk lututnya. Momen inersianya bisa turun beberapa kali lipat, sehingga putarannya menjadi beberapa kali lebih cepat. Salto ganda!



Langkah 4. Selama tetap menekuk, ia terus berputar cepat sambil jatuh mengikuti lintasan parabola titik beratnya.



Langkah 5. Sebelum menyentuh air, ia meluruskan tubuh lagi. I membesar, ω mengecil, dan tubuhnya masuk air hampir tanpa cipratan. Semua tanpa "mesin" putar: hanya mengatur I!

FISIKA INDONESIA: GASING NUSANTARA

Gasing dimainkan dari Sumatra sampai Papua, dengan nama dan bentuk berbeda: gasing dari kayu keras di Kepulauan Riau, gangsing di Jawa, hingga gasing bambu yang berdengung. Gasing yang baik punya banyak massa di bagian tepinya, sehingga momen inersianya besar. Setelah dilempar dengan tali, gasing menyimpan momentum sudut besar. Selama momentum sudutnya besar, arah sumbu putarnya "keras kepala", sulit dirobohkan, sehingga gasing berdiri tegak di atas ujung runcingnya. Baru setelah gesekan menghabiskan putarannya, gasing mulai bergoyang dan roboh.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MOMENTUM SUDUT ADALAH VEKTOR: PRESESI GASING

Momentum sudut $L = I\omega$ mengarah sepanjang sumbu putar (aturan tangan kanan). Torsi mengubah L: $\tau = \mathrm{d}L/\mathrm{d}t$. Pada gasing miring, berat menghasilkan torsi yang **tegak lurus** L. Akibatnya L tidak jatuh, melainkan berbelok perlahan mengelilingi sumbu tegak: gerak **presesi**, dengan kecepatan sudut $\Omega = \dfrac{mgr}{I\omega}$. Makin cepat gasing berputar, makin lambat presesinya. Untuk partikel, $L = r \times p$; planet yang mengorbit Matahari pun punya momentum sudut yang kekal.

MITOS

"Penari mempercepat putarannya dengan mendorong lantai saat merapatkan tangan."

FAKTA

Tidak perlu dorongan apa pun! Merapatkan tangan memperkecil momen inersia, sehingga ω membesar agar $L = I\omega$ tetap. Energi kinetik rotasinya memang naik, dan energinya berasal dari otot lengan yang menarik tangan ke dalam.

MITOS

"Benda yang lebih berat menggelinding lebih cepat menuruni lereng."

FAKTA

Kelajuan menggelinding $v = \sqrt{2gh/(1+k)}$ hanya bergantung pada **bentuk** (nilai k), bukan massa atau ukuran. Kelereng kecil dan bola bowling (keduanya bola pejal) tiba bersamaan.

Gagang pintu

Dipasang jauh dari engsel agar lengan momennya besar: dorongan kecil cukup untuk membuka pintu yang berat.

Kunci roda motor

Gagang yang panjang (atau disambung pipa) memperbesar torsi untuk melepas mur yang macet.

Egrang

Pemain egrang terus menggeser kakinya agar garis vertikal dari titik beratnya tetap jatuh di atas pijakan egrang yang sempit.

Pikulan

Bahu diletakkan lebih dekat ke keranjang yang lebih berat, agar torsi kedua beban terhadap bahu sama besar.

Sepeda yang melaju

Roda yang berputar cepat punya momentum sudut besar, sehingga sepeda lebih mudah dijaga tetap tegak daripada saat berjalan pelan.

Gasing tradisional

Massa di tepi gasing memperbesar momen inersia, sehingga gasing menyimpan momentum sudut lebih banyak dan berputar lebih lama.

Cek Cepat

Gaya 40 N bekerja tegak lurus pada ujung kunci sepanjang 0,25 m. Torsinya...

- 160 N·m
- 0,1 N·m
- 10 N·m
- 40 N·m

Raka (40 kg) duduk 1,5 m dari titik tumpu jungkat-jungkit. Agar seimbang, Kak Nara (60 kg) harus duduk di sisi lain pada jarak...

- 1,5 m
- 1,0 m
- 2,25 m
- 0,5 m

Peseluncur es berputar dengan tangan terentang, lalu merapatkan tangannya. Yang terjadi...

- momen inersia mengecil, kecepatan sudut membesar
- momen inersia membesar, kecepatan sudut mengecil
- momentum sudutnya bertambah
- kecepatan sudutnya tetap

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. A

Tantangan Rumah: titik berat sapu dan balapan kaleng

Bahan: sapu ijuk, dua kaleng bekas yang sama (satu kosong lalu ditutup, satu berisi pasir padat), papan atau buku tebal untuk membuat lereng

1. Letakkan sapu mendatar di atas kedua jari telunjuk, lalu geser kedua jari saling mendekat perlahan. Tandai tempat jari bertemu: itulah titik beratnya. Mengapa letaknya lebih dekat ke bagian ijuk?
2. Buat lereng landai dari papan. Lepaskan kedua kaleng bersamaan dari garis start yang sama.
3. Ulangi 3 kali dan catat kaleng mana yang sampai duluan.

Pertanyaan: Kaleng berisi pasir padat mirip silinder pejal ($k \approx 0{,}5$), sedangkan kaleng kosong mirip pipa (k mendekati 1). Apakah hasilmu sesuai dengan ramalan Lab Mini? (Hati-hati dengan tepi kaleng yang tajam.)

RINGKASAN KILAT

Bab 10 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menghitung **torsi** $\tau = rF\sin\theta$ dan menjelaskan peran lengan momen
- memakai dua syarat **kesetimbangan benda tegar** ($\Sigma F = 0$ dan $\Sigma\tau = 0$) untuk jungkat-jungkit, pikulan, dan jembatan
- menentukan **titik berat** dan menilai kapan benda stabil atau terguling
- memahami **momen inersia**, memakai $\tau = I\alpha$, dan memprediksi pemenang balapan menggelinding
- menerapkan **kekekalan momentum sudut** pada penari, gasing, dan peloncat indah

Istilah kunci

torsi · titik berat · momen inersia · momentum sudut

Rumus penting

$$\tau = r\,F\,\sin\theta$$

Torsi pada pintu. Efek memutar = jarak dari engsel × gaya × sinus sudut. Dorong jauh dari engsel dan tegak lurus daun pintu.

$$v = \sqrt{\frac{2g\,h}{1+k}}$$

Kelajuan di dasar lereng (menggelinding tanpa selip). Mirip v = √(2gh), tetapi dibagi (1 + k) karena sebagian energi dipakai untuk berputar.

$$\omega_2 = \frac{I_1\,\omega_1}{I_2}$$

Kekekalan momentum sudut. Rapatkan tangan (I kecil), putaran makin kencang. Rentangkan tangan (I besar), putaran melambat.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Jarak yang dipakai adalah lengan momen, yaitu jarak tegak lurus dari sumbu ke garis kerja gaya, bukan sekadar jarak ke titik tangkap gaya.
- Benda yang menggelinding tanpa selip tidak kehilangan energi karena gesekan, walaupun ada gaya gesek statis.

⛰️ 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=10

🧩 Teka-teki untuk Bab 11

Komet Halley melesat sangat cepat saat dekat Matahari, tetapi merayap pelan di ujung orbitnya yang jauh, melewati orbit Neptunus. Tidak ada mesin yang mempercepat atau mengeremnya. Mengapa ini mirip penari yang merapatkan dan merentangkan tangannya? Gaya apa yang bekerja, dan mengapa gaya itu tidak mengubah momentum sudut komet?

▼ Intip petunjuk

Gaya gravitasi Matahari selalu mengarah tepat ke Matahari, sehingga torsinya terhadap Matahari nol. Momentum sudut komet $L = mvr$ kekal: saat jarak r kecil, kelajuan v besar. Inilah inti Hukum Kepler II. Kita bongkar di Bab 11: Gravitasi & Satelit.

BAB 11 · GERAK & GAYA

11 Gravitasi & Satelit: Jatuh Tanpa Pernah Sampai

Apel jatuh ke tanah, tetapi Bulan tidak. Satelit SATRIA-1 tampak "diam" di atas Indonesia, padahal melesat 3 km setiap detik. Satu gaya yang sama menjelaskan semuanya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung gaya tarik antara dua benda dengan **hukum gravitasi Newton** dan menjelaskan arti "kuadrat terbalik";
- menjelaskan mengapa nilai g berbeda di khatulistiwa, di puncak gunung, di orbit, dan di planet lain;
- menghitung **kecepatan orbit**, **periode satelit**, dan **kecepatan lepas**;
- menjelaskan orbit **geostasioner** dan mengapa letak Indonesia di khatulistiwa sangat istimewa;
- memakai tiga **hukum Kepler** dan menjelaskan mengapa astronot di ISS melayang.

SATELIT YANG TAK PERNAH JATUH

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Astronot di Stasiun Luar Angkasa Internasional (ISS), sekitar 400 km di atas Bumi, melayang-layang. Kira-kira berapa besar tarikan gravitasi Bumi di sana, dibandingkan di permukaan?

- 0%, karena di luar angkasa tidak ada gravitasi.
- Sekitar 10%, karena sudah sangat jauh dari Bumi.
- Sekitar 90%, hampir sama dengan di permukaan.
- Lebih dari 100%, karena lebih dekat ke Matahari.

Jawabannya: sekitar 89%! Jari-jari Bumi ±6.400 km, jadi naik 400 km hanya menambah jarak dari pusat Bumi sekitar 6%. Gravitasi di ISS masih kuat. Astronot melayang bukan karena gravitasinya hilang, melainkan karena mereka dan stasiunnya *sama-sama jatuh* mengelilingi Bumi. Rahasianya kita bongkar di subbab 11.7.

11.1 Hukum gravitasi Newton: apel dan Bulan

Konon, Isaac Newton muda sedang duduk di kebun ketika melihat apel jatuh. Ia lalu bertanya: *apakah gaya yang menarik apel itu juga mencapai Bulan?* Pertanyaan sederhana ini mengubah sejarah. Jawabannya: **ya**. Gaya yang sama menarik apel, Bulan, planet, dan bintang.

Hukum gravitasi Newton. Setiap dua benda bermassa saling menarik dengan gaya yang sebanding dengan hasil kali massanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat keduanya.

Dalam bentuk rumus: $F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$. Huruf G adalah **tetapan gravitasi umum**, $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2/kg^2}$. Angka ini *sangat* kecil. Itulah sebabnya kamu tidak merasa ditarik oleh meja atau temanmu. Gravitasi baru terasa kalau salah satu massanya raksasa, seperti Bumi.

Bahasa sederhana · Gampangnya: **semua benda saling tarik-menarik**. Makin berat bendanya, makin kuat tarikannya. Makin jauh jaraknya, makin lemah tarikannya. Bumi sangat berat, jadi tarikannya membuat kita tetap menempel di tanah.

RUMUS HIDUP **Hukum gravitasi Newton**

$$F = G\,\frac{m_1\,m_2}{r^2}$$

Gaya tarik = G × massa pertama × massa kedua, dibagi kuadrat jarak pusat ke pusat. Jarak dijadikan dua kali, gayanya tinggal seperempat!

m_1 Massa benda 1 kg

m_2 Massa benda 2 kg

r Jarak pusat ke pusat m

F Gaya gravitasi N

GAYA GRAVITASI

490,966

N

Benda **5,97 × 10²⁴** kg dan **50** kg yang pusatnya berjarak **6,37 × 10⁶** m saling menarik dengan gaya **490,966** N. Coba buat m_1 = 50 kg dan r = 1 m: itulah tarikanmu pada teman sebangku!

Satuan Nusantara: ≈ 1 × berat orang 50 kg · ≈ 2 × berat karung beras 25 kg · ≈ 5% dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: $\frac{\mathrm{N\,m^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot \frac{\mathrm{kg \cdot kg}}{\mathrm{m^2}} = \mathrm{N}$

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

TRIK KAK NARA: HUKUM "KUADRAT TERBALIK"

Bayangkan semprotan cat. Dari jarak 1 m, catnya menutupi satu ubin. Dari jarak 2 m, cat yang sama tersebar ke 2 × 2 = 4 ubin, jadi tiap ubin hanya kebagian seperempat. Gravitasi "menyebar" dengan cara yang sama: jarak ×2 → gaya ÷4, jarak ×3 → gaya ÷9, jarak ×10 → gaya ÷100.

Tebak Dulu!

Bumi menarik sebuah apel dengan gaya 1 N. Berapa besar gaya apel menarik Bumi?

- Nol, karena apel terlalu kecil untuk menarik apa pun.
- Sangat kecil, sekitar sepersejuta newton.
- Tepat 1 N juga, hanya arahnya ke atas.
- Lebih dari 1 N, karena Bumi lebih besar.

Tepat 1 N! Ingat Hukum III Newton dari Bab 6: gaya selalu berpasangan, sama besar, berlawanan arah. Rumus $F = Gm_1m_2/r^2$ pun simetris: tukar m_1 dan m_2, hasilnya sama. Lalu mengapa Bumi tidak "melompat" ke arah apel? Karena percepatan = gaya/massa. Gaya 1 N pada massa 6×10^{24} kg menghasilkan percepatan yang terlalu kecil untuk diukur.

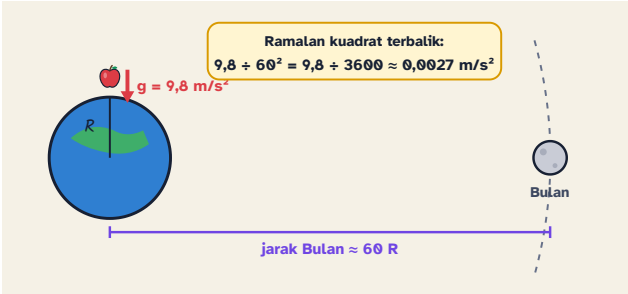
Ujian besar Newton: apakah Bulan "jatuh" seperti apel?

Newton tidak cukup dengan menebak. Ia menghitung. Ikuti langkah-langkahnya, seolah kamu duduk di samping Newton tahun 1660-an.

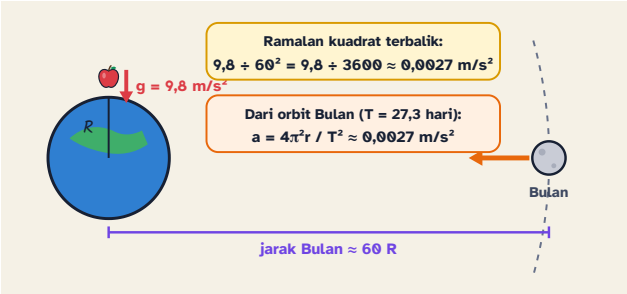
Langkah 1. Di satu sisi ada Bumi dan sebuah apel. Di sisi lain, jauh sekali, ada Bulan yang mengitari Bumi.

Langkah 2. Apel di permukaan Bumi jatuh dengan percepatan $g = 9{,}8$ m/s².

Langkah 3. Apel berjarak R (jari-jari Bumi) dari pusat Bumi. Bulan berjarak sekitar $60R$.



Langkah 4. Kalau gravitasi mengikuti kuadrat terbalik, tarikan Bumi di jarak Bulan tinggal $1/60^2 = 1/3600$ kalinya: sekitar 0,0027 m/s².



Langkah 5. Sekarang hitung dengan cara lain. Bulan bergerak melingkar dengan periode 27,3 hari, jadi ia punya percepatan sentripetal $a = 4\pi^2 r/T^2$. Hasilnya juga ±0,0027 m/s²!

Langkah 6. Dua cara, satu jawaban. Gaya yang menjatuhkan apel adalah gaya yang sama yang membelokkan Bulan. Gravitasi berlaku di seluruh alam semesta.

⚠️

AWAS JEBAKAN

Dalam $F = Gm_1m_2/r^2$, jarak r diukur dari **pusat ke pusat**, bukan dari permukaan. Untuk satelit yang terbang 400 km di atas Bumi, $r = 6.371 + 400 = 6.771$ km, bukan 400 km. Lupa menambahkan jari-jari Bumi adalah kesalahan paling sering di bab ini!

🕰️

TAMU DARI MASA LALU

Newton menulis hukum gravitasi dalam buku *Principia* (1687), tetapi ia tidak tahu nilai G. Lebih dari seratus tahun kemudian, tahun 1798, Henry Cavendish menggantung batang dengan bola timbal kecil pada kawat tipis. Ia mengukur puntiran kawat yang sangat kecil ketika bola timbal besar didekatkan. Dari hasilnya, nilai G dan massa Bumi akhirnya bisa dihitung. Karena itu eksperimennya dijuluki "menimbang Bumi".

11.2 Medan gravitasi dan nilai g yang berubah-ubah

Bayangkan Bumi dikelilingi "kabut tarikan" yang tak terlihat. Di mana pun kamu menaruh benda bermassa, kabut itu menariknya menuju pusat Bumi. Kabut ini disebut **medan gravitasi**. Kuatnya medan diukur sebagai **gaya per kilogram**, satuannya N/kg, yang ternyata sama dengan m/s². Itulah g!

Dari $mg = \frac{GMm}{R^2}$, massa benda m saling coret, sehingga $g = \frac{GM}{R^2}$. Nilai g hanya bergantung pada massa dan jari-jari planet, bukan pada benda yang jatuh. Karena itu bola besi dan kelereng jatuh bersamaan (kalau hambatan udara diabaikan).

RUMUS HIDUP **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%.

h Ketinggian dari permukaan km

g_h Percepatan gravitasi m/s²

PERCEPATAN GRAVITASI

8,676

m/s²

Pada ketinggian **400** km, percepatan gravitasi tinggal **8,676** m/s² (di permukaan 9,8 m/s²).

Cek satuan: h dan $R = 6.371$ km harus bersatuan sama, karena yang dipakai hanya perbandingannya.

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

Tempat	Ketinggian	g (m/s²)
Kutub Utara atau Selatan	permukaan laut	9,83
Pontianak (tepat di khatulistiwa)	permukaan laut	9,78
Puncak Jaya, Papua	4.884 m	±9,77

Stasiun luar angkasa ISS	±400 km	±8,7
Satelit geostasioner	35.786 km	±0,22
Jarak Bulan	±384.000 km	±0,0027

Mengapa g di khatulistiwa lebih kecil daripada di kutub? Ada dua sebab. Pertama, Bumi agak "gendut" di khatulistiwa: jari-jarinya ±21 km lebih besar daripada di kutub, jadi kamu sedikit lebih jauh dari pusat Bumi. Kedua, Bumi berputar. Orang di khatulistiwa ikut berputar sejauh ±40.000 km per hari, dan sebagian kecil tarikan gravitasi "terpakai" untuk membelokkan geraknya menjadi lingkaran. Jadi timbangan di Pontianak menunjukkan angka sedikit lebih kecil (±0,5%) daripada di kutub.

LAB MINI **Timbangan antarplanet: berapa beratmu di Jupiter?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-11

Gravitasi g	Berat	Angka timbangan	Tinggi lompatan	Lama melayang
1,62 m/s²	81 N	8,3 kg	3,03 m	3,87 s

Pilih planet, lalu tekan **Lompat!** Raka melompat dengan tenaga kaki yang sama seperti di Bumi (setinggi 0,5 m). Di mana ia melayang paling lama? Perhatikan bahwa **massanya tidak pernah berubah**, hanya beratnya.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

GRAVITASI DI DALAM BUMI DAN TEOREMA KULIT

Newton membuktikan dua hal ajaib untuk bola homogen. (1) Di **luar** bola, medannya sama seperti jika seluruh massa dipusatkan di titik pusat. (2) Di **dalam** kulit bola berongga, medan gravitasinya **nol**: tarikan dari bagian kulit yang dekat (sedikit massa) tepat diimbangi tarikan dari bagian yang jauh (banyak massa). Akibatnya, jika kamu menggali ke dalam Bumi homogen sampai jarak r dari pusat, hanya massa di dalam bola berjari-jari r yang menarikmu: $M(r) = Mr^3/R^3$. Jadi $g(r) = g_0 \dfrac{r}{R}$: naik lurus dari nol di pusat sampai g_0 di permukaan, lalu turun sebanding $1/r^2$ di luar. Medan juga dapat ditulis lewat **potensial gravitasi** $V = -GM/r$: $g = -\dfrac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}r}$.

11.3 Energi potensial gravitasi dan kecepatan lepas

Di Bab 8 kamu memakai $E_p = mgh$. Rumus itu hanya tepat di dekat permukaan Bumi, karena di sana g hampir tetap. Untuk perjalanan ke luar angkasa, kita butuh rumus lengkapnya:

$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

Kenapa negatif? Kita memilih titik nol energi potensial di tempat yang **jauh tak terhingga**. Bayangkan Bumi berada di dasar sebuah **sumur gravitasi**. Di bibir sumur (sangat jauh), energinya nol. Makin dalam ke dasar sumur, makin negatif energinya. Untuk keluar dari sumur, kamu harus "membayar" energi.

Jika kamu melempar bola ke atas, bola naik lalu jatuh lagi. Lempar lebih cepat, ia naik lebih tinggi. Adakah kecepatan yang membuat bola **tidak pernah kembali**? Ada! Energi kinetiknya harus cukup untuk memanjat seluruh sumur: $\frac{1}{2}mv^2 = \dfrac{GMm}{R}$. Hasilnya disebut **kecepatan lepas**.

RUMUS HIDUP

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!

M Massa planet (× massa Bumi) × Bumi

R Jari-jari planet (× jari-jari Bumi) × Bumi

v_{lepas} Kecepatan lepas km/s

KECEPATAN LEPAS

11,19

km/s

Planet bermassa **1** kali Bumi dan berjari-jari **1** kali Bumi punya kecepatan lepas **11,19** km/s. Coba Bulan: M = 0,0123 dan R = 0,273.

Cek satuan: $\sqrt{\frac{\mathrm{N\,m^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}}} = \sqrt{\mathrm{m^2/s^2}} = \mathrm{m/s}$, lalu dibagi 1000 menjadi km/s.

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

Benda langit	g permukaan (m/s²)	Kecepatan lepas (km/s)
Bulan	1,6	2,4
Mars	3,7	5,0
Bumi	9,8	11,2
Jupiter	24,8	59,5
Matahari	274	618

KERJAKAN BERSAMA **Kecepatan lepas dari Bulan**

Massa Bulan $7{,}35 \times 10^{22}$ kg dan jari-jarinya 1.737 km. Hitung kecepatan lepas dari permukaan Bulan. ($G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2/kg^2}$)

1. Ubah jari-jari ke meter: $R = 1{,}737 \times 10^6$ m.
2. $v = \sqrt{\dfrac{2GM}{R}} = \sqrt{\dfrac{2 \times 6{,}67 \times 10^{-11} \times 7{,}35 \times 10^{22}}{1{,}737 \times 10^6}}$.
3. Pembilang: $9{,}80 \times 10^{12}$. Dibagi R: $5{,}64 \times 10^6\ \mathrm{m^2/s^2}$.
4. $v = \sqrt{5{,}64 \times 10^6} \approx 2{,}37 \times 10^3$ m/s.

Kecepatan lepas Bulan ±2,4 km/s, kurang dari seperempat milik Bumi. Itulah sebabnya roket Apollo bisa pulang dari Bulan dengan roket kecil, sedangkan untuk berangkat dari Bumi butuh roket raksasa.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGAPA BULAN TIDAK PUNYA UDARA?

Molekul gas bergerak acak dengan kelajuan rata-rata beberapa ratus m/s (Bab 16), dan sebagian kecil jauh lebih cepat. Jika kelajuan rata-rata molekul suatu gas melebihi sekitar 1/6 kecepatan lepas, molekul-molekul tercepatnya terus lolos, sehingga dalam jutaan tahun gas itu "bocor" ke angkasa. Kecepatan lepas Bulan hanya 2,4 km/s, jadi Bulan kehilangan hampir semua gasnya. Jupiter (59,5 km/s) bahkan masih menyimpan hidrogen, gas paling ringan. Dan jika sebuah benda sangat masif tetapi sangat kecil sehingga $v_{\text{lepas}} > c = 3 \times 10^8$ m/s, cahaya pun tak bisa lolos: itulah **lubang hitam**.

11.4 Gerak satelit: rahasia "jatuh sambil menyamping"

Newton membayangkan sebuah meriam di puncak gunung yang sangat tinggi, di atas udara. Tembakan pelan jatuh dekat kaki gunung. Tembakan lebih cepat jatuh lebih jauh. Karena Bumi bulat, permukaannya melengkung menjauh di bawah peluru. Pada kecepatan tertentu, peluru terus jatuh, tetapi permukaan Bumi selalu "lari" dengan laju yang sama. Peluru tidak pernah menyentuh tanah. Peluru itu **mengorbit**!

Bahasa sederhana · Gampangnya: satelit itu seperti bola yang dilempar sangat-sangat kencang ke samping. Ia terus jatuh ke arah Bumi, tetapi karena Bumi bulat, ia selalu "meleset". Jatuh terus, meleset terus, jadilah orbit.

LAB MINI **Meriam Newton: jatuh, mengorbit, atau lepas?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-11

v orbit lingkaran	v lepas	Nasib peluru	Waktu terbang
7,35 km/s	10,4 km/s	Jatuh 5.180 km dari gunung	15 menit

Ketinggian
0 km

Atur kecepatan tembak, lalu tekan **Jalankan**. Mulai dari 4 km/s, naikkan sedikit demi sedikit. Temukan kecepatan yang membuat orbit **lingkaran sempurna**, lalu kecepatan yang membuat peluru **lepas selamanya**. Bandingkan dengan angka di pojok kanan atas. Ubah juga tinggi gunungnya.

Agar orbitnya lingkaran, gaya gravitasi harus tepat menjadi gaya sentripetal (Bab 7): $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$. Massa satelit m saling coret, sehingga

$$v_{\text{orbit}} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \qquad \text{dan} \qquad T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

RUMUS HIDUP

Kecepatan orbit satelit Bumi

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R + h}}$$

Makin rendah orbitnya, makin kencang satelit harus melaju. Massa satelit tidak berpengaruh sama sekali.

h Ketinggian orbit km

v Kecepatan orbit km/s

KECEPATAN ORBIT

7,67

km/s

Di ketinggian **400** km, satelit harus melaju **7,67** km/s supaya tidak jatuh dan tidak lepas.

Cek satuan: $\sqrt{\frac{\mathrm{m}^3/\mathrm{s}^2}{\mathrm{m}}} = \mathrm{m/s}$, lalu dibagi 1000 menjadi km/s. (GM Bumi $= 3{,}986 \times 10^{14}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}^2$.)

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

RUMUS HIDUP

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.

h Ketinggian orbit km

T Periode orbit jam

PERIODE ORBIT

23,93

jam

Satelit di ketinggian **35.786** km butuh **23,93** jam untuk sekali mengelilingi Bumi.

Cek satuan: $\sqrt{\mathrm{m}^3/(\mathrm{m}^3/\mathrm{s}^2)} = \mathrm{s}$, lalu dibagi 3600 menjadi jam.

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

Tiga "jalur tol" satelit. Makin tinggi orbitnya, makin pelan lajunya dan makin lama periodenya.

CONTOH **Tarikan antara Raka dan Sari**

Raka (50 kg) dan Sari (45 kg) duduk berjarak 1 m. Berapa gaya gravitasi di antara mereka?

1. $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} = 6{,}67 \times 10^{-11} \times \frac{50 \times 45}{1^2}$.
2. $F = 6{,}67 \times 10^{-11} \times 2250 \approx 1{,}5 \times 10^{-7}$ N.

Hanya $1{,}5 \times 10^{-7}$ N, kira-kira seberat sebutir pasir halus. Jadi kalau Raka bilang ia "tertarik" pada Sari, itu jelas bukan karena gravitasi. 😄

KERJAKAN BERSAMA **Kecepatan dan periode ISS**

ISS mengorbit pada ketinggian ±400 km. Dengan $R = 6.371$ km dan $GM = 3{,}986 \times 10^{14}\ \mathrm{m^3/s^2}$, hitung kecepatan orbit dan periodenya.

1. Jarak dari pusat Bumi: $r = 6.371 + 400 = 6.771$ km $= 6{,}771 \times 10^6$ m.
2. $v = \sqrt{GM/r} = \sqrt{3{,}986 \times 10^{14}/6{,}771 \times 10^6} = \sqrt{5{,}887 \times 10^7} \approx 7.670$ m/s.
3. $T = 2\pi r/v = 2\pi \times 6{,}771 \times 10^6/7670 \approx 5.545$ s ≈ 92 menit.

ISS melaju ±7,7 km/s (±27.600 km/jam) dan mengelilingi Bumi setiap ±92 menit, sekitar 15–16 kali sehari. Para astronotnya melihat matahari terbit belasan kali setiap hari!

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

"Satelit yang lebih berat harus terbang lebih cepat." Salah! Dalam $v = \sqrt{GM/r}$ tidak ada massa satelit. Satelit raksasa dan baut kecil yang terlepas, jika berada di orbit yang sama, melaju dengan kecepatan yang sama. Itulah sebabnya sampah antariksa sangat berbahaya: baut kecil pun melesat ±7–8 km/s.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Gambar meriam di puncak gunung itu benar-benar dibuat Newton. Gambarnya ada dalam tulisan *A Treatise of the System of the World*, yang terbit tahun 1728, setahun setelah Newton wafat. Butuh 229 tahun lagi sampai manusia benar-benar "menembakkan" benda ke orbit: satelit Sputnik 1 pada tahun 1957.

LANJUT · OLIMPIADE

ENERGI ORBIT DAN PARADOKS SATELIT

Untuk orbit lingkaran, $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \dfrac{GMm}{2r}$ dan $E_p = -\dfrac{GMm}{r}$, sehingga energi totalnya $E = -\dfrac{GMm}{2r} = -E_k$. Sekarang bayangkan satelit rendah yang direm sedikit oleh sisa udara tipis. Energi totalnya berkurang (makin negatif), jadi r mengecil, dan $E_k = -E$ justru **bertambah**! Hambatan udara membuat satelit makin cepat. Separuh energi potensial yang dilepas menjadi energi kinetik, separuh lagi menjadi kalor gesekan.

11.5 Orbit geostasioner: satelit yang "parkir" di langit Indonesia

Bumi berputar sekali dalam ±24 jam (tepatnya 23 jam 56 menit relatif terhadap bintang). Jika sebuah satelit mengorbit di atas khatulistiwa, searah putaran Bumi, dengan periode yang **sama persis**, maka dari permukaan Bumi satelit itu tampak diam. Orbit ini disebut **orbit geostasioner**. Dari rumus periode, ketinggiannya pasti ±35.786 km, dan lajunya ±3,07 km/s.

Karena tampak diam, antena parabola di rumah cukup diarahkan sekali ke satu titik di langit lalu dikunci. Satelit komunikasi, siaran TV, dan satelit cuaca banyak ditempatkan di orbit ini.

COBA SENDIRI **Menghitung ketinggian geostasioner sendiri**

Periode rotasi Bumi terhadap bintang 86.164 s. Dengan $GM = 3{,}986 \times 10^{14}\ \mathrm{m^3/s^2}$ dan jari-jari Bumi di khatulistiwa 6.378 km, hitung ketinggian satelit geostasioner.

1. Dari $T = 2\pi\sqrt{r^3/GM}$, kuadratkan: $r^3 = \dfrac{GM\,T^2}{4\pi^2}$.
2. $T^2 = (86.164)^2 = 7{,}424 \times 10^9\ \mathrm{s}^2$.
3. $r^3 = \dfrac{3{,}986 \times 10^{14} \times 7{,}424 \times 10^9}{39{,}48} = 7{,}496 \times 10^{22}\ \mathrm{m}^3$.
4. $r = \sqrt[3]{7{,}496 \times 10^{22}} \approx 4{,}216 \times 10^7$ m $= 42.164$ km.
5. Ketinggian: $h = r - R = 42.164 - 6.378 = 35.786$ km.

Satelit geostasioner berada ±35.786 km di atas khatulistiwa, hampir tiga kali diameter Bumi. Semua satelit geostasioner di dunia berbagi "cincin" yang sama, sehingga posisinya (disebut *slot orbit*) diatur secara internasional.

FISIKA INDONESIA

Pada 8 Juli 1976, Indonesia meluncurkan satelit **Palapa A1**. Indonesia termasuk negara pertama di dunia yang memakai satelit komunikasi domestik (sering disebut yang ketiga, setelah Kanada dan Amerika Serikat), karena sadar bahwa ribuan pulaunya sulit dihubungkan dengan kabel. Nama Palapa diambil dari Sumpah Palapa Gajah Mada tentang menyatukan Nusantara. Pada Juni 2023 menyusul **SATRIA-1**, satelit internet berkapasitas besar di slot orbit 146° BT, untuk menghubungkan sekolah, puskesmas, dan kantor desa di daerah terpencil. Letak Indonesia di khatulistiwa juga menguntungkan untuk peluncuran roket: putaran Bumi di khatulistiwa memberi "dorongan gratis" ±465 m/s ke arah timur, dan roket bisa langsung menuju bidang orbit geostasioner. Karena itu Biak, Papua, lama dikaji sebagai calon bandar antariksa. Di Pulau Timor, NTT, berdiri Observatorium Nasional Timau dengan teleskop 3,8 m untuk mengamati langit selatan.

MITOS

"Satelit butuh mesin yang terus menyala supaya tidak jatuh."

FAKTA

Satelit "meluncur" tanpa mesin. Kecepatan menyamping ditambah tarikan Bumi sudah cukup untuk mengorbit selamanya (jika tanpa udara). Mesin kecil hanya dinyalakan sesekali untuk mengoreksi posisi.

MITOS

"Satelit geostasioner benar-benar diam di angkasa."

FAKTA

Ia melesat ±3 km/s! Ia hanya tampak diam karena berputar mengelilingi Bumi tepat secepat Bumi berputar, seperti dua penari yang bergandengan berputar bersama.

11.6 Tiga hukum Kepler: aturan main planet

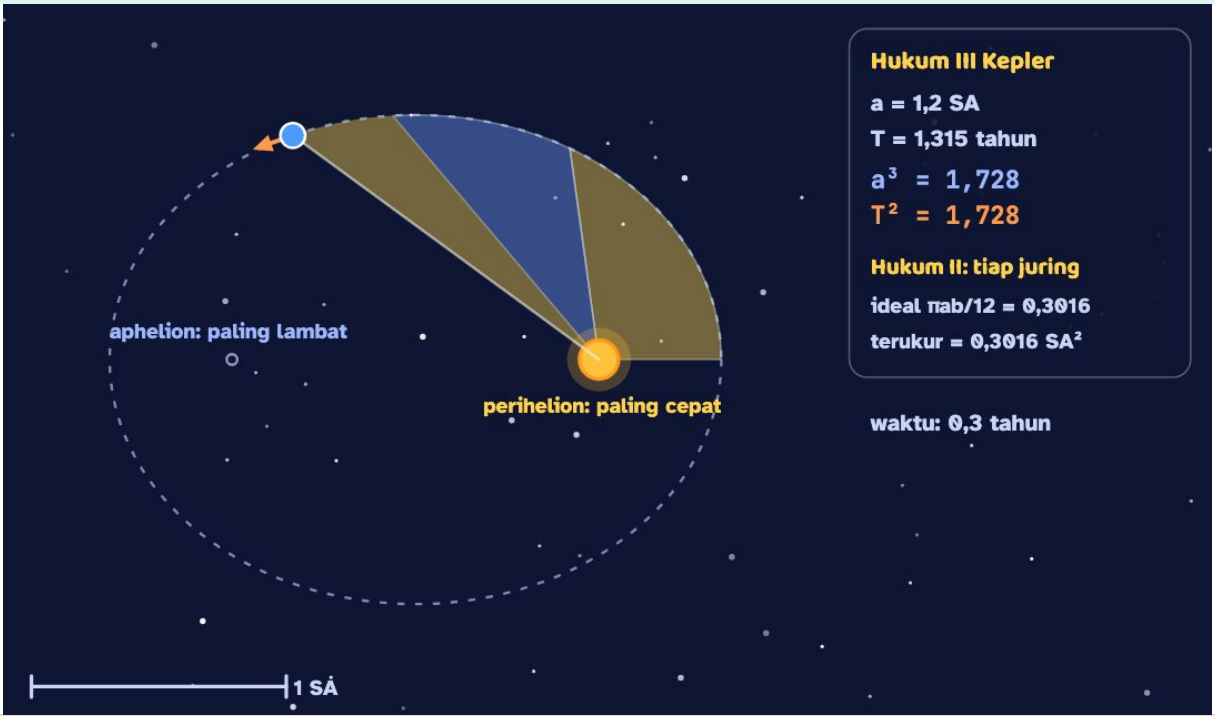
TAMU DARI MASA LALU

Tycho Brahe (1546–1601) mencatat posisi planet selama puluhan tahun dengan ketelitian luar biasa, tanpa teleskop. Asistennya, Johannes Kepler, menghabiskan bertahun-tahun mencocokkan data Mars dengan orbit lingkaran, tetapi selalu meleset ±8 menit busur. Kepler tidak menyerah dan tidak memaksa datanya. Ia justru membuang gagasan orbit lingkaran yang sudah dipercaya selama 2.000 tahun. Hasilnya: tiga hukum gerak planet (1609 dan 1619), yang hampir 70 tahun kemudian dijelaskan Newton dengan hukum gravitasi.

1. **Hukum I (orbit elips):** setiap planet bergerak dalam orbit berbentuk **elips**, dengan Matahari berada di salah satu titik fokusnya.
2. **Hukum II (luas sama):** garis yang menghubungkan planet dan Matahari menyapu **luas yang sama dalam selang waktu yang sama**. Akibatnya planet bergerak paling cepat di titik terdekat (*perihelion*) dan paling lambat di titik terjauh (*aphelion*).
3. **Hukum III (harmoni):** kuadrat periode sebanding dengan pangkat tiga setengah sumbu panjang orbit: $T^2 \propto a^3$.

LAB MINI **Orbit Kepler: juring sama luas**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-11



Periode T	Laju planet	Jarak ke Matahari	Luas juring terakhir
1,31 tahun	21,3 km/s	1,49 SA	0,3016 SA²

Tekan **Jalankan**. Setiap juring berwarna disapu dalam waktu yang sama (1/12 periode). Bandingkan bentuk juring di dekat Matahari (pendek-gemuk) dan di jauh (panjang-kurus). Luasnya? Lalu ubah a dan lihat bagaimana periode berubah.

Planet	a **(SA)**	T **(tahun)**	a^3	T^2
Merkurius	0,387	0,241	0,058	0,058
Venus	0,723	0,615	0,378	0,378
Bumi	1,000	1,000	1,000	1,000
Mars	1,524	1,881	3,54	3,54
Jupiter	5,203	11,86	140,9	140,7
Saturnus	9,537	29,46	867	868

Lihat dua kolom terakhir: hampir kembar! Jika a diukur dalam satuan astronomi (SA, jarak rata-rata Bumi–Matahari, ±150 juta km) dan T dalam tahun, maka untuk semua planet di tata surya berlaku $T^2 = a^3$. Newton

kemudian membuktikan bahwa tetapannya adalah $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_{\text{Matahari}}}$. Artinya, dari periode dan jarak satu planet saja, kita bisa **menimbang Matahari**!

TRIK KAK NARA: KEPLER II = PENARI BALI

Ingat penari yang berputar makin cepat saat merapatkan tangannya (Bab 10)? Planet juga begitu. Saat dekat Matahari, "lengannya" pendek, jadi ia berputar lebih cepat. Saat jauh, ia melambat. Hukum II Kepler sebenarnya adalah kekekalan momentum sudut.

11.7 "Tanpa bobot" di ISS: jatuh bebas tanpa henti

Ingat timbangan di dalam lift pada Bab 6? Angka timbangan adalah gaya normal $N = m(g + a)$. Jika lift jatuh bebas, $a = -g$, sehingga $N = 0$. Kamu melayang, padahal gravitasi masih bekerja penuh!

Di ISS terjadi hal yang persis sama. Stasiun, astronot, sendok, dan tetesan air semuanya jatuh mengelilingi Bumi dengan percepatan yang sama. Tidak ada yang menekan lantai, jadi semuanya melayang. Keadaan ini disebut **tanpa bobot** (lebih tepatnya, *tanpa bobot semu*), bukan tanpa gravitasi.

Bahasa sederhana · Gampangnya: astronot melayang bukan karena gravitasinya hilang, melainkan karena mereka **sedang jatuh bersama-sama** dengan stasiunnya. Rasanya seperti detik pertama saat kamu terjun dari papan loncat kolam renang.

Antena parabola

Diarahkan sekali ke satelit geostasioner lalu dikunci, karena satelitnya tampak diam di langit.

Peta di ponsel

Navigasi ojek online memakai sinyal beberapa satelit di orbit menengah (±20.000 km) untuk menentukan posisimu.

Pasang surut laut

Gravitasi Bulan menarik sisi Bumi yang dekat lebih kuat daripada sisi jauh. Selisih tarikan ini membuat laut pasang, dan nelayan memakai jadwalnya.

Prakiraan cuaca

Citra awan yang dipakai BMKG datang dari satelit cuaca geostasioner yang terus "menatap" wilayah Indonesia.

Astronot bertambah tinggi

Tanpa tekanan bobot, tulang belakang astronot sedikit merenggang. Tinggi badan mereka bisa bertambah beberapa sentimeter selama di orbit.

MITOS

"Di luar angkasa tidak ada gravitasi."

FAKTA

Gravitasi menjangkau tanpa batas, hanya melemah dengan jarak. Di ISS masih ±89%. Bulan mengelilingi Bumi dan Bumi mengelilingi Matahari justru
karena
gravitasi.

MITOS

"Astronot melayang karena di orbit tidak ada udara."

FAKTA

Udara tidak ada hubungannya. Astronot melayang karena ia dan stasiunnya jatuh bebas bersama. Di wahana menara jatuh bebas di Bumi pun kamu melayang sesaat, padahal udaranya ada.

COBA SENDIRI **Menimbang Bumi dengan Bulan**

Bulan mengorbit Bumi pada jarak rata-rata $3{,}84 \times 10^8$ m dengan periode 27,3 hari. Perkirakan massa Bumi. ($G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2/kg^2}$)

1. Dari $T^2 = \dfrac{4\pi^2 r^3}{GM}$, maka $M = \dfrac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$.
2. $T = 27{,}3 \times 86.400 = 2{,}359 \times 10^6$ s, sehingga $T^2 = 5{,}564 \times 10^{12}\ \mathrm{s}^2$.
3. $r^3 = (3{,}84 \times 10^8)^3 = 5{,}662 \times 10^{25}\ \mathrm{m}^3$.
4. $M = \dfrac{39{,}48 \times 5{,}662 \times 10^{25}}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}564 \times 10^{12}} \approx 6{,}0 \times 10^{24}$ kg.

Sekitar 6×10^{24} kg, sangat dekat dengan nilai resmi $5{,}97 \times 10^{24}$ kg. Kita baru saja menimbang planet tanpa timbangan!

Cek Cepat

Jika jarak antara dua benda dijadikan 3 kali semula, gaya gravitasi di antara keduanya menjadi...

- 3 kali semula
- $\frac{1}{3}$ kali semula
- 9 kali semula
- $\frac{1}{9}$ kali semula

Kecepatan sebuah satelit dalam orbit lingkaran bergantung pada...

- massa Bumi dan jari-jari orbit
- massa satelit dan ketinggiannya
- bentuk dan ukuran satelit
- kekuatan mesin satelit

Astronot di ISS melayang karena...

- gravitasi Bumi di sana nol
- gaya tarik Bulan mengimbangi gravitasi Bumi
- astronot dan stasiun sama-sama jatuh bebas mengelilingi Bumi
- udara di dalam ISS mendorong astronot ke atas

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. A · 3. C

Tantangan Rumah: orbit dari sedotan

Bahan: badan pulpen bekas atau sedotan keras, benang ±1 m, penghapus atau tutup botol, 4–8 jepit kertas

1. Ikat penghapus di satu ujung benang. Masukkan benang melewati badan pulpen, lalu ikat 4 jepit kertas di ujung bawahnya.
2. Pegang pulpen tegak, lalu putar penghapus dalam lingkaran mendatar di atas kepala sampai jepit kertas melayang diam. Lakukan di luar ruangan dan jauhkan dari wajah teman!
3. Tarik ujung bawah benang sedikit sehingga lingkarannya mengecil. Amati kecepatan penghapus.
4. Tambah jepit kertas menjadi 8. Seberapa cepat penghapus harus diputar agar jari-jari lingkarannya tetap sama?

Pertanyaan: Jepit kertas berperan seperti gravitasi Bumi, dan penghapus seperti satelit. Mengapa penghapus makin cepat saat lingkarannya mengecil (hubungkan dengan Hukum II Kepler)? Mengapa "gravitasi" yang lebih kuat membutuhkan kecepatan orbit yang lebih besar?

RINGKASAN KILAT — Bab 11 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menghitung gaya tarik antara dua benda dengan **hukum gravitasi Newton** dan menjelaskan arti "kuadrat terbalik"
- menjelaskan mengapa nilai g berbeda di khatulistiwa, di puncak gunung, di orbit, dan di planet lain
- menghitung **kecepatan orbit**, **periode satelit**, dan **kecepatan lepas**
- menjelaskan orbit **geostasioner** dan mengapa letak Indonesia di khatulistiwa sangat istimewa
- memakai tiga **hukum Kepler** dan menjelaskan mengapa astronot di ISS melayang

Istilah kunci

tetapan gravitasi umum · medan gravitasi · sumur gravitasi · kecepatan lepas · orbit geostasioner · elips · tanpa bobot

Rumus penting

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Hukum gravitasi Newton. Gaya tarik = G × massa pertama × massa kedua, dibagi kuadrat jarak pusat ke pusat. Jarak dijadikan dua kali, gayanya tinggal seperempat!

$$g_h = g_0\left(\frac{R}{R+h}\right)^2$$

Percepatan gravitasi di ketinggian h. Makin tinggi, makin lemah tarikan Bumi. Tetapi turunnya pelan: di ketinggian ISS masih tersisa hampir 90%.

$$v_{\text{lepas}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Kecepatan lepas dari permukaan planet. Kecepatan minimum agar benda lolos dari tarikan planet selamanya. Massa benda yang dilempar tidak berpengaruh!

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}$$

Kecepatan orbit satelit Bumi. Makin rendah orbitnya, makin kencang satelit harus melaju. Massa satelit tidak berpengaruh sama sekali.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}}$$

Periode satelit (berapa jam sekali putar). Makin tinggi orbitnya, makin lama satu putaran: jalannya lebih jauh DAN lajunya lebih pelan.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Dalam $F = Gm_1m_2/r^2$, jarak r diukur dari pusat ke pusat, bukan dari permukaan.
- "Satelit yang lebih berat harus terbang lebih cepat." Salah!

⛰️ 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=11

🧩 Teka-teki untuk Bab 12

Bayangkan terowongan lurus dari Pontianak menembus pusat Bumi sampai ke hutan Amazon di sisi lain. Udara dan gesekan diabaikan. Raka menjatuhkan bola ke dalamnya. Bola melesat ke pusat Bumi, melewatinya, lalu... muncul di Amerika Selatan, jatuh kembali, dan bolak-balik selamanya! Berapa lama satu kali perjalanan? Dan mengapa gerak bola ini mirip beban yang tergantung di pegas?

▼ **Intip petunjuk**

Ingat kotak "Lanjut" di subbab 11.2: di dalam Bumi, $g(r) = g_0\, r/R$. Gaya pada bola sebanding dengan jaraknya dari pusat dan selalu mengarah ke pusat, persis seperti gaya pegas $F = -kx$. Gerak seperti ini disebut **getaran harmonik**. Jawabannya (sekitar 42 menit sekali jalan!) ada di Bab 12.

BAB 12 · GERAK & GAYA

12 Elastisitas & Getaran: Pegas, Ayunan, dan Jembatan yang Menari

Kenapa ketapel bisa melontarkan kerikil, jok motor tidak membuatmu terpental, dan jembatan gantung bisa bergoyang hebat hanya karena langkah kaki? Semuanya soal benda yang "ingin kembali" ke bentuk dan posisi semula.

Setelah bab ini, kamu bisa

- memakai **hukum Hooke** $F = kx$ dan menghitung konstanta pegas, termasuk susunan **seri** dan **paralel**;
- membedakan **tegangan**, **regangan**, dan **modulus Young**, serta membaca kurva tegangan–regangan sampai bahan patah;
- mengenali **getaran harmonik sederhana** dan menghitung periode pegas-beban serta bandul;
- menjelaskan perpindahan energi kinetik dan potensial selama benda bergetar;
- menjelaskan **redaman** dan **resonansi** pada shock absorber, ayunan, jembatan, dan gedung.

JEMBATAN GANTUNG YANG MENARI

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Raka (50 kg) dan adiknya (25 kg) bergantian duduk di ayunan taman yang sama, dengan posisi duduk yang sama dan simpangan kecil. Siapa yang ayunannya bolak-balik lebih lambat (periodenya lebih lama)?

- Raka, karena lebih berat sehingga lebih "malas" bergerak.
- Adiknya, karena lebih ringan sehingga mudah "melayang".
- Sama saja.
- Tergantung seberapa kuat ayunan itu didorong.

Jawabannya: sama! Benda yang lebih berat memang lebih sulit digerakkan (massanya besar), tetapi ditarik gravitasi lebih kuat (beratnya besar). Kedua efek ini saling menghapus, persis seperti batu dan kelereng yang jatuh bersamaan. Periode ayunan hanya bergantung pada panjang tali dan nilai g: $T = 2\pi\sqrt{L/g}$. Kita buktikan di subbab 12.5.

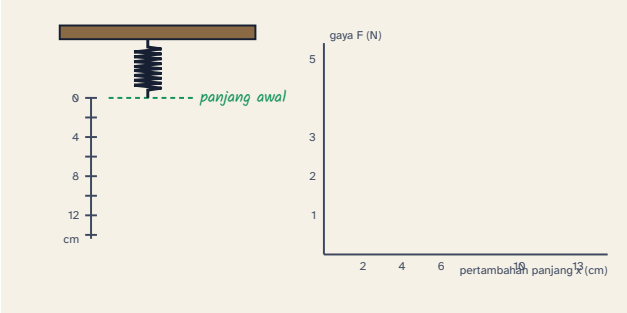
12.1 Hukum Hooke: pegas yang "ingin pulang"

Tarik karet ketapel, lalu lepaskan: karet kembali ke bentuk semula. Tekan jok motor, lalu lepaskan: jok mengembang lagi. Sifat benda yang kembali ke bentuk semula setelah gaya dihilangkan disebut **elastis**. Sebaliknya, plastisin (lilin mainan) yang ditekan tetap penyok. Itu sifat **plastis**.

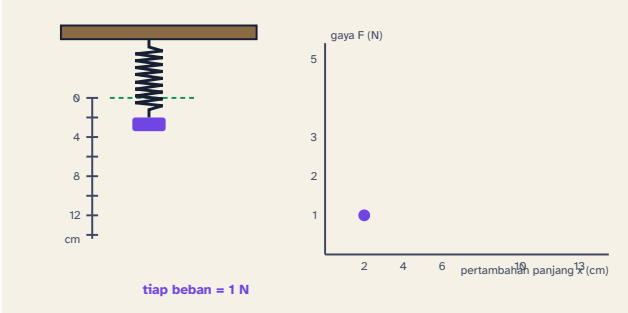
Benda elastis seperti anak kecil yang ditarik tangannya oleh kakaknya: makin jauh ia ditarik dari tempatnya, makin kuat ia menarik balik. Pada pegas, gaya pemulih itu **sebanding** dengan pertambahan panjangnya. Robert Hooke merumuskannya tahun 1678:

Hukum Hooke. Selama batas elastis tidak dilampaui, gaya yang diperlukan untuk meregangkan pegas sebanding dengan pertambahan panjangnya: $F = kx$.

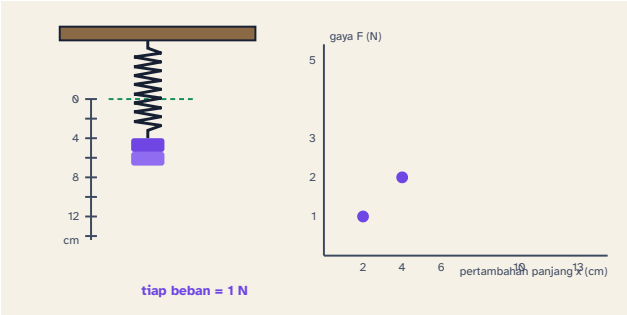
Bahasa sederhana · Gampangnya: tarik pegas 1 cm butuh gaya tertentu. Tarik 2 cm, butuh gaya dua kali. Tarik 3 cm, tiga kali. Tetapi kalau ditarik terlalu jauh, pegas rusak dan tidak bisa kembali lagi.



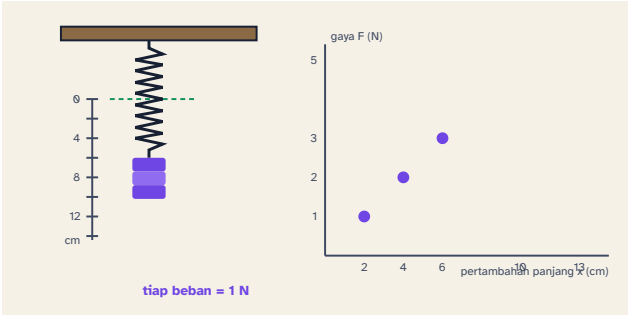
Langkah 1. Sebuah pegas tergantung bebas. Kita tandai panjang awalnya dengan garis hijau.



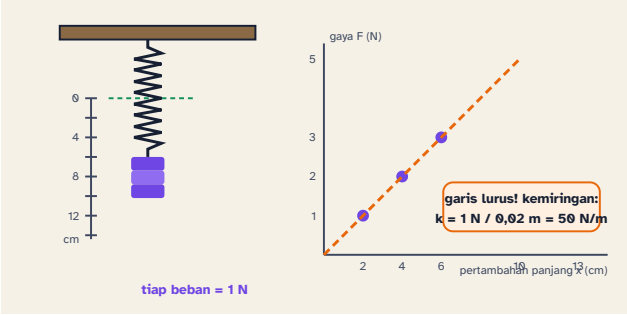
Langkah 2. Gantung satu beban (1 N). Pegas bertambah panjang 2 cm. Catat titiknya di grafik.



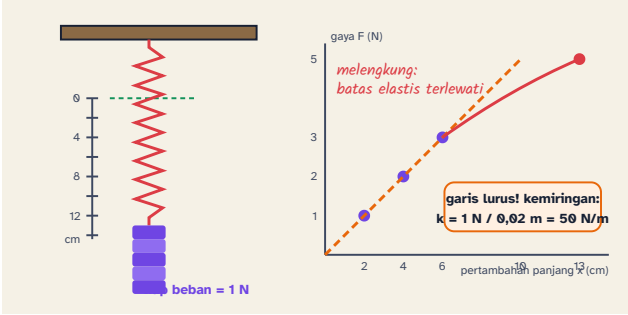
Langkah 3. Dua beban (2 N): pertambahan panjang 4 cm. Dua kali gaya, dua kali regangan.



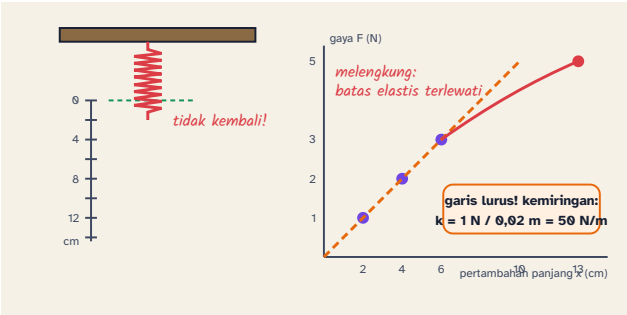
Langkah 4. Tiga beban (3 N): 6 cm. Pola yang sama!



Langkah 5. Titik-titiknya membentuk garis lurus melalui titik asal. Kemiringannya adalah **konstanta pegas** $k = F/x = 1\ \mathrm{N}/0{,}02\ \mathrm{m} = 50$ N/m. Makin besar k, makin kaku pegasnya.



Langkah 6. Lima beban (5 N): seharusnya 10 cm, tetapi pegas memanjang 13 cm. Grafiknya melengkung karena **batas elastis** sudah terlewati.



Langkah 7. Semua beban dilepas: pegas tidak kembali ke panjang awal, masih 2 cm lebih panjang. Pegas sudah mengalami **deformasi plastis**.

RUMUS HIDUP **Hukum Hooke**

$$F = k\,x$$

Gaya pegas = konstanta pegas × pertambahan panjang. Tarik dua kali lebih jauh, pegas melawan dua kali lebih kuat.

k Konstanta pegas N/m | x Pertambahan panjang cm | F Gaya pegas N

GAYA PEGAS
10
N

Pegas dengan k = **200** N/m yang ditarik **5** cm melawan dengan gaya **10** N.

Satuan Nusantara: ≈ 10 × berat apel kecil (±100 g) · ≈ 4% dari berat karung beras 25 kg · ≈ 2% dari berat orang 50 kg

Cek satuan: $\mathrm{N/m} \times \mathrm{m} = \mathrm{N}$. Ubah cm ke m dulu: bagi 100.

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

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Dalam $F = kx$, x adalah **pertambahan panjang**, bukan panjang pegas. Pegas 20 cm yang ditarik menjadi 25 cm memiliki $x = 5$ cm. Ingat juga satuannya: jika k dalam N/m, x harus dalam meter.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Robert Hooke (1635–1703) takut idenya dicuri. Tahun 1676 ia hanya menerbitkan teka-teki huruf acak: *ceiiinosssttuv*. Dua tahun kemudian ia membuka rahasianya. Huruf-huruf itu adalah susunan acak kalimat Latin *ut tensio, sic vis*, artinya "sebagaimana regangannya, begitulah gayanya".

12.2 Tegangan, regangan, dan modulus Young

Konstanta pegas k bergantung pada bentuk benda. Kawat baja tipis lebih mudah meregang daripada batang baja tebal, walaupun bahannya sama. Untuk membandingkan **bahan**, fisikawan memakai tiga besaran:

- **Tegangan** (*stress*) $\sigma = \dfrac{F}{A}$: gaya per luas penampang. Satuannya Pa (N/m²). Tali rafia dan tambang kapal yang ditarik gaya sama mengalami tegangan sangat berbeda.

- **Regangan** (*strain*) $\varepsilon = \dfrac{\Delta L}{L_0}$: pertambahan panjang dibagi panjang awal. Tidak bersatuan, sering ditulis dalam persen.
- **Modulus Young** $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon} = \dfrac{F L_0}{A\,\Delta L}$: ukuran kekakuan bahan. Makin besar E, makin sulit bahan diregangkan.

RUMUS HIDUP **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.

F Gaya tarik N | L_0 Panjang awal m | d Diameter kawat (A = πd²/4) mm | E Modulus Young GPa | ΔL Pertambahan panjang mm

PERTAMBAHAN PANJANG

0,637

mm

Batang sepanjang **2** m berdiameter **10** mm (modulus **200** GPa) yang ditarik **5.000** N bertambah panjang **0,637** mm.

Cek satuan: $\dfrac{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{N/m}^2} = \mathrm{m}$, lalu dikali 1000 menjadi mm. (1 GPa = 10^9 Pa.)

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

Bahan	Modulus Young E (GPa)	Kuat tarik (MPa, perkiraan)	Sifat saat patah
Baja (besi beton)	200	400–600	ulet: meleleh dan "berleher" dulu
Aluminium paduan	70	±300	ulet

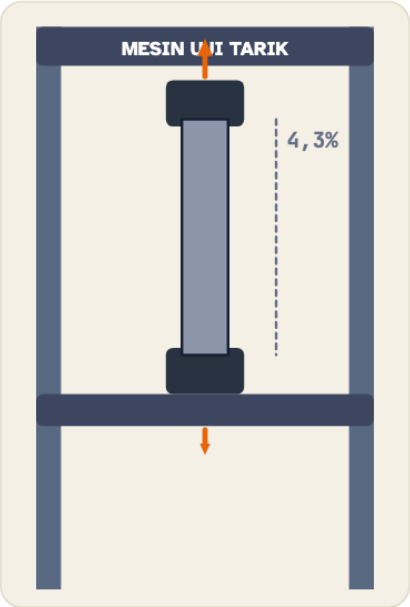
Tembaga	±120	±220	sangat ulet (mudah dibentuk kabel)
Serat bambu (arah memanjang)	±10–20	±100–300	cukup getas, berserat
Kayu jati (searah serat)	±10–13	±100	getas
Beton	±20–30	±2–5 (kuat ditekan, lemah ditarik!)	getas
Kaca	±70	±30–100	getas: patah tanpa peringatan
Karet	±0,01–0,1	±15–25	sangat melar (sampai ratusan persen)

Kurva tegangan–regangan: "biografi" sebuah bahan

Jika sebatang bahan ditarik pelan-pelan sampai putus sambil dicatat tegangan dan regangannya, kita mendapat kurva tegangan–regangan. Untuk baja, kurvanya punya beberapa daerah: (1) **daerah elastis** yang lurus (hukum Hooke, kemiringannya E); (2) **titik luluh**, saat baja mulai "mengalir" dan tidak bisa kembali sepenuhnya; (3) **daerah plastis**, ketika baja makin kuat sambil memanjang; (4) **kuat tarik maksimum**; (5) **penciutan leher** (*necking*); dan (6) **titik patah**.

LAB MINI Mesin uji tarik: tarik sampai putus!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-12



Tegangan σ	Regangan ε	Gaya tarik	Keadaan
306,4 MPa	4,286 %	15,32 kN	Plastis: tak kembali penuh

Regangan permanen
4,133 %

Pilih bahan, lalu tekan **Jalankan** untuk menarik. Tekan **Lepas beban** di tengah jalan: apakah bahan kembali ke panjang awal? Coba sekali di daerah elastis dan sekali setelah titik luluh. Nyalakan **Perbesar daerah elastis** untuk melihat garis hukum Hooke.

KERJAKAN BERSAMA Besi beton yang ditarik

Besi beton berdiameter 10 mm dan panjang 3 m ditarik gaya 10 kN. Modulus Young baja 200 GPa. Hitung tegangan dan pertambahan panjangnya.

1. Luas penampang: $A = \frac{\pi}{4}d^2 = \frac{\pi}{4}(0{,}010)^2 = 7{,}85 \times 10^{-5}\ \mathrm{m}^2$.
2. Tegangan: $\sigma = F/A = 10.000/7{,}85 \times 10^{-5} \approx 1{,}27 \times 10^8$ Pa $= 127$ MPa.
3. Regangan: $\varepsilon = \sigma/E = 1{,}27 \times 10^8/2 \times 10^{11} = 6{,}4 \times 10^{-4}$.
4. Pertambahan panjang: $\Delta L = \varepsilon L_0 = 6{,}4 \times 10^{-4} \times 3 \approx 1{,}9 \times 10^{-3}$ m.

Besi memanjang hanya ±1,9 mm, dan tegangannya (127 MPa) masih di bawah titik luluh besi beton (±240–420 MPa). Besi itu aman dan akan kembali ke panjang semula.

FISIKA INDONESIA

Orang Indonesia sering menyebut pegas sebagai "per", dari bahasa Belanda *veer*. Nenek moyang kita juga sudah lama memakai bahan elastis yang hebat: **bambu**. Serat bambu kuat menahan tarikan, ringan, dan lentur. Rumah dan jembatan bambu bisa melentur saat gempa lalu kembali, alih-alih retak seperti dinding bata tanpa tulangan. Karena itu bambu kini diteliti lagi sebagai bahan bangunan tahan gempa dan ramah lingkungan, termasuk oleh perguruan tinggi di Indonesia.

MITOS

"Bahan elastis artinya bahan yang mudah melar, seperti karet."

MITOS

"Besi tidak bisa memanjang."

FAKTA

Dalam fisika, elastis berarti **bisa kembali ke bentuk semula**. Baja sangat elastis pada beban sedang, tetapi sulit melar karena modulus Young-nya ribuan kali modulus karet.

FAKTA

Semua bahan memanjang saat ditarik, hanya sedikit sekali. Kabel baja lift setinggi 100 m bisa memanjang beberapa sentimeter saat lift penuh penumpang.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

ENERGI DALAM KAWAT DAN TEGANGAN TERMAL

Usaha untuk meregangkan kawat sama dengan luas di bawah grafik F–x: $W = \frac{1}{2}F\,\Delta L = \frac{1}{2}k(\Delta L)^2$. Dibagi volume AL_0, energi per volume adalah $\frac{1}{2}\sigma\varepsilon$. Jika batang dijepit di kedua ujung lalu dipanaskan sebesar ΔT, ia "ingin" memuai sebesar $\alpha L_0 \Delta T$ tetapi ditahan. Muncullah **tegangan termal** $\sigma = E\alpha\Delta T$. Untuk rel baja ($\alpha = 1{,}2 \times 10^{-5}$ /°C) yang suhunya naik 25 °C, tegangannya 60 MPa! Itulah sebabnya rel diberi celah atau dipasang dengan perhitungan khusus. Saat ditarik, kawat juga sedikit mengecil diameternya; perbandingan regangan melintang terhadap regangan memanjang disebut **rasio Poisson** (±0,3 untuk baja, ±0,5 untuk karet).

12.3 Susunan pegas: seri dan paralel

Motor bebek punya **dua** shock absorber di roda belakang, berdampingan. Kasur per berisi ratusan pegas berdiri berjajar. Bagaimana menghitung kekakuan gabungannya?

Susunan	Yang sama	Yang dijumlahkan	Konstanta pengganti	Efek
Paralel (berdampingan)	pertambahan panjang x	gaya: $F = F_1 + F_2$	$k_p = k_1 + k_2$	lebih kaku

Seri (disambung memanjang)	gaya F di tiap pegas	pertambahan panjang: $x = x_1 + x_2$	$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$	lebih lembek

TRIK KAK NARA: "BERDIRI BAHU-MEMBAHU" VS "BERGANDENGAN MEMANJANG"

Paralel itu seperti teman-teman yang mengangkat meja **bersama-sama**: bebannya terbagi, jadi terasa lebih kuat (lebih kaku). Seri itu seperti **menyambung** dua karet gelang: setiap karet menahan tarikan penuh, sehingga totalnya melar lebih banyak (lebih lembek). Untuk dua pegas identik k: paralel → $2k$, seri → $k/2$.

Tebak Dulu!

Sebuah pegas dengan konstanta k dipotong menjadi dua bagian yang sama panjang. Berapa konstanta pegas masing-masing potongan?

- $k/2$, karena pegasnya tinggal setengah.
- Tetap k, karena bahannya sama.
- $2k$, jadi lebih kaku.
- $4k$, karena panjangnya dikuadratkan.

Jawabannya: $2k$. Pegas utuh sebenarnya adalah dua setengah-pegas yang disusun **seri**. Jika tiap potongan berkonstanta k', maka $1/k = 1/k' + 1/k'$, sehingga $k' = 2k$. Masuk akal: dengan gaya yang sama, tiap potongan hanya meregang setengah dari pegas utuh. Pegas yang lebih pendek selalu lebih kaku.

KERJAKAN BERSAMA **Dua shock absorber motor**

Roda belakang motor ditopang dua shock absorber yang dipasang paralel, masing-masing $k = 15.000$ N/m. Saat Kak Nara (60 kg) duduk, anggap seluruh beratnya ditahan roda belakang ($g = 10$ m/s²). Berapa sentimeter jok turun?

1. Susunan paralel: $k_p = 15.000 + 15.000 = 30.000$ N/m.
2. Gaya: $F = mg = 60 \times 10 = 600$ N.
3. $x = F/k_p = 600/30.000 = 0{,}02$ m $= 2$ cm.

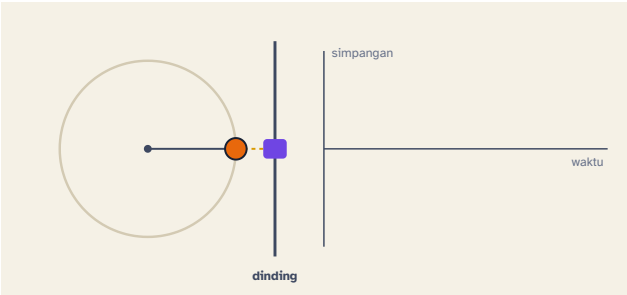
Jok turun ±2 cm. Kalau hanya ada satu shock absorber, turunnya 4 cm. Karena itu motor yang sering membawa beban berat memakai per yang lebih kaku.

12.4 Getaran harmonik sederhana (GHS)

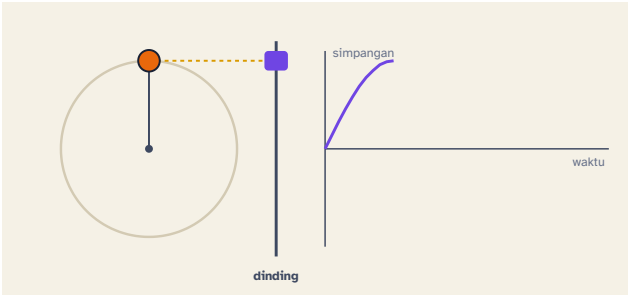
Tarik beban di ujung pegas, lalu lepaskan. Beban bergerak bolak-balik melewati titik setimbang. Gaya pegas $F = -kx$ selalu mengarah ke titik setimbang (tanda minus) dan makin besar jika simpangannya makin jauh. Gerak bolak-balik dengan gaya pemulih yang **sebanding dengan simpangan** ini disebut **getaran harmonik sederhana** (GHS).

- **Simpangan** x: jarak dari titik setimbang (bisa positif atau negatif).
- **Amplitudo** A: simpangan terbesar.
- **Periode** T: waktu satu getaran penuh (s). **Frekuensi** $f = 1/T$: banyak getaran per sekon (hertz, Hz).
- **Frekuensi sudut** $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ (rad/s).

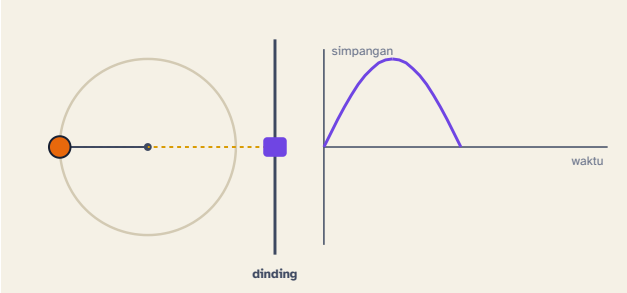
Ada cara cantik melihat GHS: perhatikan **bayangan** sebuah bola yang bergerak melingkar beraturan.



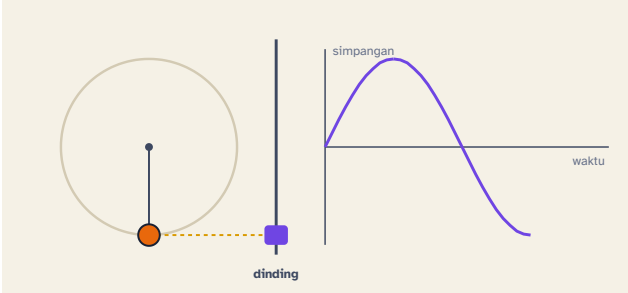
Langkah 1. Sebuah bola (oranye) bergerak melingkar dengan laju tetap. Cahaya dari samping membuat bayangannya (ungu) jatuh di dinding.



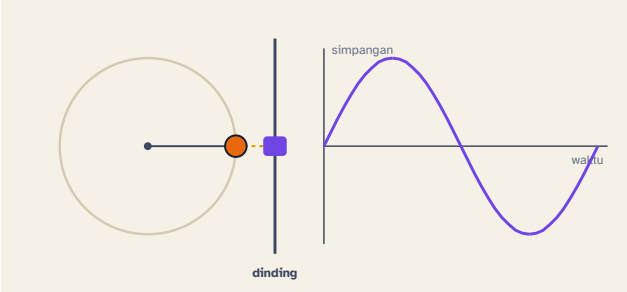
Langkah 2. Bola berputar seperempat lingkaran. Bayangannya naik ke posisi tertinggi, sejauh jari-jari lingkaran: itulah amplitudo A.



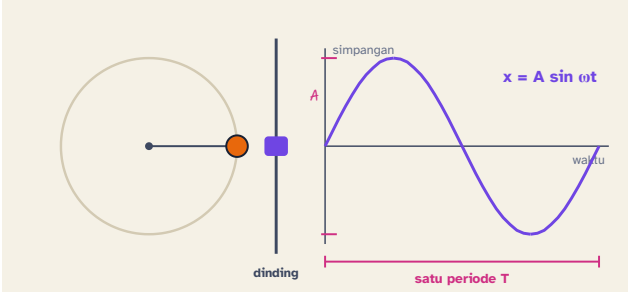
Langkah 3. Setengah putaran: bayangan kembali ke tengah, kini sambil bergerak turun.



Langkah 4. Tiga perempat putaran: bayangan di posisi terendah, $-A$.



Langkah 5. Satu putaran penuh: bayangan kembali ke tengah. Jika posisinya dicatat terhadap waktu, terbentuk kurva sinus.



Langkah 6. Bayangan itu bergerak persis seperti beban di ujung pegas! Simpangannya $x = A \sin \omega t$, dengan ω adalah laju sudut bola. Satu putaran = satu periode getaran.

Posisi	Simpangan	Kecepatan	Percepatan (dan gaya)
Titik setimbang	0	**maksimum**: $v_{\text{maks}} = \omega A$	nol
Ujung simpangan	$\pm A$	nol (sesaat berhenti)	**maksimum**: $a_{\text{maks}} = \omega^2 A$, menuju titik setimbang

AWAS JEBAKAN

Di ujung simpangan beban berhenti sesaat, tetapi percepatannya justru **paling besar**, sama seperti bola di puncak lemparan (Bab 4). Di titik setimbang beban paling cepat, tetapi percepatannya **nol**. Kecepatan nol tidak berarti percepatan nol!

12.5 Periode pegas dan bandul

Dari Hukum II Newton, $ma = -kx$, sehingga $a = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x$. Jadi $\omega = \sqrt{k/m}$, dan periodenya:

RUMUS HIDUP **Periode sistem pegas-beban**

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Beban berat bergetar lambat, pegas kaku bergetar cepat. Amplitudo sama sekali tidak berpengaruh!

m Massa beban kg | k Konstanta pegas N/m | T Periode s

PERIODE

0,993

s

Beban **0,5** kg pada pegas **20** N/m bergetar dengan periode **0,993** s. Coba jadikan massanya 4 kali: periodenya menjadi berapa kali?

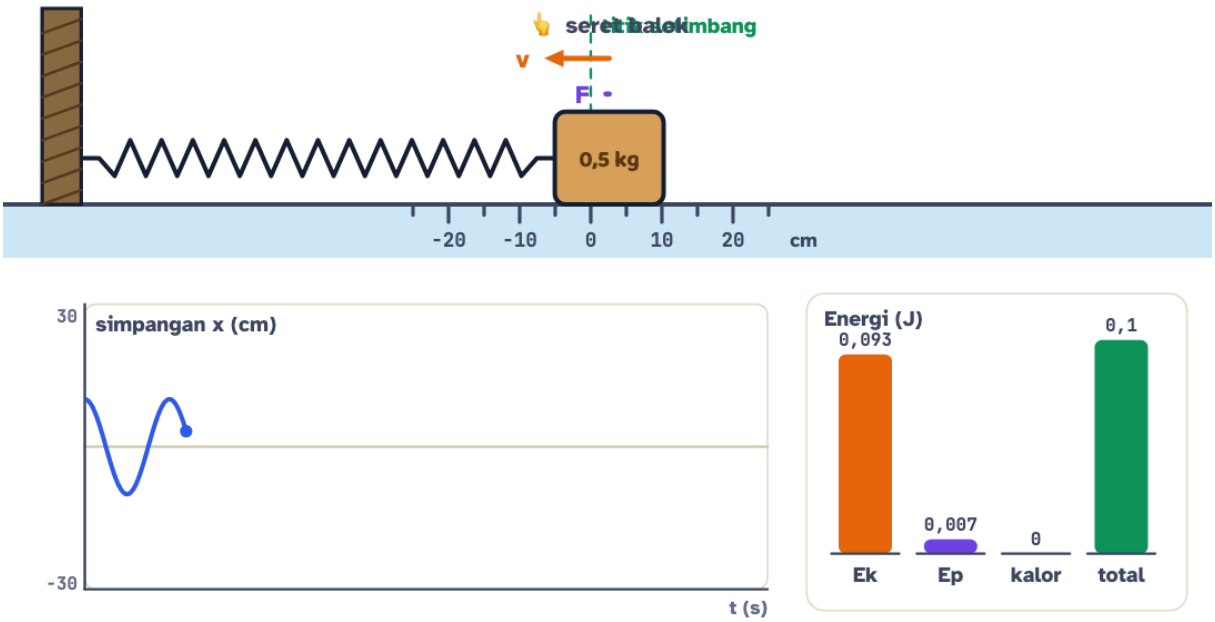
Cek satuan: $\sqrt{\frac{\text{kg}}{\text{N/m}}} = \sqrt{\frac{\text{kg}}{\text{kg/s}^2}} = \text{s}$

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

LAB MINI

Lab pegas-beban: grafik x–t dan energi

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-12



k pengganti	T rumus	T terukur	Simpangan	Jenis redaman
20 N/m	0,993 s	–	2,6 cm	tanpa redaman

Seret balok ke kanan atau kiri untuk memberi simpangan, lalu lepaskan. Bandingkan periode terukur dengan rumus. Ubah susunan pegas menjadi seri atau paralel. Lalu naikkan **redaman** sedikit demi sedikit sampai balok tidak lagi bolak-balik. Itulah cara kerja shock absorber!

Tebak Dulu!

Balok di ujung pegas ditarik 5 cm lalu dilepas, periodenya 1 s. Jika balok ditarik 10 cm lalu dilepas, periodenya menjadi...

- 2 s, karena jaraknya dua kali lebih jauh.
- Tetap 1 s.
- 0,5 s, karena gayanya dua kali lebih besar.
- 1,41 s.

Tetap 1 s. Jaraknya memang dua kali, tetapi gaya pegas juga dua kali, sehingga balok bergerak dua kali lebih cepat. Waktunya sama! Sifat ini disebut *isokron* ("waktu sama"), dan inilah alasan pegas dan bandul dipakai sebagai pengatur waktu jam. Uji sendiri di lab pegas di atas.

Bandul sederhana

Bandul adalah beban kecil di ujung tali ringan. Untuk simpangan kecil (di bawah ±15°), gaya pemulihnya $-mg\sin\theta \approx -mg\,x/L$, sebanding dengan simpangan. Jadi bandul juga bergetar harmonik, dengan "konstanta pegas" mg/L. Massa saling coret, dan

RUMUS HIDUP **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.

L Panjang tali m | g Percepatan gravitasi m/s² | T Periode s

PERIODE
2,007
s

Bandul sepanjang **1** m di tempat dengan g = **9,8** m/s² berayun dengan periode **2,007** s.

Cek satuan: $\sqrt{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{m/s^2}}} = \sqrt{\mathrm{s^2}} = \mathrm{s}$

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

TRIK KAK NARA: BANDUL SATU METER

Hafalkan satu fakta ini: bandul sepanjang **1 meter** di Bumi berayun dengan periode hampir tepat **2 sekon** (sekali ke kiri 1 s, sekali ke kanan 1 s). Dari sini kamu bisa menebak cepat: tali 4 m → periode 2 kali → 4 s; tali 25 cm → periode setengah → 1 s.

TAMU DARI MASA LALU

Konon, sekitar tahun 1583 Galileo muda yang bosan di Katedral Pisa memperhatikan lampu gantung yang berayun. Ia mengukur waktunya dengan denyut nadinya sendiri dan heran: ayunan besar maupun kecil memakan waktu sama! Tahun 1656, Christiaan Huygens memakai sifat ini untuk membuat jam bandul pertama, yang ketepatannya jauh melampaui jam-jam sebelumnya.

CONTOH **Frekuensi ayunan**

Sari menghitung ayunan bandul: 20 ayunan penuh dalam 30 s. Berapa periode dan frekuensinya?

1. Periode: $T = \dfrac{\text{waktu}}{\text{jumlah ayunan}} = \dfrac{30}{20} = 1{,}5$ s.
2. Frekuensi: $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{1{,}5} \approx 0{,}67$ Hz.

$T = 1{,}5$ s dan $f \approx 0{,}67$ Hz. Mengukur 20 ayunan sekaligus (bukan satu) membuat galat reaksi stopwatch terbagi 20, sehingga hasilnya jauh lebih teliti.

COBA SENDIRI **Jam bandul kakek dibawa ke Bulan**

Jam bandul kakek berdetak tepat di Bumi ($g = 9{,}8$ m/s²) dengan periode bandul 2,00 s. Jam itu dibawa ke Bulan ($g = 1{,}62$ m/s²). (a) Berapa periode bandulnya di Bulan? (b) Setelah 1 jam waktu sebenarnya, jam itu menunjukkan berapa menit?

1. $T \propto 1/\sqrt{g}$, jadi $T_{\text{Bulan}} = 2{,}00\sqrt{\dfrac{9{,}8}{1{,}62}} = 2{,}00 \times 2{,}46 \approx 4{,}92$ s.
2. Dalam 3.600 s sebenarnya, bandul hanya berayun $3600/4{,}92 \approx 732$ kali.
3. Jam "mengira" setiap ayunan bernilai 2 s, jadi ia menunjukkan $732 \times 2 = 1464$ s $\approx 24{,}4$ menit.

Periode di Bulan ±4,9 s, dan jam itu sangat terlambat: hanya maju ±24 menit setiap jam. Jam bandul hanya tepat di tempat yang nilai g-nya sama dengan tempat jam itu disetel.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

JAWABAN TEKA-TEKI TEROWONGAN BUMI (DARI BAB 11)

Di dalam Bumi homogen, gaya gravitasi pada bola bermassa m adalah $F = -\dfrac{mg}{R}\,r$: bentuknya persis $F = -kx$ dengan $k = mg/R$. Maka bola bergetar harmonik dengan $T = 2\pi\sqrt{R/g} = 2\pi\sqrt{6{,}37 \times 10^6/9{,}8} \approx 5.066$ s ≈ 84 menit. Sekali jalan dari Pontianak ke Amazon butuh setengahnya: **±42 menit**, dan hasilnya sama untuk terowongan lurus mana pun, bahkan yang tidak melewati pusat! Perhatikan juga: 84 menit adalah periode satelit yang mengorbit tepat di permukaan Bumi. Kebetulan? Tidak: gerak bola di terowongan adalah "bayangan" gerak satelit itu. Contoh GHS lain: **bandul fisis** $T = 2\pi\sqrt{I/(mgd)}$, air dalam pipa U $T = 2\pi\sqrt{L/(2g)}$, dan benda terapung yang ditekan lalu dilepas.

12.6 Energi dalam getaran: bolak-balik antara gerak dan simpanan

Saat pegas teregang maksimum, beban diam sesaat: semua energinya tersimpan sebagai **energi potensial pegas** $\frac{1}{2}kx^2$. Saat melewati titik setimbang, pegas tidak teregang, dan semua energi menjadi **energi kinetik** $\frac{1}{2}mv^2$. Di antaranya, energi terbagi dua, tetapi jumlahnya selalu tetap (tanpa gesekan):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

Bahasa sederhana · Gampangnya: getaran itu seperti menuang air bolak-balik antara dua gelas. Gelas "gerak" dan gelas "simpanan" bergantian penuh, tetapi jumlah airnya tidak berubah.

RUMUS HIDUP **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!

k Konstanta pegas N/m | A Amplitudo cm | E Energi total J

ENERGI TOTAL
0,5
J

Pegas **100** N/m yang bergetar dengan amplitudo **10** cm menyimpan energi total **0,5** J, yang terus berpindah antara energi kinetik dan potensial.

Cek satuan: $\mathrm{N/m} \times \mathrm{m}^2 = \mathrm{N\,m} = \mathrm{J}$

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

KERJAKAN BERSAMA **Pegas pelontar bola mainan**

Pistol mainan memakai pegas $k = 200$ N/m yang ditekan 10 cm untuk melontarkan bola 50 g secara mendatar. Gesekan diabaikan. Berapa kelajuan bola saat lepas?

1. Energi pegas: $E = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 200 \times (0{,}10)^2 = 1{,}0$ J.
2. Semuanya menjadi energi kinetik: $\frac{1}{2}mv^2 = 1{,}0 \rightarrow v^2 = \dfrac{2 \times 1{,}0}{0{,}050} = 40.$
3. $v = \sqrt{40} \approx 6{,}3$ m/s.

Bola melesat ±6,3 m/s (±23 km/jam). Ini sama dengan $v_{\text{maks}} = \omega A = \sqrt{k/m}\,A$. Prinsip yang sama bekerja pada ketapel: energi karet yang diregangkan berubah menjadi energi gerak kerikil.

Shock absorber motor

Per menyerap guncangan polisi tidur, lalu peredam oli mencegah motor terus berayun naik-turun.

Kasur per

Ratusan pegas kecil tersusun paralel dan menyebar beban tubuh sehingga tekanan pada punggung merata.

Timbangan gantung pedagang

Pedagang ikan di pasar memakai timbangan pegas: pertambahan panjang pegas sebanding dengan berat ikan (hukum Hooke).

Jam dinding bandul

Ayunan bandul yang isokron menjadi "detak" jam. Sekrup di bawah bandul menggeser beban untuk menyetel kecepatan jam.

Ketapel

Karet yang diregangkan menyimpan energi potensial elastis, lalu mengubahnya menjadi energi kinetik kerikil.

12.7 Redaman dan resonansi

Ayunan di taman yang tidak didorong lama-lama berhenti. Energinya terkikis gesekan udara dan gesekan di engsel. Getaran yang amplitudonya makin kecil disebut **getaran teredam**. Ada tiga jenisnya:

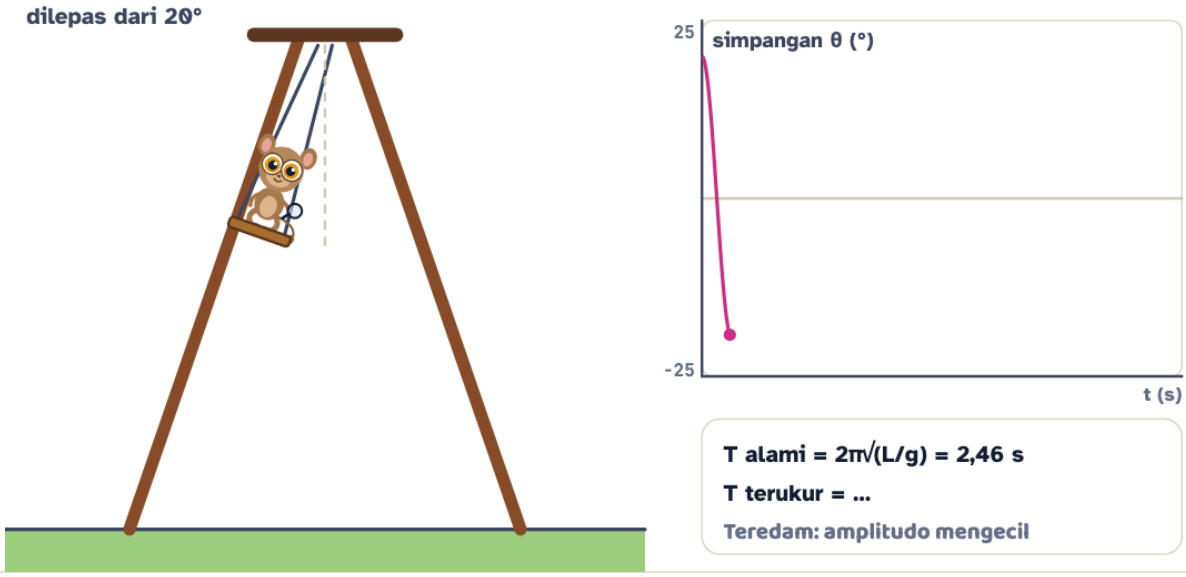
- **Kurang teredam:** masih bolak-balik beberapa kali sambil mengecil (ayunan, senar gitar).

- **Teredam kritis:** kembali ke titik setimbang **secepat mungkin tanpa bolak-balik**. Inilah yang diinginkan pada shock absorber dan penutup pintu otomatis.
- **Terlalu teredam:** kembali sangat pelan, seperti sendok yang ditarik dari madu kental.

Sekarang kebalikannya. Setiap benda yang bisa bergetar punya **frekuensi alami**. Jika benda itu didorong berulang-ulang dengan frekuensi **yang sama** dengan frekuensi alaminya, setiap dorongan datang tepat waktu dan menambah energi. Amplitudonya membesar terus. Peristiwa ini disebut **resonansi**. Kamu memakainya setiap kali mendorong adikmu di ayunan: dorongan kecil, tetapi tepat irama.

LAB MINI **Ayunan taman: redaman dan resonansi**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-12



T alami (rumus)	T terukur	Simpangan	Amplitudo
2,46 s	–	-19,4 °	20 °

Keadaan
Teredam: amplitudo mengecil

Mode **Ayun bebas**: atur sudut awal dan redaman, lalu bandingkan periode terukur dengan rumus. Mode **Didorong berirama**: Raka mendorong dengan periode tertentu. Samakan periode dorongan dengan periode alami ayunan dan saksikan amplitudonya membesar. Lalu coba periode dorongan yang meleset jauh.

FISIKA INDONESIA

Indonesia berada di Cincin Api, jadi gempa adalah tamu yang pasti datang. Setiap gedung punya frekuensi alami. Sebagai perkiraan kasar, periode alami gedung bertingkat N sekitar $0{,}1N$ sekon. Jika getaran tanah saat gempa berirama mirip, gedung bisa beresonansi. Insinyur Indonesia memakai berbagai cara: fondasi peredam (*base isolator*) dari karet berlapis baja, dinding geser, dan peredam getaran. Kearifan lokal juga mengenal prinsip ini: rumah adat Nias berdiri di atas tiang-tiang kayu besar dengan tiang silang, dan banyak dilaporkan tetap berdiri saat gempa Nias 2005. Jembatan gantung desa pun dirancang dengan memperhitungkan beban pejalan kaki agar tidak mudah berayun.

MITOS

"Pasukan yang berbaris seirama menyeberang jembatan itu gagah dan aman."

FAKTA

Langkah serempak bisa memicu resonansi. Tahun 1831, sebuah jembatan gantung di Inggris runtuh saat dilewati pasukan yang berbaris seirama. Sejak itu, pasukan diperintahkan memecah langkah saat menyeberang jembatan.

MITOS

"Ayunan yang disimpangkan lebih jauh pasti butuh waktu lebih lama untuk satu ayunan."

FAKTA

Untuk simpangan kecil, waktunya sama (isokron). Jaraknya lebih jauh, tetapi bebannya juga bergerak lebih cepat. Baru pada simpangan sangat besar (di atas ±20°) periodenya sedikit memanjang.

LANJUT · OLIMPIADE

TACOMA NARROWS: BUKAN RESONANSI BIASA

Jembatan Tacoma Narrows di Amerika Serikat runtuh tahun 1940 diterpa angin yang **tidak berirama** (±64 km/jam, cukup tetap). Buku lama menyebutnya resonansi, tetapi penjelasan modern adalah **flutter aeroelastik**: gerak puntir jembatan mengubah aliran udara di sekitarnya, dan aliran itu justru mendorong puntiran makin besar. Ini getaran yang "memberi makan dirinya sendiri" (redaman efektifnya negatif). Pelajarannya: jembatan modern diuji dalam terowongan angin. Untuk getaran paksa biasa, persamaannya $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t$; amplitudo tunak $A = \dfrac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (b\omega/m)^2}}$, yang puncaknya makin tinggi dan tajam jika redaman b makin kecil.

Cek Cepat

Pegas bertambah panjang 2 cm saat ditarik 4 N. Berapa gaya untuk menariknya 6 cm (masih elastis)?

- 8 N
- 12 N
- 24 N
- 6 N

Panjang tali bandul dijadikan 4 kali semula. Periodenya menjadi...

- 4 kali semula
- setengah kali semula
- tetap
- 2 kali semula

Saat beban pegas melewati titik setimbangnya...

- kecepatannya maksimum dan percepatannya nol
- kecepatannya nol dan percepatannya maksimum
- kecepatan dan percepatannya sama-sama nol
- energi potensial pegasnya maksimum

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: hukum Hooke dengan karet gelang dan air

Bahan: 1 karet gelang, kantong plastik kecil berpegangan, gelas takar (atau botol air mineral 600 mL dan spidol), penggaris, paku atau gantungan

1. Gantungkan karet gelang pada paku, lalu kaitkan kantong plastik di ujung bawahnya. Ukur panjang karet.
2. Tuang 100 mL air ke kantong (massanya 100 g, beratnya ±1 N). Ukur pertambahan panjangnya. Ulangi sampai 500 mL.
3. Buat tabel dan grafik gaya (N) terhadap pertambahan panjang (cm). Apakah garisnya lurus seperti pegas logam?
4. Kosongkan kantong. Apakah karet kembali tepat ke panjang awal?

Pertanyaan: Pada beban berapa grafikmu mulai melengkung? Berapa konstanta "pegas" karet gelangmu di daerah yang paling lurus? Mengapa karet gelang tidak sebaik pegas logam untuk timbangan?

RINGKASAN KILAT **Bab 12 dalam 3 menit**

✅ Kamu sekarang bisa...

- memakai **hukum Hooke** $F = kx$ dan menghitung konstanta pegas, termasuk susunan **seri** dan **paralel**
- membedakan **tegangan**, **regangan**, dan **modulus Young**, serta membaca kurva tegangan–regangan sampai bahan patah
- mengenali **getaran harmonik sederhana** dan menghitung periode pegas-beban serta bandul
- menjelaskan perpindahan energi kinetik dan potensial selama benda bergetar
- menjelaskan **redaman** dan **resonansi** pada shock absorber, ayunan, jembatan, dan gedung

🔑 Istilah kunci

elastis | plastis | Tegangan | Regangan | Modulus Young | getaran harmonik sederhana | getaran teredam | frekuensi alami | resonansi

🧮 Rumus penting

$$F = k\,x$$

Hukum Hooke. Gaya pegas = konstanta pegas × pertambahan panjang. Tarik dua kali lebih jauh, pegas melawan dua kali lebih kuat.

$$\Delta L = \frac{F\,L_0}{\frac{\pi}{4} d^2\,E}$$

Pertambahan panjang kawat atau batang. Kawat makin panjang dan gaya makin besar → makin melar. Kawat makin tebal dan bahan makin kaku → makin sedikit melar.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Periode sistem pegas-beban. Beban berat bergetar lambat, pegas kaku bergetar cepat. Amplitudo sama sekali tidak berpengaruh!

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Periode bandul sederhana. Tali makin panjang, ayunan makin lambat. Di Bulan yang gravitasinya lemah, ayunan jauh lebih lambat. Massa beban tidak berpengaruh.

$$E = \frac{1}{2}\,k\,A^2$$

Energi total getaran pegas. Energi getaran sebanding dengan kuadrat amplitudo. Simpangan dua kali lebih besar berarti energi empat kali!

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Dalam $F = kx$, x adalah pertambahan panjang, bukan panjang pegas.
- Di ujung simpangan beban berhenti sesaat, tetapi percepatannya justru paling besar, sama seperti bola di puncak lemparan (Bab 4).

⛰️ 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=12

Teka-teki untuk Bab 13

Tekan bebek karet di kolam lalu lepaskan: ia naik-turun beberapa kali, seperti beban di ujung pegas. Lalu lihat kapal tanker raksasa dari baja. Baja hampir 8 kali lebih rapat daripada air, tetapi kapal itu mengapung tenang. Gaya apa yang mendorong bebek dan kapal ke atas, dan mengapa gaya itu bisa berperan seperti "pegas" air?

▼ Intip petunjuk

Makin dalam benda tercelup, makin banyak air yang disingkirkannya, dan makin besar dorongan air ke atas. Sebanding dengan kedalaman tambahan, mirip $F = kx$! Gaya ini ditemukan Archimedes lebih dari 2.200 tahun lalu. Kita bongkar di Bab 13: Fluida Statis.

BAB 13 · FLUIDA & PANAS

13 Fluida Statis: Rahasia Kapal Baja dan Penyelam Bajau

Paku kecil tenggelam, tetapi kapal baja seberat ribuan ton mengapung. Telinga penyelam terasa "ditekan" makin dalam ia menyelam. Mobil satu ton bisa diangkat dengan satu tangan. Ternyata zat cair dan gas yang diam pun menyimpan kekuatan besar.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **tekanan** $P = F/A$ dan menjelaskan mengapa pisau tajam mudah memotong;
- menghitung **tekanan hidrostatis** dan tekanan total di kedalaman tertentu;
- menerapkan **hukum Pascal** pada dongkrak dan rem hidraulik;
- menjelaskan **tekanan udara**, barometer, dan manometer;
- memakai **hukum Archimedes** untuk menentukan benda mengapung, melayang, atau tenggelam, serta menjelaskan **tegangan permukaan** dan **kapilaritas**.

PAKU TENGGELAM, KAPAL MENGAPUNG

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Siapa yang memberi tekanan lebih besar pada lantai: gajah Sumatra 4 ton yang berdiri dengan empat kaki, atau seorang perempuan 50 kg yang bertumpu pada satu hak sepatu runcing (luas ±1 cm²)?

- Gajah, karena gajah jauh lebih berat.
- Perempuan bersepatu hak runcing.
- Sama besar, karena keduanya berdiri diam.
- Tidak bisa dibandingkan, karena satuannya berbeda.

Jawabannya: sepatu hak runcing, sekitar 60 kali lebih besar! Gajah: gaya ±39.000 N dibagi luas empat telapak ±0,5 m² → ±78.000 Pa. Perempuan: ±490 N dibagi 1 cm² (0,0001 m²) → ±4.900.000 Pa. Tekanan bukan soal beratnya saja, tetapi berat *dibagi* luas bidang tumpunya. Itulah sebabnya hak runcing bisa melubangi lantai kayu, sedangkan gajah tidak.

13.1 Tekanan: gaya yang "dipusatkan"

Tekan telapak tanganmu dengan ujung pensil yang tumpul, lalu dengan ujung yang runcing, dengan gaya yang sama. Mana yang lebih sakit? Ujung runcing! Gayanya sama, tetapi terpusat pada bidang yang jauh lebih kecil.

Besaran yang menggambarkan "seberapa terpusat" sebuah gaya disebut **tekanan**.

Tekanan adalah gaya tekan yang tegak lurus bidang dibagi luas bidang tekannya: $P = \frac{F}{A}$. Satuannya pascal (Pa): $1\ \mathrm{Pa} = 1\ \mathrm{N/m^2}$.

Satu pascal itu kecil sekali: kira-kira tekanan selembar kertas HVS yang tergeletak di meja! Karena itu kita sering memakai kilopascal (kPa) atau megapascal (MPa).

Bahasa sederhana · Gampangnya: **bidang sempit → tekanan besar** (pisau tajam, paku runcing, jarum). **Bidang lebar → tekanan kecil** (ban traktor yang lebar, sepatu salju, ransel bertali lebar yang tidak menyakitkan bahu).

RUMUS HIDUP **Tekanan**

$$P = \frac{F}{A}$$

Gaya yang sama terasa jauh lebih 'menusuk' jika bidang tekannya kecil.

F Gaya tekan N | A Luas bidang tekan $\mathrm{cm^2}$ | P Tekanan Pa

TEKANAN
5×10^6
Pa

Gaya **490** N yang bertumpu pada **1** $\mathrm{cm^2}$ menghasilkan tekanan **5×10^6** Pa.

Satuan Nusantara: ≈ 49% dari tekanan di dasar laut sedalam ±1 km · ≈ 22 × tekanan ban motor · ≈ 48 × tekanan udara di pantai

Cek satuan: $1\ \mathrm{cm^2} = 10^{-4}\ \mathrm{m^2}$, jadi $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m^2}} = \mathrm{Pa}$.

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

CONTOH **Kardus di lantai**

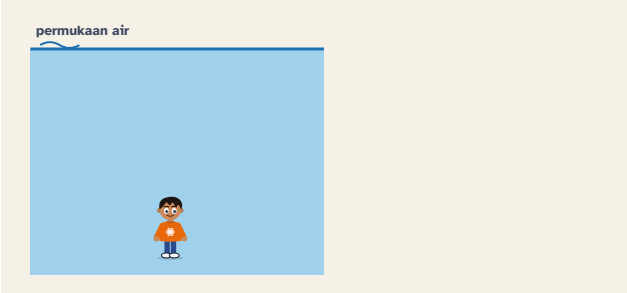
Kardus berisi buku seberat 600 N bertumpu di lantai dengan alas berukuran 0,5 m × 0,4 m. Berapa tekanannya pada lantai?

1. Luas alas: $A = 0{,}5 \times 0{,}4 = 0{,}2\ \mathrm{m}^2$.
2. $P = F/A = 600/0{,}2 = 3000$ Pa $= 3$ kPa.

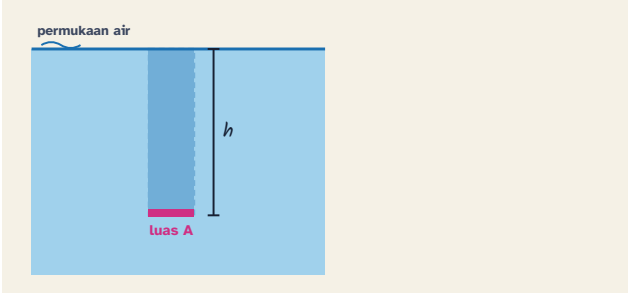
Tekanannya 3.000 Pa. Jika kardus didirikan pada sisinya yang lebih sempit, beratnya tetap 600 N, tetapi tekanannya membesar.

13.2 Tekanan hidrostatis: makin dalam, makin "berat"

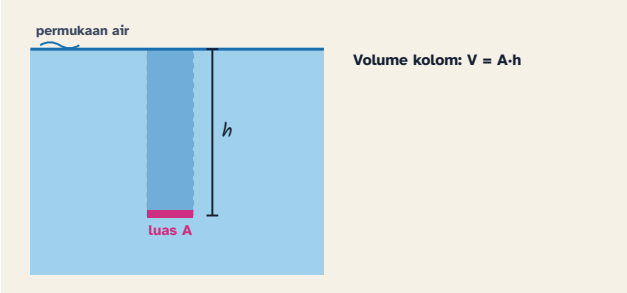
Saat menyelam ke dasar kolam, telingamu terasa ditekan. Penyebabnya adalah air di atasmu. Setiap lapisan air menekan lapisan di bawahnya, jadi makin dalam, makin besar tekanannya. Tekanan karena zat cair yang diam ini disebut **tekanan hidrostatis**. Dari mana rumusnya? Ikuti langkah berikut.



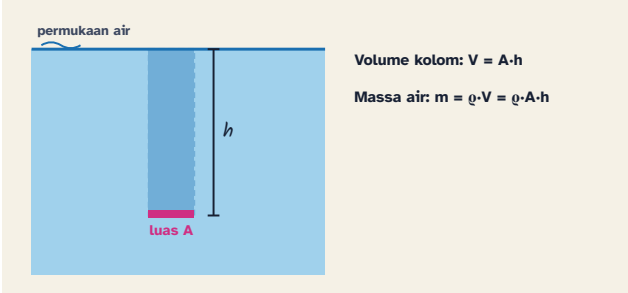
Langkah 1. Raka menyelam pada kedalaman h di bawah permukaan air yang diam.



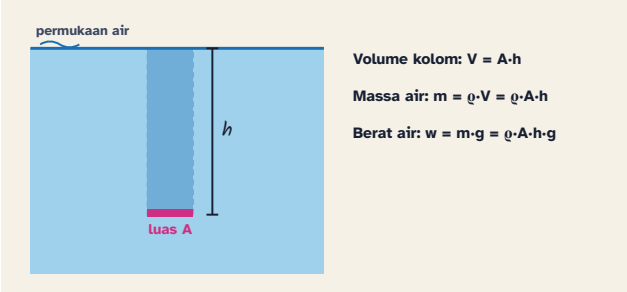
Langkah 2. Bayangkan "tiang air" tepat di atas sepetak kecil seluas A di dekat kepala Raka. Tiang itulah yang menekan petak tersebut.



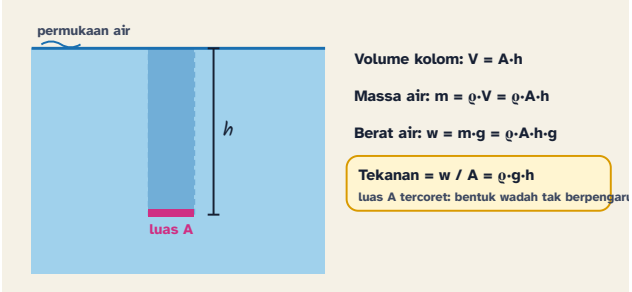
Langkah 3. Volume tiang air adalah luas alas dikali tinggi: $V = Ah$.



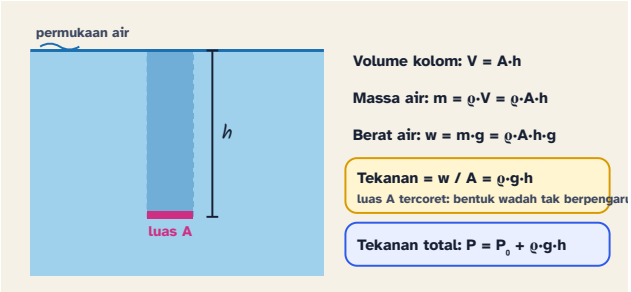
Langkah 4. Massanya: $m = \rho V = \rho A h$, dengan ρ massa jenis air (1.000 kg/m^3 untuk air tawar).



Langkah 5. Beratnya: $w = mg = \rho A h g$.



Langkah 6. Tekanan = gaya/luas $= \rho A h g / A = \rho g h$. Luas A hilang! Tekanan hidrostatis hanya bergantung pada massa jenis, gravitasi, dan kedalaman.



Langkah 7. Di atas permukaan air masih ada udara yang menekan dengan tekanan $P_0 \approx 101$ kPa. Tekanan total di kedalaman h adalah $P = P_0 + \rho g h$.

RUMUS HIDUP

Tekanan hidrostatis

$$P_h = \rho\, g\, h$$

Tekanan zat cair = massa jenis × gravitasi × kedalaman. Di air laut, setiap 10 m menambah ±1 atmosfer.

- ρ Massa jenis fluida kg/m³
- h Kedalaman m
- P_h Tekanan hidrostatis Pa

TEKANAN HIDROSTATIS

100.450

Pa

Di kedalaman **10** m dalam fluida bermassa jenis **1.025** kg/m³, tekanan hidrostatisnya **100.450** Pa. Jangan lupa tambahkan tekanan udara ±101.300 Pa untuk tekanan total.

Satuan Nusantara: ≈ 99% dari tekanan udara di pantai · ≈ 46% dari tekanan ban motor

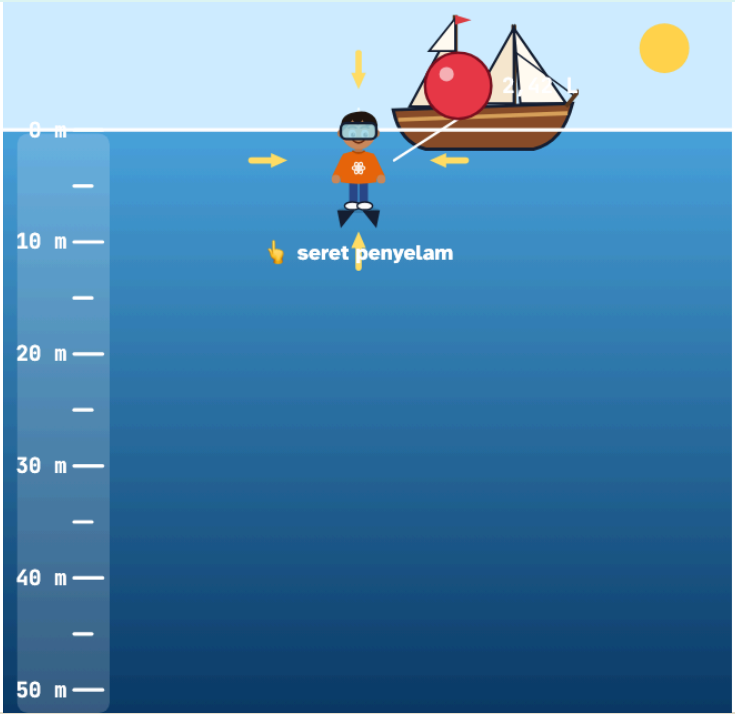
Cek satuan: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot \mathrm{m} = \frac{\mathrm{kg\,m/s^2}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{Pa}$

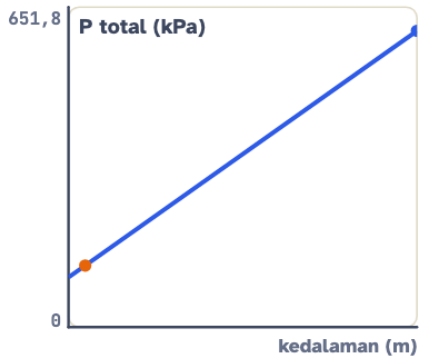
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-HIDROSTATIS

LAB MINI

Menyelam bersama Raka: tekanan vs kedalaman

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-13





$P = P_0 + \rho g h$

= 101,3 + 24,1 kPa

= 125,4 kPa ≈ 1,24 atm

ρ = 1.025 kg/m³

balon 3 L di permukaan → 2,42 L

tiap 10 m menambah 0,99 atm

Kedalaman	P hidrostatis	P total	Volume balon
2,4 m	24,1 kPa	1,24 atm	2,42 L

Atur kedalaman tujuan lalu tekan **Jalankan**, atau **seret penyelam** naik-turun. Perhatikan balon udara yang dibawanya: mengapa makin dalam makin kempis? Ganti fluidanya. Di "kolam raksa" khayalan, seberapa cepat tekanannya naik?

Tebak Dulu!

Tiga wadah berbeda bentuk (satu lebar seperti baskom, satu sempit seperti botol, satu melebar ke atas seperti corong terbalik) diisi air setinggi 30 cm. Di dasar wadah mana tekanan air paling besar?

- Baskom yang lebar, karena airnya paling banyak.
- Botol yang sempit, karena airnya terkumpul.
- Wadah yang melebar ke atas, karena air di pinggir ikut menekan.
- Sama besar di ketiganya.

Sama besar! Tekanan hidrostatis hanya bergantung pada kedalaman: $P_h = \rho g h$, dan h ketiganya sama 30 cm. Fakta yang mengejutkan ini disebut *paradoks hidrostatis*. Air "ekstra" di wadah lebar ditahan oleh dinding wadah, bukan oleh dasarnya.

TAMU DARI MASA LALU

Konon, Blaise Pascal (1623–1662) memasang pipa yang panjang dan sangat kurus tegak di atas tong kayu penuh air. Ia lalu menuang air ke pipa itu dari balkon lantai atas. Hanya beberapa gelas air, tetapi karena kolomnya sangat tinggi, tekanan di dalam tong melonjak dan tong pun pecah! Yang menentukan tekanan adalah **tinggi** kolom air, bukan banyaknya air.

AWAS JEBAKAN

Dalam $P_h = \rho g h$, h adalah **kedalaman dari permukaan**, bukan tinggi dari dasar. Ikan yang berenang 20 cm di atas dasar akuarium setinggi 50 cm berada pada kedalaman 30 cm.

FISIKA INDONESIA

Suku **Bajau** yang hidup di laut Sulawesi dan sekitarnya dikenal sebagai penyelam bebas yang luar biasa: mereka berburu ikan tanpa tabung udara hingga kedalaman puluhan meter. Penelitian tahun 2018 menemukan limpa orang Bajau rata-rata lebih besar daripada tetangga mereka yang bukan penyelam. Limpa yang besar membantu menyimpan sel darah merah kaya oksigen. Di kedalaman 20 m, tekanan total sudah ±3 kali tekanan di permukaan, sehingga paru-paru mengempis menjadi ±1/3 volumenya. Danau Toba, danau vulkanik terbesar di dunia, kedalamannya lebih dari 500 m; di dasarnya tekanan ±50 atmosfer. Itu pula sebabnya dinding bendungan seperti Jatiluhur dibuat jauh lebih tebal di bagian bawah.

13.3 Hukum Pascal: dongkrak dan rem hidraulik

Isi kantong plastik dengan air, ikat rapat, lalu tusuk beberapa lubang kecil. Jika kantong ditekan di satu tempat, air menyemprot dari **semua** lubang, ke segala arah. Tekanan yang kamu berikan diteruskan ke seluruh bagian zat cair.

Hukum Pascal. Tekanan yang diberikan pada zat cair dalam ruang tertutup diteruskan sama besar ke segala arah dan ke seluruh bagian zat cair.

Bayangkan dua tabung berisi oli yang dihubungkan, satu kecil (luas A_1) dan satu besar (A_2). Dorong piston kecil dengan gaya F_1. Tekanan F_1/A_1 diteruskan ke piston besar, sehingga piston besar terdorong dengan gaya $F_2 = PA_2$:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad \Longrightarrow \quad F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1}$$

RUMUS HIDUP **Dongkrak hidraulik**

$$F_2 = F_1 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

Diameter piston besar 10 kali piston kecil → luasnya 100 kali → gayanya 100 kali!

- F_1 Gaya pada piston kecil N
- d_1 Diameter piston kecil cm
- d_2 Diameter piston besar cm
- F_2 Gaya angkat piston besar N

GAYA ANGKAT PISTON BESAR

15.000

N

Dorongan **150** N pada piston berdiameter **2** cm menghasilkan gaya angkat **15.000** N pada piston berdiameter **20** cm.

Satuan Nusantara: ≈ 1,5 × berat mobil 1 ton · ≈ 31 × berat orang 50 kg · ≈ 61 × berat karung beras 25 kg

Cek satuan: Luas lingkaran $A = \frac{\pi}{4}d^2$, jadi $\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$. Satuan diameter apa pun boleh, asal sama.

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

LAB MINI

Bengkel hidraulik: angkat angkot dengan satu tangan

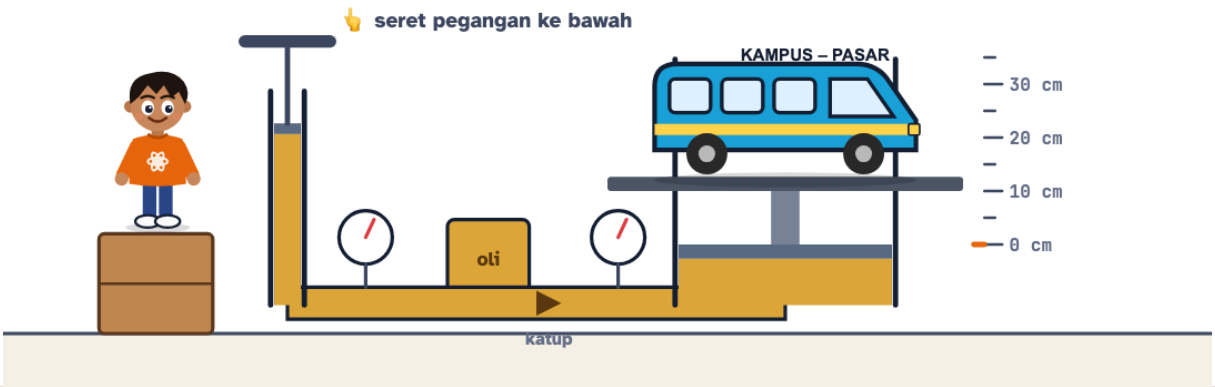
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-13

$F_1 = m\,g\,(d_1/d_2)^2 = 184$ N

Tekanan oli = 260 kPa (sama di kedua piston)

Gaya ×64, tetapi tiap pompa 12 cm hanya naik 0,188 cm

Usaha Raka 0 J = Ep angkot 0 J



Gaya Raka F_1	Tekanan oli	Angkot naik	Jumlah pompa	Usaha Raka	Ep angkot
184 N	260 kPa	0 cm	0	0 J	0 J

Seret pegangan piston kecil ke bawah berulang-ulang (atau tekan **Pompa**). Berapa gaya yang dibutuhkan Raka? Berapa kali harus memompa untuk mengangkat angkot 10 cm? Bandingkan usaha yang dikeluarkan Raka dengan energi potensial angkot. Coba juga piston kecil yang terlalu besar!

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Dongkrak hidraulik **melipatgandakan gaya, bukan energi**. Jika gaya dikali 64, piston kecil harus bergerak 64 kali lebih jauh daripada naiknya piston besar. Usaha masuk = usaha keluar ($F_1 s_1 = F_2 s_2$), seperti tuas dan katrol di Bab 8.

KERJAKAN BERSAMA **Dongkrak di tempat cuci mobil**

Pengangkat mobil hidraulik punya piston kecil berdiameter 4 cm dan piston besar berdiameter 32 cm. Mobil bermassa 1.280 kg ($g = 10$ m/s²). (a) Berapa gaya minimum pada piston kecil? (b) Agar mobil naik 5 cm, piston kecil harus turun berapa jauh?

1. Perbandingan luas: $\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{32}{4}\right)^2 = 64.$
2. Berat mobil: $F_2 = 1280 \times 10 = 12.800$ N, jadi $F_1 = 12.800/64 = 200$ N.
3. Volume oli yang berpindah sama: $A_1 s_1 = A_2 s_2$, sehingga $s_1 = 64 \times 5 = 320$ cm.

Cukup 200 N (seperti mengangkat karung beras 20 kg), tetapi piston kecil harus menempuh total 3,2 m. Karena itu dongkrak dipompa berkali-kali dengan katup satu arah.

TRIK KAK NARA: "UNTUNG DI GAYA, RUGI DI JARAK"

Semua pesawat sederhana (tuas, katrol, bidang miring, dan dongkrak hidraulik) mengikuti aturan yang sama: kalau gayamu dikali n, jarak tempuhmu juga dikali n. Energi tidak bisa digandakan. Kalau ada yang menawarkan alat "energi gratis", kamu sudah tahu jawabannya.

13.4 Tekanan udara, barometer, dan manometer

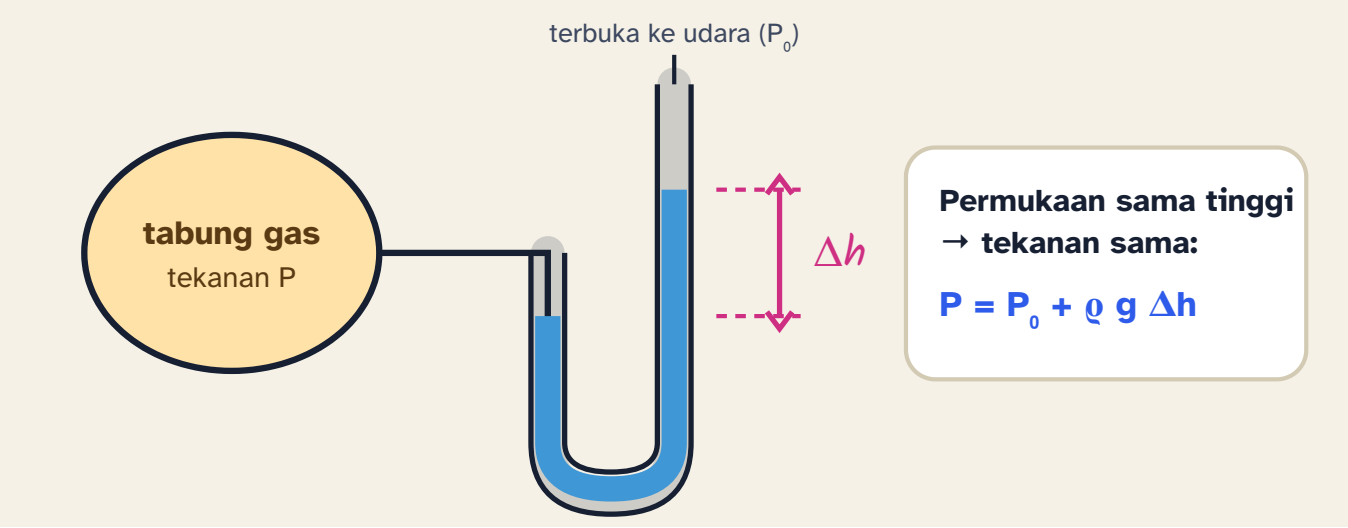
Kita hidup di dasar "lautan udara" setebal ratusan kilometer. Udara di atas kita menekan dengan tekanan ±101.300 Pa, yang disebut **1 atmosfer** (atm). Itu setara dengan berat ±10 ton pada setiap meter persegi! Kita tidak gepeng karena tekanan di dalam tubuh kita sama besar dan mendorong keluar.

TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1643, Evangelista Torricelli mengisi tabung kaca sepanjang ±1 m dengan raksa, lalu membaliknya ke dalam mangkuk raksa. Raksa turun dan berhenti pada ketinggian ±76 cm, menyisakan ruang hampa di atasnya. Yang menahan kolom raksa itu adalah tekanan udara yang menekan permukaan raksa di mangkuk. Itulah **barometer** pertama. Pada pertengahan tahun 1650-an, Otto von Guericke menyatukan dua belahan bola tembaga lalu menyedot udara di dalamnya. Dua tim kuda, masing-masing delapan ekor, tidak sanggup memisahkannya!

Dari $P_0 = \rho_{\text{raksa}}\, g\, h$: $13.600 \times 9{,}8 \times 0{,}76 \approx 101.300$ Pa. Karena itu tekanan udara sering ditulis **76 cmHg**. Jika barometernya memakai air (13,6 kali lebih ringan), tabungnya harus setinggi ±10,3 m!

Makin tinggi tempatnya, makin sedikit udara di atasnya, sehingga tekanan udara turun: sekitar 1 kPa setiap naik ±100 m di dekat permukaan laut. Di puncak Gunung Rinjani (3.726 m) tekanannya tinggal ±65 kPa. Air pun mendidih pada suhu lebih rendah, hanya ±88 °C, sehingga mi instan yang dimasak pendaki lebih lama matang.



Manometer pipa U: gas mendorong air di kaki kiri turun dan kaki kanan naik. Selisih tinggi Δh menunjukkan seberapa besar tekanan gas melebihi tekanan udara luar.

Pengukur tekanan ban di tambal ban menunjukkan **tekanan terukur** (*gauge pressure*), yaitu selisih terhadap tekanan udara luar. Ban motor yang "30 psi" (±207 kPa) sebenarnya bertekanan mutlak ±308 kPa.

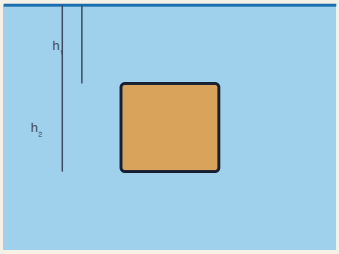
LANJUT · IB & OLIMPIADE

FLUIDA DI DALAM WADAH YANG DIPERCEPAT

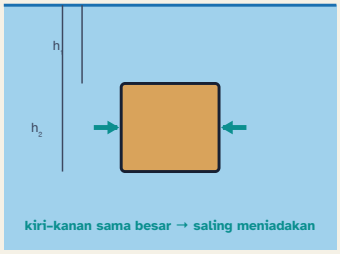
Di dalam lift yang dipercepat ke atas dengan a, air "terasa" lebih berat: $P = \rho(g + a)h$. Saat lift jatuh bebas ($a = -g$), tekanan hidrostatis lenyap, dan gaya apung pun hilang! Jika wadah dipercepat mendatar dengan a (misalnya ember air di bak truk yang mengerem), permukaan air miring dengan $\tan\theta = a/g$, sama seperti bandul di kaca spion pada Bab 6. Permukaan air selalu tegak lurus terhadap "gravitasi efektif" $g_{\text{ef}} = g - a$.

13.5 Hukum Archimedes: dorongan dari bawah

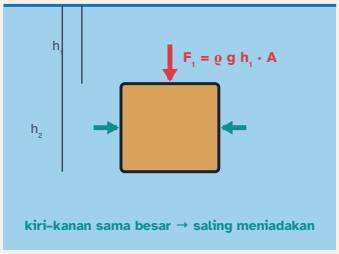
Mengangkat temanmu di kolam renang terasa jauh lebih ringan daripada di darat. Batu yang berat pun terasa ringan di dalam air. Ada gaya ke atas yang membantu: **gaya apung** (gaya Archimedes). Dari mana asalnya?



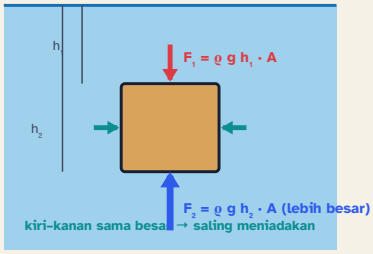
Langkah 1. Sebuah balok (luas alas A) tercelup penuh di air. Sisi atasnya pada kedalaman h_1, sisi bawahnya pada kedalaman h_2.



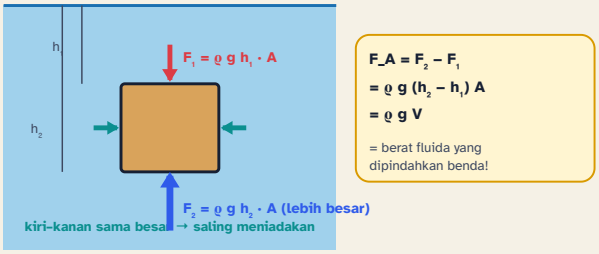
Langkah 2. Air menekan balok dari segala arah. Tekanan di sisi kiri dan kanan sama besar pada kedalaman yang sama, jadi gaya mendatarnya saling meniadakan.



Langkah 3. Di sisi atas, air menekan ke bawah dengan gaya $F_1 = \rho g h_1 A$.



Langkah 4. Di sisi bawah, yang lebih dalam, air menekan ke atas dengan gaya lebih besar: $F_2 = \rho g h_2 A$.



Langkah 5. Selisihnya mengarah ke atas: $F_A = \rho g(h_2 - h_1)A = \rho g V$. Itulah gaya apung. Besarnya sama dengan berat fluida yang volumenya sama dengan volume benda yang tercelup!

Hukum Archimedes. Benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya dalam fluida mendapat gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan: $F_A = \rho_f \, V_{\text{tercelup}} \, g$.

RUMUS HIDUP

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.

- ρ_f Massa jenis fluida kg/m³
- V Volume bagian tercelup L
- F_A Gaya apung N

GAYA APUNG

490

N

Benda yang mendesak **50** liter fluida bermassa jenis **1.000** kg/m³ didorong ke atas dengan gaya **490** N.

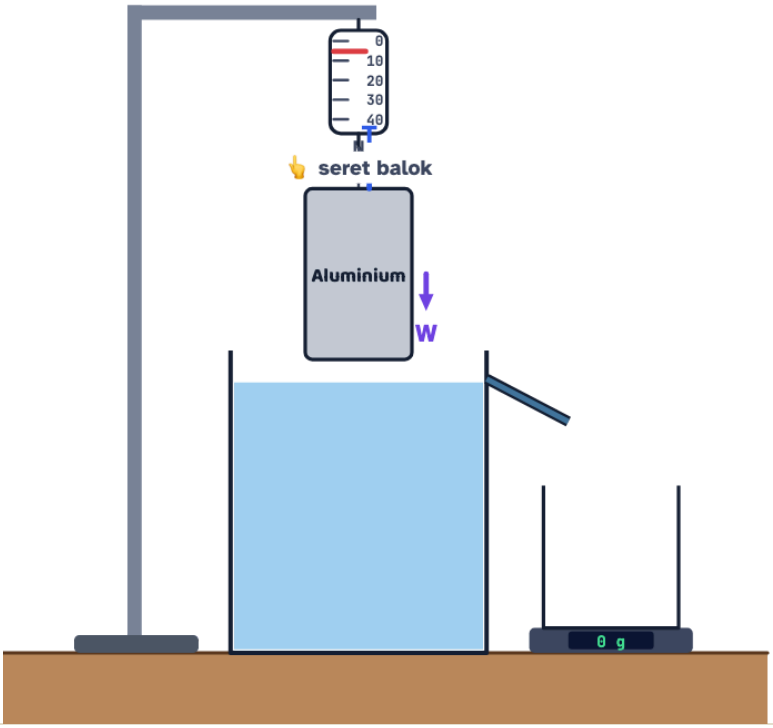
Satuan Nusantara: ≈ 1 × berat orang 50 kg · ≈ 2 × berat karung beras 25 kg · ≈ 5% dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot \mathrm{m}^3 \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = \mathrm{N}$. Ubah liter ke m³: bagi 1000.

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

LAB MINI Neraca Archimedes: timbang, celupkan, tampung!

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-13



Neraca pegas

Berat di udara W = 5,29 N

Angka neraca T = 5,29 N

Gaya apung F_A = W − T

= 0 N

Gelas penampung

Fluida tumpah: 0 g

Beratnya: 0 N

Belum ada yang tumpah

Massa jenis dari data celupkan penuh dulu...

Di udara

Berat di udara	Angka neraca	Gaya apung	Fluida tumpah	Keadaan
5,29 N	5,29 N	0 N	0 g	Di udara

Turunkan balok ke gelas berpancuran dengan slider atau dengan **menyeret balok**. Bandingkan berkurangnya angka neraca pegas dengan berat air yang tumpah ke gelas penampung. Lalu ganti bahan dan fluidanya: kapan balok mengapung? Kapan besi bisa mengapung?

TAMU DARI MASA LALU

Menurut cerita yang ditulis Vitruvius ±200 tahun kemudian, Raja Hiero dari Syracusa curiga mahkota emasnya dicampur perak. Archimedes (±287–212 SM) harus memeriksanya tanpa merusak mahkota. Saat masuk ke bak mandi, ia melihat air meluap, lalu sadar: volume benda bisa diukur dari air yang didesaknya! Konon ia berlari ke jalan sambil berteriak "*Eureka!*" ("Aku menemukannya!"). Cerita ini mungkin dibumbui, tetapi hukum yang kemudian ditulis Archimedes tentang benda terapung benar-benar ada dan masih kita pakai.

KERJAKAN BERSAMA **Mahkota asli atau palsu?**

Sebuah mahkota beratnya 9,65 N di udara dan 9,05 N saat tercelup penuh dalam air ($\rho_{\text{air}} = 1000$ kg/m³). Massa jenis emas 19.300 kg/m³. Apakah mahkota itu emas murni?

1. Gaya apung = berkurangnya berat: $F_A = 9{,}65 - 9{,}05 = 0{,}60$ N.
2. $F_A = \rho_{\text{air}} V g$, dan berat $W = \rho_{\text{mahkota}} V g$. Bagi keduanya: $\dfrac{\rho_{\text{mahkota}}}{\rho_{\text{air}}} = \dfrac{W}{F_A} = \dfrac{9{,}65}{0{,}60} \approx 16{,}1$.
3. $\rho_{\text{mahkota}} \approx 16.100$ kg/m³.

16.100 kg/m³ jauh di bawah 19.300 kg/m³, jadi mahkota itu bukan emas murni, kemungkinan dicampur logam yang lebih ringan seperti perak (10.500 kg/m³). Trik ini memungkinkan kita mengukur massa jenis tanpa menghitung volume secara langsung.

13.6 Mengapung, melayang, tenggelam

Benda yang dilepas di dalam fluida mengalami dua gaya: berat ke bawah dan gaya apung ke atas. Jika benda tercelup penuh, perbandingannya bergantung pada massa jenis:

Keadaan	Syarat	Contoh
Tenggelam	$\rho_{\text{benda}} > \rho_{\text{fluida}}$	paku, batu, koin di air
Melayang	$\rho_{\text{benda}} = \rho_{\text{fluida}}$	ikan dengan gelembung renang yang pas, kapal selam yang menyeimbangkan tangki
Mengapung	$\rho_{\text{benda}} < \rho_{\text{fluida}}$	kayu, es, pelampung; sebagian tercelup sampai $F_A = W$

Zat	Massa jenis (kg/m³)	Zat	Massa jenis (kg/m³)
Udara (permukaan laut)	±1,2	Air laut	±1.025
Kayu jati kering	±650	Air Laut Mati	±1.240
Minyak goreng	±920	Aluminium	2.700
Es	917	Besi/baja	±7.870

Air tawar	1.000	Raksa	13.600
Tubuh manusia (paru berisi udara)	±985	Emas	19.300

Benda yang mengapung tercelup sebagian, tepat sampai berat fluida yang didesaknya sama dengan beratnya sendiri. Dari $\rho_f V_c g = \rho_b V g$, bagian yang tercelup adalah

RUMUS HIDUP **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!

ρ_b Massa jenis benda kg/m³ | ρ_f Massa jenis fluida kg/m³ | V_c/V Bagian tercelup %

BAGIAN TERCELUP

89,5

%

Benda bermassa jenis **917** kg/m³ dalam fluida **1.025** kg/m³ tercelup **89,5**% dari volumenya. Jika hasilnya 100%, benda melayang atau tenggelam.

Cek satuan: Perbandingan dua massa jenis tidak bersatuan, lalu dikali 100%.

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

Rahasia kapal baja terjawab: kapal bukan bongkah baja pejal. Lambungnya berongga dan berisi udara, sehingga **massa jenis rata-ratanya** (massa total dibagi volume total kapal) lebih kecil daripada air. Lambung yang lebar mampu mendesak air dalam jumlah sangat banyak. Foil aluminium yang dibentuk menjadi perahu mengapung, tetapi foil yang sama jika dikepal menjadi bola padat akan tenggelam.

Tebak Dulu!

Es batu mengapung di gelas yang berisi air tepat sampai ke bibir gelas. Saat es mencair seluruhnya, apa yang terjadi?

Air tumpah, karena es berubah menjadi air.

Permukaan air turun, karena es lebih ringan dari air.

Permukaan air tetap tepat di bibir gelas.

Tergantung bentuk esnya.

Tetap! Es yang mengapung mendesak air seberat dirinya sendiri. Saat mencair, es berubah menjadi air yang beratnya sama, dan volumenya tepat sama dengan volume air yang tadinya didesak. Jadi air "mengisi lubang" yang dibuatnya sendiri. (Untuk es di air laut, cerita sedikit berbeda karena air lelehan es lebih tawar. Yang menaikkan permukaan laut adalah es di **daratan** yang mencair, seperti di Greenland dan Antartika.)

FISIKA INDONESIA

Pinisi, kapal layar kayu dari Sulawesi Selatan, dibuat oleh para pengrajin Bulukumba (terkenal di Tana Beru dan Bira) tanpa gambar teknik tertulis, mengandalkan pengetahuan turun-temurun. Seni pembuatan pinisi diakui UNESCO sebagai Warisan Budaya Takbenda pada tahun 2017. Para pembuat kapal tradisional ini paham benar soal daya apung dan keseimbangan: lambung yang lebar mendesak banyak air, dan muatan disusun rendah agar kapal stabil. Indonesia juga membangun kapal modern, termasuk kapal selam, di galangan kapal Surabaya. Kapal selam mengatur kedalamannya dengan mengisi atau mengosongkan **tangki pemberat** (*ballast*) dengan air laut, sehingga massa jenis rata-ratanya bisa lebih besar, sama, atau lebih kecil daripada air laut.

MITOS

"Benda yang berat pasti tenggelam, benda yang ringan pasti mengapung."

FAKTA

Yang menentukan adalah **massa jenis**, bukan berat. Kapal tanker ribuan ton mengapung, sedangkan sebutir pasir yang sangat ringan tenggelam.

MITOS

"Gaya apung makin besar jika benda makin dalam."

FAKTA

Setelah benda tercelup penuh, gaya apung **tidak** bertambah lagi (selama air tidak termampatkan). Tekanan atas dan bawah sama-sama naik, jadi selisihnya tetap. Yang berubah hanya ketika bagian tercelupnya bertambah.

MITOS

"Di Laut Mati kamu mengapung karena airnya 'ajaib'."

FAKTA

Air Laut Mati sangat asin, massa jenisnya ±1.240 kg/m^3, jauh di atas tubuh manusia (±985). Kamu hanya tercelup ±80% sehingga bisa mengapung sambil membaca buku.

13.7 Tegangan permukaan dan kapilaritas

Pernah melihat **anggang-anggang** (serangga yang "berjalan" di permukaan kolam atau sawah)? Kakinya hanya membuat lekukan kecil di permukaan air, seolah air dilapisi kulit tipis yang lentur. "Kulit" ini muncul karena molekul air saling tarik-menarik. Molekul di dalam air ditarik ke segala arah sama kuat, tetapi molekul di permukaan hanya ditarik ke samping dan ke bawah. Akibatnya, permukaan air cenderung mengerut sekecil mungkin, seperti selaput karet yang tegang. Sifat ini disebut **tegangan permukaan** γ, yaitu gaya per satuan panjang (N/m). Untuk air pada suhu kamar, $\gamma \approx 0{,}072$ N/m.

Karena tegangan permukaan, tetes air berbentuk bulat (bola adalah bentuk dengan permukaan terkecil), jarum baja yang diletakkan hati-hati bisa terapung, dan gelembung sabun bisa terbentuk. Sabun dan deterjen **menurunkan** tegangan permukaan, sehingga air lebih mudah membasahi kotoran.

Bahasa sederhana · Gampangnya: permukaan air seperti selaput karet yang sangat tipis. Serangga ringan bisa berdiri di atasnya tanpa tenggelam, asalkan selaputnya tidak robek.

Kapilaritas: air "memanjat" pipa sempit

Celupkan ujung tisu ke teh: teh merambat naik melawan gravitasi! Molekul air lebih kuat tertarik ke dinding (gaya **adhesi**) daripada ke sesamanya (gaya **kohesi**), sehingga air membasahi dinding, permukaannya melengkung

cekung (meniskus), lalu terangkat naik di celah atau pipa sempit. Peristiwa ini disebut **kapilaritas**. Raksa justru sebaliknya: kohesinya lebih kuat, permukaannya cembung dan turun di pipa sempit.

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r}$$

Di sini θ adalah sudut kontak (±0° untuk air pada kaca bersih) dan r jari-jari pipa. Makin sempit pipanya, makin tinggi air naik.

COBA SENDIRI **Air naik di sedotan sangat kecil**

Pipa kaca berjari-jari 0,5 mm dicelupkan tegak ke air ($\gamma = 0{,}072$ N/m, sudut kontak 0°, $g = 9{,}8$ m/s²). Setinggi apa air naik? Bagaimana jika jari-jarinya 0,05 mm?

1. $h = \dfrac{2 \times 0{,}072 \times 1}{1000 \times 9{,}8 \times 0{,}0005} = \dfrac{0{,}144}{4{,}9} \approx 0{,}029 \text{ m} \approx 2{,}9 \text{ cm}.$

2. Jari-jari 10 kali lebih kecil → h 10 kali lebih besar: ≈ 29 cm.

Pipa 0,5 mm: ±2,9 cm; pipa 0,05 mm: ±29 cm. Pori-pori batu bata dan tembok yang sangat halus bisa menyedot air tanah naik puluhan sentimeter, itulah penyebab dinding bagian bawah rumah sering lembap dan berjamur.

Dongkrak & lift bengkel

Bengkel mengangkat mobil dengan sistem hidraulik: tekanan oli yang sama bekerja pada piston besar (hukum Pascal).

Rem cakram motor

Tekanan dari tuas rem diteruskan minyak rem ke kaliper yang menjepit cakram. Gelembung udara di selang membuat rem "blong" karena udara mudah dimampatkan.

Infus di rumah sakit

Botol infus digantung tinggi agar tekanan hidrostatis cairannya lebih besar daripada tekanan darah di pembuluh vena.

Bendungan

Dinding bendungan dibuat makin tebal ke bawah karena tekanan air bertambah dengan kedalaman.

Sumbu kompor & pelita

Minyak tanah naik melalui celah-celah serat sumbu karena kapilaritas, lalu terbakar di ujungnya.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TEKANAN DI DALAM TETES DAN GELEMBUNG

Tegangan permukaan membuat tekanan di dalam tetes lebih besar daripada di luar: $\Delta P = \frac{2\gamma}{r}$. Gelembung sabun punya **dua** permukaan (dalam dan luar), sehingga $\Delta P = \frac{4\gamma}{r}$. Akibat yang mengejutkan: jika gelembung kecil dan gelembung besar dihubungkan pipa, udara mengalir dari gelembung **kecil** (tekanannya lebih besar) ke yang besar. Yang kecil makin kecil, yang besar makin besar! Rumus kenaikan kapiler juga bisa diturunkan dengan menyamakan gaya tegangan permukaan di keliling pipa, $2\pi r\gamma\cos\theta$, dengan berat kolom air $\rho\pi r^2 hg$.

Cek Cepat

Tekanan air di dasar kolam sedalam 2 m ($\rho = 1000$ kg/m³, $g = 10$ m/s²) adalah...

- 200 Pa
- 2.000 Pa
- 20.000 Pa
- 200.000 Pa

Dongkrak hidraulik dapat mengangkat mobil dengan gaya kecil karena...

- tekanan diteruskan sama besar, sedangkan luas piston besar jauh lebih besar
- oli menghasilkan energi tambahan
- gaya apung oli mengangkat mobil
- tekanan di piston besar lebih besar daripada di piston kecil

Sepotong kayu ($\rho = 600$ kg/m³) mengapung di air tawar. Bagian kayu yang tercelup adalah...

- 40%
- 100%
- 0%
- 60%

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: penyelam di dalam botol

Bahan: botol plastik bening 1,5 L dengan tutupnya, tutup pulpen (tanpa klip), sedikit plastisin, gelas berisi air

1. Tutup lubang kecil di ujung atas tutup pulpen dengan plastisin. Tempelkan sedikit plastisin di tepi bagian bawah (mulut) tutup pulpen sebagai pemberat, tanpa menutup lubangnya.
2. Uji di gelas air: atur banyaknya plastisin sampai tutup pulpen **baru saja** mengapung, dengan sedikit udara terperangkap di dalamnya.
3. Isi botol penuh dengan air, masukkan "penyelam", lalu tutup botol rapat-rapat.
4. Remas botol: penyelam tenggelam! Lepaskan: ia naik lagi. Coba remas pelan-pelan sampai ia melayang di tengah.

Pertanyaan: Perhatikan gelembung udara di dalam tutup pulpen saat botol diremas. Jelaskan gerak penyelam dengan tiga hukum: hukum Pascal (tekanan remasan diteruskan), tekanan pada udara yang terperangkap, dan hukum Archimedes (berapa air yang didesak penyelam).

RINGKASAN KILAT

Bab 13 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menghitung **tekanan** $P = F/A$ dan menjelaskan mengapa pisau tajam mudah memotong
- menghitung **tekanan hidrostatis** dan tekanan total di kedalaman tertentu
- menerapkan **hukum Pascal** pada dongkrak dan rem hidraulik
- menjelaskan **tekanan udara**, barometer, dan manometer
- memakai **hukum Archimedes** untuk menentukan benda mengapung, melayang, atau tenggelam, serta menjelaskan **tegangan permukaan** dan **kapilaritas**

Istilah kunci

tekanan · tekanan hidrostatis · gaya apung · tegangan permukaan · kapilaritas

Rumus penting

$$P = \frac{F}{A}$$

Tekanan. Gaya yang sama terasa jauh lebih 'menusuk' jika bidang tekannya kecil.

$$P_h = \rho\, g\, h$$

Tekanan hidrostatis. Tekanan zat cair = massa jenis × gravitasi × kedalaman. Di air laut, setiap 10 m menambah ±1 atmosfer.

$$F_2 = F_1 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

Dongkrak hidraulik. Diameter piston besar 10 kali piston kecil → luasnya 100 kali → gayanya 100 kali!

$$F_A = \rho_f V g$$

Gaya apung (gaya Archimedes). Gaya apung = berat fluida yang 'didesak' benda. Fluida makin rapat atau bagian tercelup makin besar → dorongan makin kuat.

$$\frac{V_c}{V} = \frac{\rho_b}{\rho_f}$$

Bagian benda terapung yang tercelup. Persentase yang tenggelam = massa jenis benda dibagi massa jenis fluida. Gunung es di laut: ±90% tersembunyi di bawah air!

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Dalam $P_h = \rho g h$, h adalah kedalaman dari permukaan, bukan tinggi dari dasar.
- Dongkrak hidraulik melipatgandakan gaya, bukan energi.

⛰️ 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=13

🧩 Teka-teki untuk Bab 14

Sepanjang bab ini, fluidanya selalu **diam**. Sekarang buka keran selang lalu pencet ujungnya dengan jempol: air memancar jauh lebih kencang dan jauh, padahal kerannya tidak diputar lebih besar. Dari mana "tenaga tambahan" itu? Dan mengapa selembar kertas yang ditiup di atasnya justru terangkat naik, bukan tertekan turun?

▼ **Intip petunjuk**

Banyaknya air yang keluar setiap detik tetap sama. Jika lubangnya dipersempit, air harus bergerak lebih cepat untuk "mengejar setoran". Dan ternyata, fluida yang bergerak lebih cepat tekanannya lebih kecil. Inilah persamaan kontinuitas dan asas Bernoulli di Bab 14: Fluida Dinamis.

BAB 14 · FLUIDA & PANAS

14 Fluida Dinamis: Saat Air dan Udara Bergerak

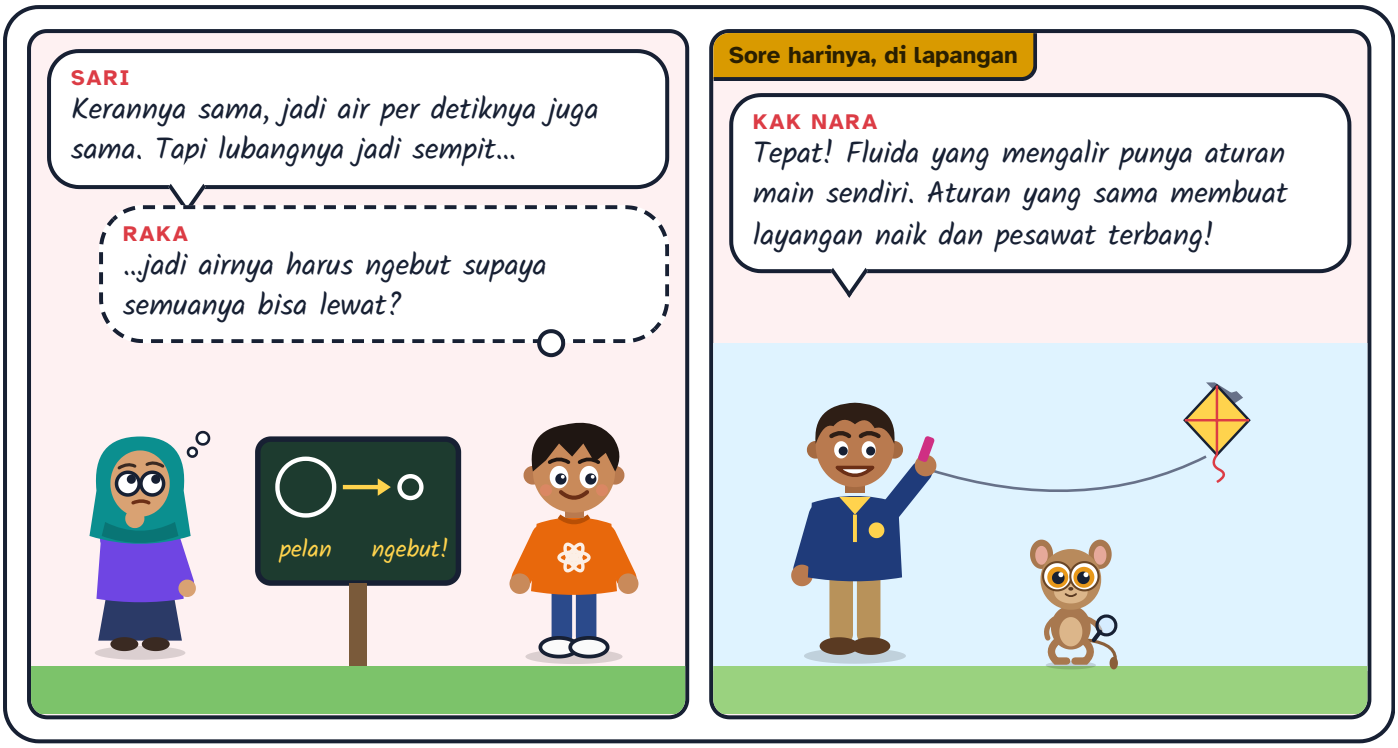
Kenapa air selang muncrat jauh saat ujungnya dipencet? Bagaimana pesawat seberat puluhan ton bisa melayang? Fluida yang mengalir punya aturan main yang ternyata sederhana dan indah.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **debit** $Q = Av$ dan memakai **persamaan kontinuitas** $A_1 v_1 = A_2 v_2$;
- menjelaskan **hukum Bernoulli**: di tempat aliran lebih cepat, tekanannya lebih kecil, dan tahu *mengapa*;
- menghitung kecepatan pancaran **Torricelli** $v = \sqrt{2gh}$ dan jarak jatuhnya;
- menjelaskan venturimeter, tabung pitot, dan **gaya angkat sayap** dengan benar, tanpa mitos "waktu tempuh sama";
- memakai **viskositas**, hukum Stokes, dan **kecepatan terminal** untuk kelereng, butir awan, dan penerjun payung.

SELANG AJAIB RAKA

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Anggap keran mengalirkan jumlah air per detik yang tetap. Jika ujung selang dipencet sehingga luas lubangnya tinggal seperempat, berapa kali kecepatan air yang keluar?

- Seperempatnya, karena lubangnya lebih kecil.
- Sama saja, karena kerannya tidak diubah.
- Empat kali lebih cepat.
- Enam belas kali lebih cepat.

Jawabannya: empat kali. Air tidak bisa dimampatkan dan tidak menumpuk di dalam selang, jadi volume yang keluar tiap detik harus sama dengan yang masuk. Lubang ¼ kali luasnya hanya bisa meloloskan volume yang sama jika airnya melaju 4 kali lebih cepat. (Di dunia nyata, memencet terlalu kuat juga sedikit mengurangi aliran dari keran, karena tekanan keran terbatas. Tetapi air tetap jauh lebih cepat.)

14.1 Fluida ideal dan debit

Air keran, angin sepoi-sepoi, darah di pembuluhmu, asap obat nyamuk: semuanya **fluida**, yaitu zat yang dapat **mengalir**. Zat cair dan gas termasuk fluida. Di Bab 13 kita mempelajari fluida yang diam. Sekarang fluidanya bergerak!

Aliran fluida sungguhan bisa sangat rumit: bergolak, berpusar, dan bergesekan. Supaya bisa dihitung, fisikawan memulai dari model sederhana bernama **fluida ideal**, dengan empat sifat:

- **tak termampatkan** (*inkompresibel*): volumenya tidak berubah walaupun ditekan;
- **tak kental** (tanpa viskositas): tidak ada gesekan antarlapisan fluida;
- **alirannya tunak** (*stasioner*): kecepatan di satu titik tetap dari waktu ke waktu;
- **tak berpusar**: partikel fluida tidak berputar-putar di tempat.

Lintasan yang dilalui partikel fluida digambar sebagai **garis arus**. Pada aliran **laminer**, garis-garis arus rapi berlapis seperti lembaran kertas. Pada aliran **turbulen**, alirannya bergolak dan berpusar. Lihat asap obat nyamuk bakar: mula-mula naik lurus mulus, lalu tiba-tiba bergulung-gulung.

Kiri: asap obat nyamuk bakar memperlihatkan aliran laminer yang berubah menjadi turbulen. Kanan: garis arus dalam aliran laminer.

Debit: berapa banyak yang lewat tiap detik?

Debit Q adalah volume fluida yang melewati suatu penampang tiap satuan waktu: $Q = V/t$. Satuannya m³/s, atau liter per detik (L/s) untuk aliran kecil. Ingat: $1\ \mathrm{m}^3 = 1000$ L.

Bayangkan air melaju dengan kecepatan v dalam pipa berpenampang A. Dalam waktu t, "silinder air" sepanjang vt melewati penampang itu. Volumenya $V = A \cdot vt$. Jadi:

$$Q = \frac{V}{t} = A\,v$$

RUMUS HIDUP **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.

d Diameter pipa cm | v Kelajuan aliran m/s | Q Debit L/s

DEBIT
0,314
L/s

Pipa berdiameter **2** cm dengan air melaju **1** m/s mengalirkan **0,314** liter tiap detik. Ember 10 liter akan penuh dalam (10 ÷ debit) detik.

Cek satuan: $\mathrm{m}^2 \times \mathrm{m/s} = \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$, lalu $1\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s} = 1000\ \mathrm{L/s}$. Diameter dalam cm dibagi 100 dulu menjadi meter.

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

Aliran	Debit (perkiraan)
Keran wastafel	0,1–0,2 L/s
Selang pemadam kebakaran	±5–15 L/s
Sungai Ciliwung saat normal	beberapa sampai puluhan m^3/s
Sungai Ciliwung saat banjir besar	bisa beberapa ratus m^3/s
Sungai Amazon (rata-rata)	±200.000 m^3/s

Bahasa sederhana · Gampangnya: **debit = berapa liter air lewat tiap detik**. Kalau ember 10 liter penuh dalam 50 detik, debit keranmu $10 \div 50 = 0{,}2$ liter per detik.

CONTOH **Mengisi bak mandi**

Bak mandi bervolume 120 liter diisi dari keran dan penuh dalam 10 menit. Berapa debit keran dalam L/s dan dalam m³/s?

1. Ubah waktu: $10 \text{ menit} = 600 \text{ s}$.
2. $Q = \frac{V}{t} = \frac{120 \text{ L}}{600 \text{ s}} = 0{,}2$ L/s.
3. Karena $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$: $Q = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Debit keran 0,2 L/s $= 2 \times 10^{-4}$ m³/s. Setiap 5 detik, satu liter air masuk ke bak.

FISIKA INDONESIA: SUBAK, PEMBAGI DEBIT DARI BALI

Sejak sekitar seribu tahun lalu, petani Bali mengatur air sawah lewat sistem **subak**, yang diakui UNESCO sebagai Warisan Budaya Dunia (2012). Air dari bendung dialirkan ke saluran-saluran, lalu dibagi dengan bangunan pembagi yang lebar celahnya disesuaikan dengan luas sawah tiap kelompok. Celah yang dua kali lebih lebar meloloskan kira-kira dua kali debit. Inilah fisika debit yang dipakai untuk keadilan!

14.2 Persamaan kontinuitas: sempit berarti ngebut

Air dalam pipa yang penuh tidak bisa dimampatkan dan tidak bisa menumpuk di satu tempat. Akibatnya, setiap liter yang masuk di ujung kiri harus diimbangi satu liter yang keluar di ujung kanan, pada detik yang sama. Debit di semua penampang pipa **sama**:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Inilah **persamaan kontinuitas**. Jika penampangnya mengecil, kelajuannya harus membesar dengan perbandingan yang sama. Untuk pipa berpenampang lingkaran, $A = \frac{1}{4}\pi d^2$, sehingga $v_1 d_1^2 = v_2 d_2^2$. Diameter dijadikan setengahnya, luasnya tinggal seperempat, dan airnya melaju **empat kali** lebih cepat.

RUMUS HIDUP

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.

- v_1 Kelajuan di bagian lebar m/s
- d_1 Diameter bagian lebar cm
- d_2 Diameter bagian sempit cm
- v_2 Kelajuan di bagian sempit m/s

KELAJUAN DI BAGIAN SEMPIT

8

m/s

Air **0,5** m/s di selang **2** cm keluar dari lubang **0,5** cm dengan kelajuan **8** m/s.

Satuan Nusantara: ≈ 73% dari ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 5,7 × jalan kaki santai · ≈ 8% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: Perbandingan d_1/d_2 tidak bersatuan, jadi satuan v_2 sama dengan v_1 (m/s). Diameter cukup ditulis dalam satuan yang sama (cm dengan cm).

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

✏️

TRIK KAK NARA: "AIR BERIAK TANDA TAK DALAM"

Peribahasa ini ternyata fisika! Di bagian sungai yang dangkal dan sempit, penampang alirannya kecil, sehingga airnya harus lebih deras dan permukaannya beriak. Di bagian yang lebar dan dalam, arusnya lebih tenang. Ingat rumus kecilnya: **A kecil ↔ v besar**.

KERJAKAN BERSAMA **Selang dipencet jempol**

Selang berdiameter 2 cm mengalirkan air dengan kelajuan 0,5 m/s. Raka memencet ujungnya sehingga lubangnya tinggal berdiameter 0,5 cm. (a) Berapa debit selang? (b) Berapa kelajuan air yang keluar?

1. Luas selang: $A_1 = \frac{1}{4}\pi(0{,}02)^2 = 3{,}14 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}^2$.
2. (a) $Q = A_1 v_1 = 3{,}14 \times 10^{-4} \times 0{,}5 = 1{,}57 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s} \approx 0{,}16$ L/s.
3. (b) Kontinuitas: $v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 0{,}5 \times \left(\frac{2}{0{,}5}\right)^2 = 0{,}5 \times 16 = 8$ m/s.

Debit ±0,16 L/s dan air keluar 8 m/s, enam belas kali lebih cepat, karena diameternya menjadi seperempat (luasnya $\frac{1}{16}$).

⚠ **AWAS JEBAKAN**

Bagian pipa yang sempit **tidak** mengurangi debit pada aliran tunak. Kalau debit di bagian sempit lebih kecil, air akan menumpuk di depannya, padahal air tidak bisa dimampatkan. Yang berubah adalah **kelajuannya**, bukan banyaknya air per detik. Dan perhatikan: kelajuan berbanding terbalik dengan **kuadrat** diameter, bukan diameternya saja.

ID **FISIKA INDONESIA: BANJIR DAN PENAMPANG SUNGAI**

Setelah hujan deras di hulu, debit Ciliwung bisa melonjak berlipat-lipat. Pos pantau seperti Bendung Katulampa di Bogor mencatat tinggi muka air dan memberi peringatan dini ke Jakarta beberapa jam sebelum air tiba. Jika penampang sungai menyempit karena sampah dan bangunan di bantaran, sungai tidak mampu mengalirkan debit sebesar itu. Air pun "mencari penampang tambahan": muka air naik dan meluap ke permukiman.

14.3 Hukum Bernoulli: ngebut berarti tekanannya kecil

Air dipercepat saat masuk ke bagian pipa yang sempit. Menurut Hukum II Newton, percepatan butuh gaya total. Siapa yang mendorong air itu? Jawabannya: **selisih tekanan**. Tekanan di belakang (bagian lebar) harus *lebih besar* daripada tekanan di depan (bagian sempit), sehingga air terdorong maju dan makin cepat.

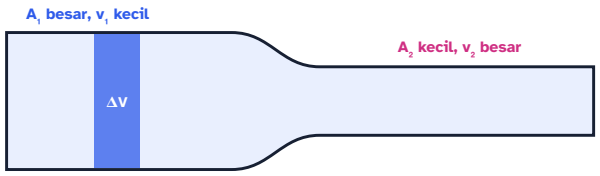
Kesimpulannya mengejutkan: **di tempat aliran lebih cepat, tekanannya lebih kecil.**

Daniel Bernoulli merumuskannya sebagai hukum kekekalan energi untuk fluida. Untuk setiap meter kubik fluida yang mengalir sepanjang garis arus:

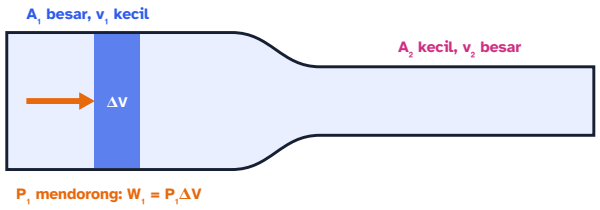
$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{tetap}$$

Suku	Arti fisis	Satuan
P	tekanan: "energi dorong" tiap m³ fluida	Pa = J/m³
$\frac{1}{2}\rho v^2$	energi kinetik tiap m³ fluida	J/m³
$\rho g h$	energi potensial tiap m³ fluida	J/m³

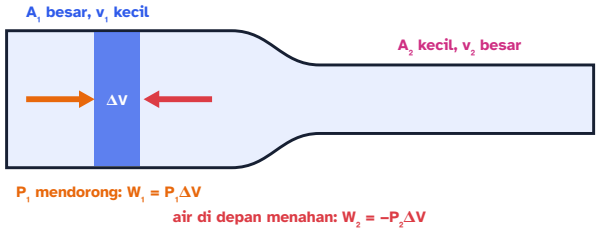
Jumlah ketiganya seperti uang saku yang harus tetap. Jika "uang" energi kinetik bertambah (air ngebut), "uang" tekanan harus berkurang. Jika fluida naik lebih tinggi, tekanan atau kelajuannya juga harus "membayar".



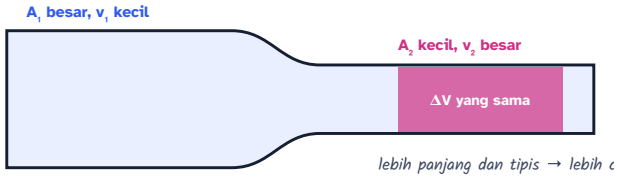
Langkah 1. Pipa mendatar: kiri lebar (A_1), kanan sempit (A_2). Kita ikuti satu "paket" air bervolume ΔV (biru tua).



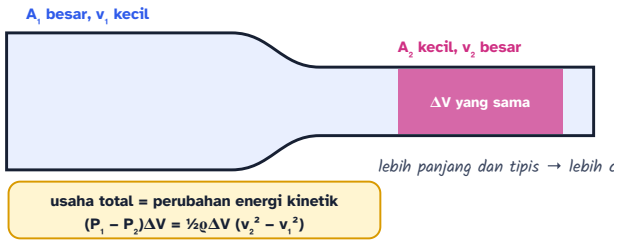
Langkah 2. Air di belakang paket menekan dengan tekanan P_1. Gaya $P_1 A_1$ mendorong paket sejauh Δx_1, sehingga usahanya $W_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1\, \Delta V$.



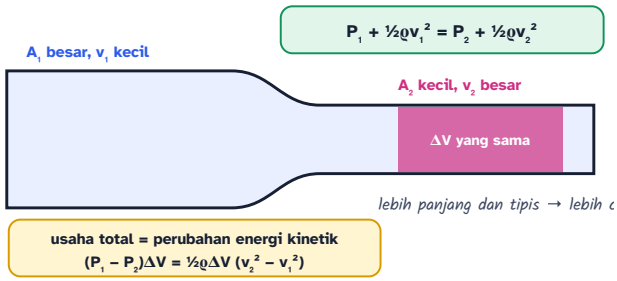
Langkah 3. Air di depan menahan dengan tekanan P_2. Usaha yang "dicuri" darinya adalah $W_2 = -P_2\, \Delta V$.



Langkah 4. Paket yang sama kini berada di bagian sempit. Volumenya tetap (air tak termampatkan), tetapi bentuknya panjang dan tipis, dan ia bergerak lebih cepat (kontinuitas).



Langkah 5. Teorema usaha–energi (Bab 8): usaha total = perubahan energi kinetik, yaitu $(P_1 - P_2)\Delta V = \frac{1}{2}\rho\, \Delta V\, (v_2^2 - v_1^2)$.



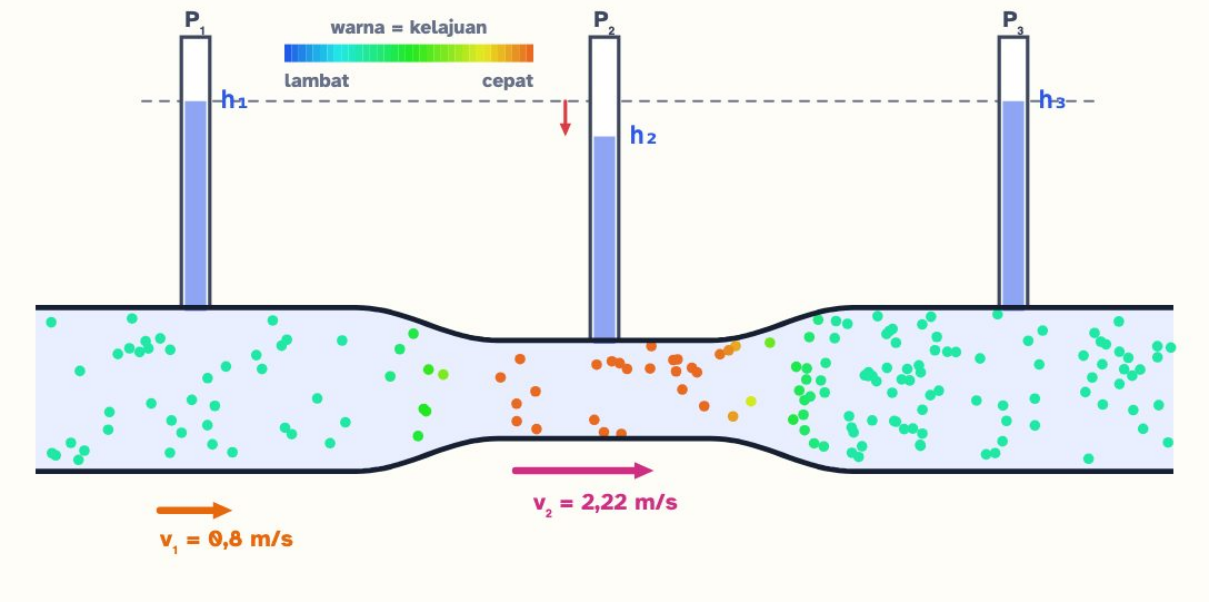
Langkah 6. Bagi dengan ΔV lalu susun ulang: $P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$. Jika ketinggian juga berubah, tambahkan usaha gravitasi $\rho g h$. Itulah **hukum Bernoulli**!

AWAS JEBAKAN: "TERJEPIT = TEKANAN BESAR"

Banyak orang mengira air di bagian pipa yang sempit tekanannya *lebih besar* karena "terjepit". Justru sebaliknya! Di bagian sempit air melaju lebih cepat, dan agar bisa dipercepat ke sana, tekanannya harus **lebih kecil**. Semprotan selang terasa keras karena airnya *cepat* (momentumnya besar), bukan karena tekanan statisnya besar.

LAB MINI **Pipa menyempit: lacak kelajuan dan tekanannya**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-14



v_1 (lebar)	v_2 (leher)	$P_1 - P_2$	Debit (pipa 5 cm)
0,8 m/s	2,22 m/s	2,15 kPa	1,57 L/s

Keadaan
Leher: cepat & tekanan rendah

Titik-titik adalah partikel air, warnanya menunjukkan kelajuan. Tiga tabung tegak adalah **manometer**: makin tinggi kolom airnya, makin besar tekanannya. Persempit lehernya. Tabung mana yang turun? Coba juga sakelar **fluida kental**: lihat profil kelajuannya dan tabung ketiga.

TRIK KAK NARA: "NGEBUT = NGEMPIS"

Fluida yang **ngebut**, tekanannya **ngempis**. Tetapi ingat urutan sebab-akibatnya: fluida mengalir *dari* tekanan tinggi *ke* tekanan rendah. Selisih tekanan itulah yang membuatnya ngebut.

TAMU DARI MASA LALU

Daniel Bernoulli (1700–1782) berasal dari keluarga ahli matematika Swiss yang terkenal sekaligus suka bersaing. Ia menerbitkan buku *Hydrodynamica* pada 1738. Konon ayahnya, Johann Bernoulli, iri lalu menerbitkan buku serupa yang tanggalnya dibuat lebih awal! Persamaan "Bernoulli" dalam bentuk yang kita pakai sekarang dirapikan oleh sahabat Daniel, Leonhard Euler.

MITOS

"Air di bagian pipa yang sempit tekanannya paling besar, karena terjepit."

FAKTA

Di bagian sempit air bergerak paling cepat, dan tekanannya justru **paling kecil**. Fluida dipercepat dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Manometer di leher pipa menunjukkan kolom air yang paling rendah.

MITOS

"Bernoulli hanya berlaku untuk air."

FAKTA

Hukum Bernoulli berlaku untuk zat cair **dan** gas, selama kelajuannya jauh di bawah kelajuan bunyi (udara masih bisa dianggap tak termampatkan), gesekannya kecil, dan kita mengikuti satu garis arus.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KAPAN BERNOULLI BOLEH DIPAKAI?

Persamaan $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{tetap}$ adalah integral Hukum II Newton sepanjang satu garis arus untuk fluida yang (1) tunak, (2) tak kental, dan (3) tak termampatkan. Untuk udara, syarat (3) cukup baik selama kelajuan di bawah ±0,3 kali kelajuan bunyi (±100 m/s). Jika alirannya juga tak berpusar, konstanta itu sama untuk *semua* garis arus. Satu catatan halus: semburan bebas yang keluar ke udara terbuka bertekanan sama dengan udara sekitarnya, jadi jangan menebak "tekanan rendah" hanya karena udaranya cepat. Pakai Bernoulli pada titik-titik yang terhubung oleh satu garis arus.

14.4 Teorema Torricelli: tandon yang bocor

Tandon air (toren) di atap rumah bocor kecil di dindingnya. Seberapa kencang air memancar? Pakai Bernoulli pada dua titik: **permukaan air** (titik 1) dan **lubang** (titik 2), yang berada h meter di bawah permukaan.

- Keduanya terbuka ke udara, jadi $P_1 = P_2 = P_{\text{udara}}$.
- Tandon jauh lebih lebar daripada lubang, jadi permukaan air turun sangat pelan: $v_1 \approx 0$.

Bernoulli menjadi $P_{\text{udara}} + \rho g h = P_{\text{udara}} + \frac{1}{2}\rho v^2$, sehingga:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Ini persis kelajuan batu yang **jatuh bebas** dari ketinggian h! Air yang keluar dari lubang seolah-olah "jatuh" dari permukaan air ke lubang. Hasil ini disebut **teorema Torricelli**.

RUMUS HIDUP **Teorema Torricelli**

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

Kelajuan pancaran sama dengan kelajuan benda yang jatuh bebas dari permukaan air ke lubang.

h Kedalaman lubang di bawah permukaan air m

v Kelajuan pancaran m/s

KELAJUAN PANCARAN

3,96

m/s

Lubang **0,8** m di bawah permukaan memancarkan air **3,96** m/s, sama cepatnya dengan batu yang dijatuhkan dari ketinggian **0,8** m.

Satuan Nusantara: ≈ 36% dari ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 2,8 × jalan kaki santai · ≈ 4% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\sqrt{\mathrm{m/s^2} \times \mathrm{m}} = \sqrt{\mathrm{m^2/s^2}} = \mathrm{m/s}$. Massa jenis air tidak muncul: minyak atau air raksa memancar sama cepatnya!

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

Setelah keluar, air bergerak seperti peluru yang ditembakkan mendatar (Bab 5). Jika lubang berada y meter di atas tanah, waktu jatuhnya $t = \sqrt{2y/g}$, sehingga jarak mendatar pancaran adalah

$$x = v\,t = \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{\frac{2y}{g}} = 2\sqrt{h\,y}$$

Tebak Dulu!

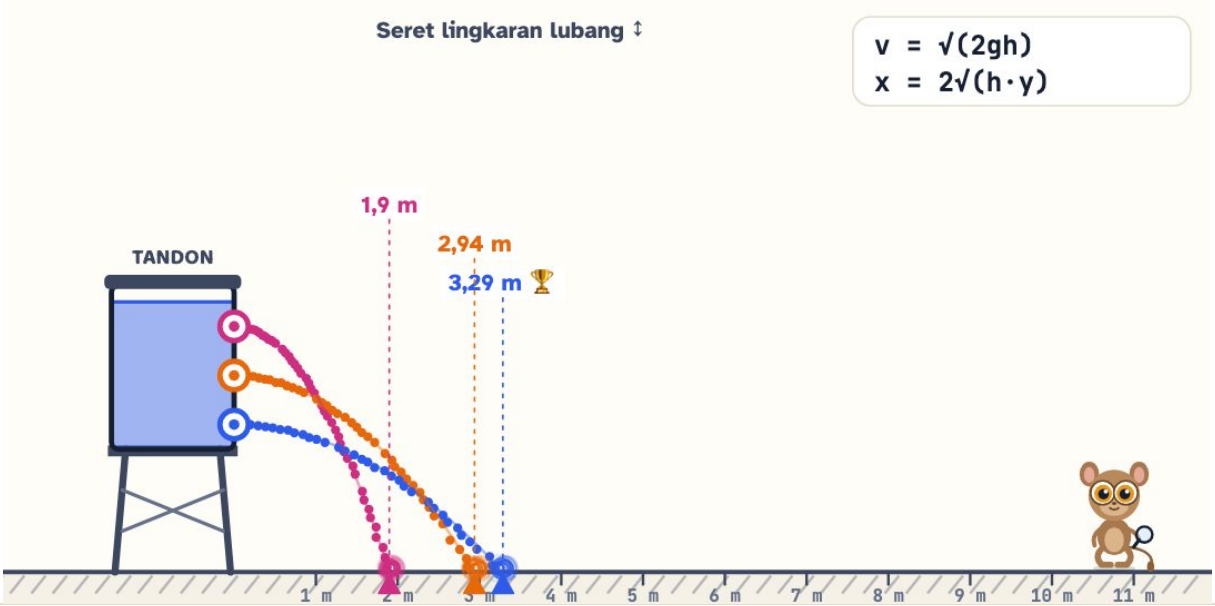
Sebuah drum berdiri di tanah, penuh air. Ada tiga lubang di dindingnya: dekat dasar, di tengah, dan dekat permukaan. Pancaran dari lubang mana yang mendarat paling jauh?

- Lubang dekat dasar, karena airnya paling deras.
- Lubang di tengah.
- Lubang dekat permukaan, karena jatuhnya paling tinggi.
- Ketiganya mendarat di titik yang sama.

Jawabannya: lubang di tengah. Lubang bawah memang paling deras, tetapi terlalu dekat dengan tanah sehingga airnya cepat mendarat. Lubang atas punya waktu jatuh paling lama, tetapi pancarannya lemah. Jarak $x = 2\sqrt{h\,y}$ paling besar jika kedalaman h sama dengan tinggi lubang di atas tanah y, yaitu lubang tepat di tengah kolom air. Buktikan dengan lab di bawah!

LAB MINI Tandon bocor: adu jauh tiga pancaran

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-14



Lubang biru	Lubang oranye
5,42 m/s · jarak 3,29 m	4,2 m/s · jarak 2,94 m

Lubang magenta	Tinggi air
2,42 m/s · jarak 1,9 m	1,8 m

Seret lingkaran lubang naik-turun di dinding tandon. Atur tinggi menara dan tinggi air. Lubang mana yang memancar paling jauh? Nyalakan **"biarkan tandon mengering"** untuk melihat pancaran makin lemah saat permukaan air turun.

CONTOH Kelajuan air dari lubang

Sebuah ember berlubang kecil 20 cm di bawah permukaan airnya. Dengan $g = 10$ m/s², berapa kelajuan air yang memancar?

1. $h = 20$ cm $= 0{,}2$ m.
2. $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 0{,}2} = \sqrt{4} = 2$ m/s.

Air memancar 2 m/s, sama dengan kelajuan kelereng yang dijatuhkan dari ketinggian 20 cm.

COBA SENDIRI **Toren di atas menara**

Toren air berdiri di atas menara. Sebuah lubang bocor berada 0,8 m di bawah permukaan air dan 5 m di atas tanah. Dengan $g = 10$ m/s², di mana air mendarat, diukur mendatar dari dinding toren?

1. Kelajuan pancaran: $v = \sqrt{2 \times 10 \times 0{,}8} = \sqrt{16} = 4$ m/s, arahnya mendatar.
2. Waktu jatuh dari 5 m: $t = \sqrt{2y/g} = \sqrt{2 \times 5/10} = 1$ s.
3. Jarak mendatar: $x = vt = 4 \times 1 = 4$ m. Cek dengan rumus cepat: $x = 2\sqrt{hy} = 2\sqrt{0{,}8 \times 5} = 2\sqrt{4} = 4$ m. ✓

Air mendarat 4 m dari dinding toren. Perhatikan: tinggi menara membuat pancaran lemah pun bisa mendarat jauh.

FISIKA INDONESIA: KENAPA TOREN DIPASANG TINGGI?

Banyak rumah di Indonesia memompa air ke toren di atap atau di atas menara besi. Dari sana, air mengalir sendiri ke keran tanpa pompa. Makin tinggi toren di atas keran, makin besar tekanan air di keran ($\rho g h$, Bab 13) dan makin deras pancarannya ($\sqrt{2gh}$). Toren 4 m di atas keran memberi pancaran maksimal sekitar 9 m/s, jika gesekan pipa diabaikan.

TAMU DARI MASA LALU

Evangelista Torricelli (1608–1647) adalah murid Galileo. Pada 1643 ia menemukan barometer air raksa (Bab 13). Pada masa yang sama ia menemukan bahwa air yang keluar dari lubang wadah bergerak seperti benda jatuh bebas, hampir satu abad sebelum Bernoulli menuliskan persamaannya.

14.5 Venturimeter dan tabung pitot: mengukur kelajuan dengan tekanan

Bagaimana cara mengukur kelajuan air di dalam pipa tanpa memotong pipanya? Pasang leher sempit dan dua tabung manometer. Alat ini disebut **venturimeter**. Di leher, air lebih cepat dan tekanannya lebih kecil, sehingga kolom air di tabung leher lebih rendah. Beda tinggi Δh itu bisa diubah menjadi kelajuan.

Gabungkan Bernoulli dan kontinuitas: $P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$ dengan $v_2 = v_1(A_1/A_2)$. Selisih tekanan dibaca dari manometer, $P_1 - P_2 = \rho g \Delta h$. Hasilnya:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\,\Delta h}{(A_1/A_2)^2 - 1}}$$

RUMUS HIDUP **Venturimeter tanpa raksa**

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\,\Delta h}{n^2 - 1}}, \qquad n = \frac{A_1}{A_2}$$

Beda tinggi air di dua tabung manometer → kelajuan air di bagian pipa yang lebar.

Δh Beda tinggi kolom manometer cm

n Perbandingan luas A_1/A_2 ×

v_1 Kelajuan di bagian lebar m/s

KELAJUAN DI BAGIAN LEBAR

0,99

m/s

Beda tinggi **15** cm dengan leher **2** kali lebih sempit berarti air di pipa besar melaju **0,99** m/s.

Cek satuan: Δh dalam cm dibagi 100 menjadi meter. $\sqrt{\mathrm{m/s^2 \cdot m}} = \mathrm{m/s}$.

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

KERJAKAN BERSAMA **Membaca venturimeter**

Pada venturimeter, luas penampang besar 20 cm² dan luas leher 10 cm². Beda tinggi air di kedua tabung manometer 15 cm. Dengan $g = 10$ m/s², hitung kelajuan air di bagian besar dan di leher.

1. Perbandingan luas: $A_1/A_2 = 20/10 = 2$, jadi $(A_1/A_2)^2 - 1 = 3$.
2. $v_1 = \sqrt{\frac{2 \times 10 \times 0{,}15}{3}} = \sqrt{1} = 1$ m/s.
3. Kontinuitas: $v_2 = v_1 \times 2 = 2$ m/s.

$v_1 = 1$ **m/s dan** $v_2 = 2$ **m/s. Cek:** $\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) = 500 \times 3 = 1500$ **Pa** $= \rho g \Delta h = 1000 \times 10 \times 0{,}15$**.** ✓

Tabung pitot: spidometer pesawat

Pesawat tidak punya roda yang menggelinding di udara, jadi kelajuannya diukur dengan **tabung pitot**, pipa kecil yang menghadap ke depan di hidung atau sayap pesawat. Udara yang masuk ke mulut tabung dihentikan, sehingga tekanannya naik sebesar $\frac{1}{2}\rho v^2$ dibanding tekanan udara di lubang samping. Dari selisih tekanan ΔP itu, komputer pesawat menghitung $v = \sqrt{2\Delta P/\rho}$.

KECIL TAPI PENTING

Tabung pitot yang tersumbat es, debu, atau sarang serangga bisa membuat penunjuk kelajuan pesawat keliru. Karena itu pilot selalu memeriksa tutup tabung pitot sebelum terbang, dan tabung pitot pesawat modern dilengkapi pemanas.

Karburator motor

Udara yang dihisap mesin melewati leher venturi. Tekanannya turun sehingga bensin tersedot dari ruang pelampung dan bercampur menjadi kabut.

Semprotan obat nyamuk

Pompa tangan meniupkan udara cepat melewati ujung pipa kecil. Tekanan di sana turun, cairan tersedot naik lalu terpecah menjadi butiran halus.

Kompor gas

Semburan gas yang cepat dari nosel menarik udara masuk lewat lubang di pipa pembakar, sehingga gas bercampur oksigen sebelum menyala biru.

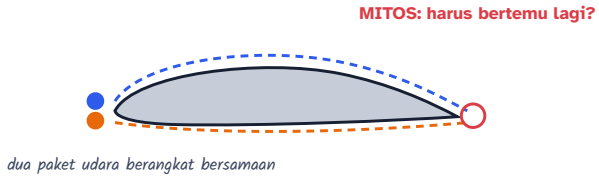
Payung terbalik, atap terangkat

Angin kencang di atas payung atau atap menurunkan tekanan di sisi atas. Tekanan udara di bawah yang lebih besar mendorongnya ke atas.

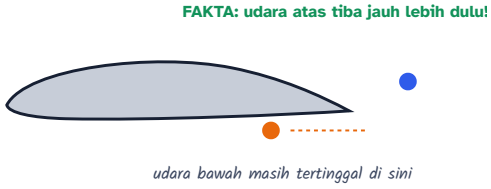
14.6 Gaya angkat: rahasia sayap pesawat dan layangan

Pesawat N219 buatan Indonesia bermassa beberapa ton, tetapi bisa melayang di udara. Gaya ke atas yang menahannya disebut **gaya angkat** (*lift*). Sayangnya, banyak buku menjelaskannya dengan cerita yang keliru. Mari kita luruskan langkah demi langkah.

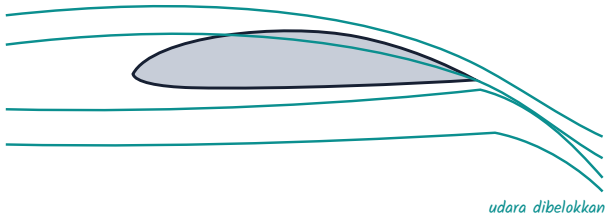
Langkah 1. Dua paket udara berangkat bersamaan dari ujung depan sayap: satu lewat atas, satu lewat bawah.



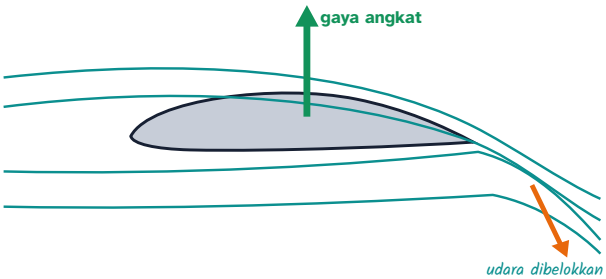
Langkah 2. Mitos populer: keduanya "harus" bertemu lagi di ujung belakang pada saat yang sama. Karena lintasan atas lebih panjang, udara atas "harus" lebih cepat. Kedengarannya masuk akal, tetapi **tidak ada hukum alam** yang memaksa mereka bertemu!



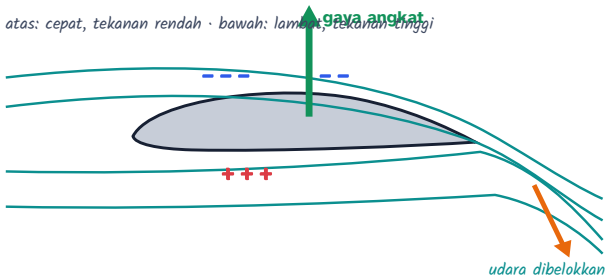
Langkah 3. Fakta dari terowongan angin: udara atas memang lebih cepat, bahkan jauh lebih cepat daripada yang diramalkan mitos itu. Ia tiba di ujung belakang **lebih dulu**, sementara udara bawah masih tertinggal.



Langkah 4. Yang sebenarnya terjadi: sayap yang melengkung dan sedikit menengadah (punya **sudut serang**) **membelokkan aliran udara ke bawah**.



Langkah 5. Hukum III Newton: sayap mendorong udara ke bawah, maka udara mendorong sayap ke atas. Itulah gaya angkat. Pesawat besar membelokkan berton-ton udara ke bawah setiap detik!



Langkah 6. Cara pandang Bernoulli juga benar: untuk membelokkan aliran, tekanan di atas sayap harus lebih rendah dan di bawahnya lebih tinggi. Selisih tekanan inilah gaya angkat. Penjelasan Newton dan Bernoulli adalah dua sisi dari peristiwa yang sama.

⚠️ **AWAS JEBAKAN: MITOS "WAKTU TEMPUH SAMA"**

Penjelasan "udara atas harus menyusul udara bawah supaya bertemu bersamaan" itu **keliru**. Pertama, tidak ada alasan fisis kedua paket udara harus bertemu. Kedua, hitungan dengan mitos itu memberi gaya angkat yang terlalu kecil. Ketiga, mitos itu tidak bisa menjelaskan pesawat akrobatik yang terbang **terbalik**, atau sayap tipis yang datar seperti layangan. Kuncinya adalah **sudut serang dan pembelokan aliran udara ke bawah**.

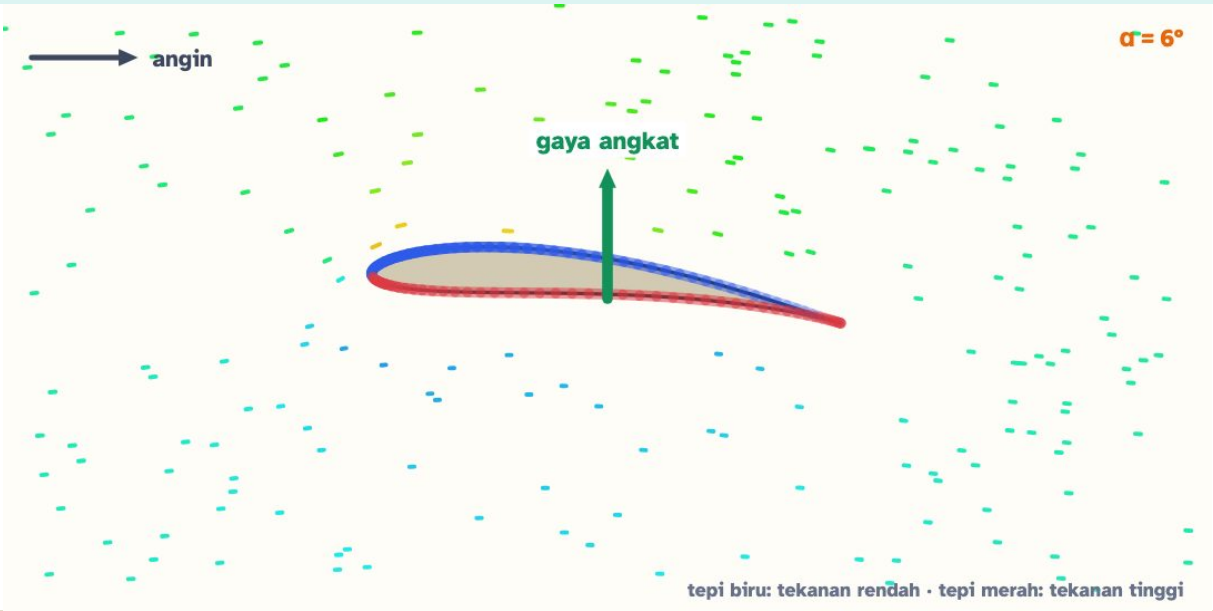
Besar gaya angkat bergantung pada massa jenis udara ρ, kelajuan v, luas sayap S, dan koefisien angkat C_L yang ditentukan bentuk sayap dan sudut serangnya:

$$L = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_L$$

Kelajuan dua kali lipat memberi gaya angkat empat kali lipat. Itulah sebabnya pesawat harus berlari kencang di landasan sebelum terangkat. Jika sudut serang terlalu besar (biasanya di atas ±15°), aliran udara di atas sayap "lepas" dan bergolak. Gaya angkat anjlok tiba-tiba. Keadaan berbahaya ini disebut **stall**.

LAB MINI **Terowongan angin mini: sayap, layangan, dan gaya angkat**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-14



Koefisien angkat	Gaya angkat per m² sayap	Setara beban per m²
1,33	1.382 N	141,1 kg

Aliran
Aliran menempel mulus

Tepi sayap diwarnai: **biru** = tekanan rendah, **merah** = tekanan tinggi. Tekan **"Lepas asap serentak"**, lalu amati barisan asap yang berangkat bersamaan: apakah bagian atas dan bawah tiba bersamaan di ujung sayap? Naikkan sudut serang melewati 15°. Apa yang terjadi?

Layangan bekerja dengan cara yang sama. Layangan miring terhadap angin, sehingga angin dibelokkan ke bawah dan layangan terdorong ke atas. Tali kama dan tali kekang mengatur sudut serangnya. Sudut terlalu kecil membuat layangan kurang terangkat. Sudut terlalu besar membuat hambatan angin terlalu besar dan layangan "menukik".

TAMU DARI MASA LALU: HABIBIE DAN GATOTKACA

Pada 10 Agustus 1995, pesawat **N250 Gatotkaca** rancangan tim B.J. Habibie terbang perdana di Bandung. Tanggal itu kini diperingati sebagai Hari Kebangkitan Teknologi Nasional. Penerusnya, **N219** buatan PT Dirgantara Indonesia bersama LAPAN, terbang perdana pada 2017. Pesawat 19 penumpang ini dirancang untuk landasan pendek di daerah terpencil seperti pedalaman Papua, sehingga sayapnya harus menghasilkan gaya angkat besar pada kelajuan rendah.

MITOS

"Udara di atas sayap harus menyusul udara di bawah supaya bertemu bersamaan di ujung belakang."

FAKTA

Tidak ada aturan seperti itu. Udara atas justru tiba
lebih dulu
. Gaya angkat muncul karena sayap membelokkan udara ke bawah, disertai tekanan rendah di atas dan tekanan tinggi di bawah sayap.

MITOS

"Pesawat tidak mungkin terbang terbalik, karena lengkungan sayapnya jadi di bawah."

FAKTA

Pesawat akrobatik bisa terbang terbalik! Pilot cukup mengangkat hidung pesawat sehingga sudut serangnya kembali tepat. Bukti bahwa sudut serang lebih penting daripada sekadar bentuk sayap.

LANJUT · OLIMPIADE

SIRKULASI DAN TEOREMA KUTTA–JOUKOWSKI

Aliran di sekitar sayap bisa dipandang sebagai aliran lurus ditambah "pusaran" yang mengelilingi sayap, dengan kekuatan disebut **sirkulasi** Γ. Sirkulasi membuat udara di atas lebih cepat dan di bawah lebih lambat. Gaya angkat per meter bentang sayap adalah $L' = \rho v \Gamma$. Besar Γ ditentukan oleh **syarat Kutta**: udara harus meninggalkan ujung belakang sayap yang runcing dengan mulus. Lab terowongan angin di atas memakai solusi eksak aliran ideal ini, lewat trik matematika bernama *transformasi Joukowski* yang memetakan aliran di sekitar lingkaran menjadi aliran di sekitar sayap.

14.7 Viskositas dan kecepatan terminal

Tuang air, minyak goreng, dan madu ke tiga piring. Air langsung menyebar, minyak sedikit lebih lambat, dan madu "malas" mengalir. Sifat ini disebut **viskositas** atau kekentalan, yaitu gesekan di dalam fluida.

Bayangkan fluida sebagai tumpukan kartu remi. Jika kartu teratas didorong, kartu-kartu di bawahnya ikut tergeser tetapi makin lambat. Setiap lapisan "menggesek" lapisan di sebelahnya. Makin kental fluidanya, makin besar gaya yang diperlukan untuk menggeser lapisan-lapisannya. Ukurannya adalah **koefisien viskositas** η (dibaca "eta") dengan satuan Pa·s.

Fluida (±20 °C)	η (Pa·s)
Udara	$1{,}8 \times 10^{-5}$
Air	$1{,}0 \times 10^{-3}$
Minyak goreng	±0,05–0,08
Oli mesin	±0,1–0,3

Gliserin	±1,4
Madu	±2–10

Viskositas zat cair **turun** saat dipanaskan: minyak goreng panas jauh lebih encer, dan madu yang dihangatkan lebih mudah dituang. Anehnya, viskositas gas justru sedikit **naik** saat dipanaskan.

Hukum Stokes dan kecepatan terminal

Bola kecil yang bergerak pelan di fluida kental mengalami gaya gesek yang sebanding dengan kelajuannya. George Stokes (1851) menemukan rumusnya:

$$F_s = 6\pi\,\eta\,r\,v$$

Jatuhkan kelereng ke gliserin. Mula-mula kelereng dipercepat oleh beratnya. Makin cepat, makin besar gaya Stokes yang menahannya. Suatu saat gaya ke atas (gaya apung + gaya Stokes) sama dengan berat. Gaya totalnya nol, dan kelereng meluncur dengan kelajuan tetap yang disebut **kecepatan terminal**:

$$mg = \rho_f V g + 6\pi\eta r v_t \;\Rightarrow\; v_t = \frac{2r^2(\rho_b - \rho_f)\,g}{9\eta}$$

RUMUS HIDUP

Kecepatan terminal (hukum Stokes)

$$v_t = \frac{2\,r^2\,(\rho_b - \rho_f)\,g}{9\,\eta}$$

Bola dua kali lebih besar jatuh empat kali lebih cepat. Fluida dua kali lebih kental membuatnya dua kali lebih lambat.

- r Jari-jari bola mm
- ρ_b Massa jenis bola kg/m³
- ρ_f Massa jenis fluida kg/m³
- η Viskositas fluida Pa·s
- v_t Kecepatan terminal cm/s

KECEPATAN TERMINAL

2,14

cm/s

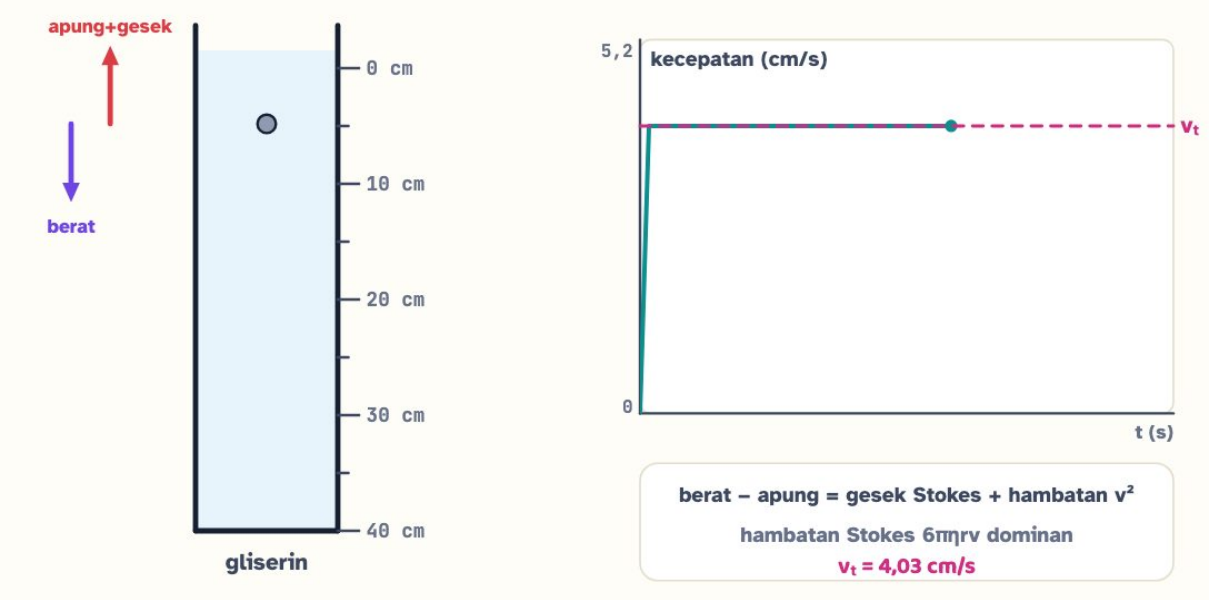
Bola berjari-jari **1,5** mm (ρ = **7.800** kg/m³) di fluida ρ = **1.260** kg/m³ dengan η = **1,5** Pa·s jatuh tetap **2,14** cm/s.

Cek satuan: $\frac{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg/m^3} \cdot \mathrm{m/s^2}}{\mathrm{Pa\,s}} = \frac{\mathrm{kg/s^2}}{\mathrm{kg/(m\,s)}} = \mathrm{m/s}$. Hanya berlaku untuk aliran pelan (bilangan Reynolds kecil).

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

LAB MINI Lomba jatuh: dari kelereng di gliserin sampai penerjun payung

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-14



Kecepatan	Kecepatan terminal (teori)	Jarak jatuh
4,03 cm/s	4,03 cm/s	4,8 cm dari 40 cm

Waktu mencapai 95% v_t	Keadaan
16,7 ms (sekejap!)	Kecepatan terminal (gaya total nol)

Pilih benda, lalu jalankan. Amati grafik kecepatan: mula-mula naik, lalu mendatar di **kecepatan terminal** (garis putus-putus). Untuk penerjun, nyalakan ⏩ **percepat waktu**, lalu tekan **Buka parasut!** di tengah jalan. (Jika lupa, parasut cadangan otomatis terbuka di ketinggian 500 m.)

COBA SENDIRI Mengapa awan tidak jatuh?

Awan tersusun atas butiran air berjari-jari sekitar $10\ \mu\text{m}$. Dengan $\eta_{\text{udara}} = 1{,}8 \times 10^{-5}$ Pa·s, $\rho_{\text{air}} = 1000$ kg/m³, dan $g = 9{,}8$ m/s², hitung kecepatan terminal butiran itu (massa jenis udara diabaikan). Berapa lama ia turun 1 km di udara tenang?

1. $r = 10\ \mu\text{m} = 1 \times 10^{-5}$ m, sehingga $r^2 = 10^{-10}\ \text{m}^2$.
2. $v_t = \dfrac{2 \times 10^{-10} \times 1000 \times 9{,}8}{9 \times 1{,}8 \times 10^{-5}} = \dfrac{1{,}96 \times 10^{-6}}{1{,}62 \times 10^{-4}} \approx 0{,}012$ m/s, yaitu sekitar 1,2 cm/s.
3. Waktu turun 1 km: $t = 1000/0{,}012 \approx 8 \times 10^4$ s, hampir sehari penuh!

Butiran awan hanya jatuh ±1,2 cm/s. Arus udara naik yang lemah sekalipun (beberapa cm/s) sudah cukup untuk menahannya. Hujan baru turun setelah butiran-butiran bergabung menjadi tetes yang ribuan kali lebih berat.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

BILANGAN REYNOLDS DAN PEMBULUH DARAH

Kapan aliran laminer, kapan turbulen? Lihat **bilangan Reynolds** $Re = \rho v d/\eta$. Di dalam pipa, aliran biasanya laminer jika $Re \lesssim 2000$. Hukum Stokes hanya tepat untuk $Re \lesssim 1$. Tetes hujan berdiameter 2 mm punya Re ratusan, sehingga hambatannya sebanding dengan v^2, bukan v. Itulah sebabnya kecepatan terminalnya hanya ±6–7 m/s, bukan ±120 m/s seperti ramalan rumus Stokes.

Untuk aliran laminer di pipa, debit mengikuti hukum Poiseuille: $Q = \dfrac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta L}$. Perhatikan pangkat 4!

Pembuluh darah yang menyempit 10% jari-jarinya kehilangan ±34% alirannya. Itulah sebabnya penyempitan pembuluh darah sangat berbahaya bagi jantung.

MITOS

"Tetes hujan dari awan setinggi 2 km jatuh makin cepat dan bisa sederas peluru."

FAKTA

Hambatan udara membuat tetes hujan cepat mencapai kecepatan terminal, hanya sekitar 2–9 m/s tergantung ukurannya. Tanpa udara, tetes dari 2 km akan menghantam tanah ±200 m/s. Untung ada udara!

Penerjun payung

Tanpa parasut, kecepatan terminal penerjun ±50 m/s (±180 km/jam). Parasut memperbesar luas hambatan sehingga kecepatan terminalnya turun menjadi ±5 m/s.

Cairan infus

Botol infus digantung tinggi agar tekanan $\rho g h$ cukup mendorong cairan melewati selang dan jarum yang sempit dan "menghambat".

Oli mesin

Kode kekentalan oli dipilih agar oli cukup encer saat mesin dingin, tetapi tetap cukup kental untuk melapisi logam saat mesin panas.

Layangan di sawah

Angin kemarau yang stabil dibelokkan ke bawah oleh layangan yang miring. Gaya angkatnya diimbangi tegangan tali dan berat layangan.

Garis kuning di peron

Kereta yang melaju kencang menyeret udara di sekitarnya. Aliran udara cepat dan perubahan tekanan bisa menarik benda ringan, jadi berdirilah di belakang garis kuning.

Madu asli atau palsu?

Sebagian orang menguji madu dengan memperhatikan seberapa lambat tetesnya mengalir. Itu sebenarnya uji viskositas, walaupun hasilnya juga dipengaruhi suhu dan kadar air.

Cek Cepat

Air mengalir dari pipa berdiameter 4 cm ke pipa berdiameter 2 cm. Kelajuan air di pipa kecil menjadi...

- setengahnya
- sama
- dua kali
- empat kali

Pada pipa mendatar yang menyempit, tekanan air paling kecil terdapat di...

- bagian paling sempit
- bagian paling lebar
- semua bagian sama
- ujung keluarnya air

Gaya angkat pada sayap pesawat paling tepat dijelaskan oleh...

- udara atas yang harus tiba bersamaan dengan udara bawah
- mesin pesawat yang mendorong ke atas
- sayap yang membelokkan udara ke bawah, disertai tekanan rendah di atas sayap
- udara di bawah sayap yang lebih ringan

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. A · 3. C

Tantangan Rumah: botol bocor tiga lubang

Bahan: botol plastik bekas 1,5 L, paku kecil, selotip, baskom atau halaman, mistar. Minta bantuan orang dewasa saat melubangi botol.

1. Buat tiga lubang kecil segaris di dinding botol: ±5 cm, ±12 cm, dan ±19 cm dari dasar. Tutup ketiganya dengan selotip.
2. Isi botol penuh air dan letakkan di tepi meja atau di tanah.
3. Lepas selotip bersamaan. Ukur dan foto jarak mendarat ketiga pancaran.
4. Bonus: gantung dua lembar kertas berjarak ±4 cm, lalu tiup di antara keduanya dengan sedotan. Bergerak ke mana kertasnya?

Pertanyaan: Pancaran mana yang paling jauh? Apakah hasilnya cocok dengan $x = 2\sqrt{hy}$? Apa yang terjadi pada ketiga pancaran saat permukaan air turun?

RINGKASAN KILAT **Bab 14 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menghitung **debit** $Q = Av$ dan memakai **persamaan kontinuitas** $A_1 v_1 = A_2 v_2$
- menjelaskan **hukum Bernoulli**: di tempat aliran lebih cepat, tekanannya lebih kecil, dan tahu *mengapa*
- menghitung kecepatan pancaran **Torricelli** $v = \sqrt{2gh}$ dan jarak jatuhnya
- menjelaskan venturimeter, tabung pitot, dan **gaya angkat sayap** dengan benar, tanpa mitos "waktu tempuh sama"
- memakai **viskositas**, hukum Stokes, dan **kecepatan terminal** untuk kelereng, butir awan, dan penerjun payung

Istilah kunci

fluida | fluida ideal | garis arus | laminer | turbulen | Debit | persamaan kontinuitas | teorema Torricelli | venturimeter | tabung pitot | gaya angkat | sudut serang | stall | viskositas | kecepatan terminal

🧮 Rumus penting

$$Q = A\,v = \frac{\pi d^2}{4}\,v$$

Debit aliran. Debit = luas penampang × kelajuan. Pipa lebih gemuk atau air lebih ngebut → lebih banyak air lewat tiap detik.

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

Persamaan kontinuitas (pipa lingkaran). Diameter mengecil setengahnya → luas jadi seperempat → kelajuan jadi empat kali. Debit tetap sama.

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

Teorema Torricelli. Kelajuan pancaran sama dengan kelajuan benda yang jatuh bebas dari permukaan air ke lubang.

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\,\Delta h}{n^2 - 1}}, \quad n = \frac{A_1}{A_2}$$

Venturimeter tanpa raksa. Beda tinggi air di dua tabung manometer → kelajuan air di bagian pipa yang lebar.

$$v_t = \frac{2\,r^2\,(\rho_b - \rho_f)\,g}{9\,\eta}$$

Kecepatan terminal (hukum Stokes). Bola dua kali lebih besar jatuh empat kali lebih cepat. Fluida dua kali lebih kental membuatnya dua kali lebih lambat.

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Bagian pipa yang sempit tidak mengurangi debit pada aliran tunak.
- Banyak orang mengira air di bagian pipa yang sempit tekanannya lebih besar karena "terjepit".
- Penjelasan "udara atas harus menyusul udara bawah supaya bertemu bersamaan" itu keliru.

⛰️ Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=14

Teka-teki untuk Bab 15

Minyak goreng di wajan yang dipanaskan menjadi jauh lebih encer. Air di panci yang dipanaskan dari bawah mulai bergerak naik-turun sendiri, walaupun tidak ada yang mengaduknya. Siapa yang "mengaduk" air itu, dan dari mana energinya datang?

▼ Intip petunjuk

Air yang panas memuai dan menjadi kurang rapat, sehingga ia naik, dan air dingin turun menggantikannya. Kalor sedang "menumpang" pada fluida yang bergerak. Ini disebut konveksi, salah satu dari tiga cara kalor berpindah. Kita bongkar semuanya di Bab 15: Suhu, Kalor & Perpindahan Kalor.

15 BAB 15 · FLUIDA & PANAS

Suhu & Kalor: Ke Mana Panas Pergi?

Kenapa gelas es teh "berkeringat"? Kenapa ubin terasa lebih dingin daripada karpet, padahal suhunya sama? Bab ini membongkar perjalanan kalor, dari dapurmu sampai permukaan Matahari.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **suhu** dan **kalor**, serta mengubah skala Celsius, Fahrenheit, Reamur, dan Kelvin;
- menghitung **pemuaian** dan menjelaskan celah rel serta keping bimetal;
- memakai $Q = mc\Delta T$, **kalor laten** $Q = mL$, dan **asas Black** untuk soal campuran;
- menjelaskan **konduksi, konveksi, radiasi**, termasuk angin darat dan angin laut;
- memakai hukum **Wien** dan **Stefan–Boltzmann** untuk benda pijar, tubuh manusia, dan Matahari.

ES TEH BERKERINGAT

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Ubin dan karpet di kamar yang sama bersuhu 27 °C. Mengapa telapak kaki terasa lebih dingin di atas ubin?

- Suhu ubin sebenarnya lebih rendah daripada karpet.
- Ubin menghantarkan kalor dari kakimu jauh lebih cepat daripada karpet.
- Karpet menghasilkan panasnya sendiri.
- Ubin memancarkan "dingin" ke telapak kaki.

Jawabannya: ubin lebih cepat "menyedot" kalor dari kakimu. Telapak kakimu ±33 °C, lebih panas daripada lantai, sehingga kalor mengalir dari kaki ke lantai. Kulitmu tidak merasakan suhu lantai. Kulit merasakan seberapa *cepat* kalor meninggalkannya. Ubin keramik adalah penghantar kalor yang jauh lebih baik daripada karpet berbulu yang penuh kantong udara. Tidak ada "dingin" yang mengalir: yang mengalir selalu kalor, dari panas ke dingin.

15.1 Suhu dan termometer

Dalam percakapan sehari-hari, "panas" bisa berarti dua hal yang berbeda. Fisika memisahkannya dengan tegas:

- **Suhu** adalah ukuran derajat panas-dinginnya benda. Di tingkat partikel, suhu mengukur rata-rata energi gerak partikel (Bab 16).

- **Kalor** adalah **energi yang berpindah** karena ada perbedaan suhu. Satuannya joule (J), sama seperti energi lain.

Satu ember air hangat 40 °C bersuhu lebih rendah daripada secangkir teh mendidih 100 °C. Tetapi ember itu menyimpan energi termal jauh lebih banyak, karena partikelnya jauh lebih banyak. Itulah sebabnya ember air hangat bisa menghangatkan kakimu lebih lama daripada secangkir teh.

Bahasa sederhana · Gampangnya: **suhu** itu angka di termometer (seberapa panas). **Kalor** itu panas yang *berpindah*, misalnya dari kompor ke panci, atau dari teh ke tanganmu.

> ✏️ **TRIK KAK NARA: SUHU ITU TINGGI AIR, KALOR ITU AIRNYA**
>
> Bayangkan suhu sebagai **ketinggian permukaan air** di dua tangki, dan kalor sebagai **air yang mengalir** lewat pipa penghubung. Air selalu mengalir dari permukaan tinggi ke rendah, sampai permukaannya sama. Kalor selalu mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah, sampai suhunya sama. Keadaan akhir itu disebut **kesetimbangan termal**.

Termometer bekerja berkat kesetimbangan termal: termometer dibiarkan menyentuh benda sampai suhunya sama, lalu kita membaca sifat zat di dalamnya yang berubah karena suhu. Raksa atau alkohol memuai di dalam pipa kaca, hambatan listrik termistor berubah pada termometer digital, dan termometer tembak dahi membaca radiasi inframerah dari kulit.

Empat skala, satu cara

Setiap skala dibuat dari dua **titik tetap**: es mencair dan air mendidih pada tekanan 1 atmosfer. Jarak antara keduanya dibagi menjadi sejumlah "anak tangga":

Skala	Titik beku air	Titik didih air	Jumlah skala
Celsius (°C)	0	100	100
Reamur (°R)	0	80	80
Fahrenheit (°F)	32	212	180
Kelvin (K)	273,15	373,15	100

Kuncinya: posisi relatif suhu di antara titik beku dan titik didih **sama** di semua skala.

$$\frac{C}{100} = \frac{R}{80} = \frac{F - 32}{180} = \frac{K - 273}{100}$$

RUMUS HIDUP **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.

- t_C Suhu dalam Celsius °C
- X_b Titik beku pada skala X °X
- X_d Titik didih pada skala X °X
- X Suhu pada skala X °X

SUHU PADA SKALA X

86

°X

ini skala Fahrenheit

30 °C terbaca **86** pada skala yang titik bekunya **32** dan titik didihnya **212**. Coba pasangan (32, 212) untuk Fahrenheit, (0, 80) untuk Reamur, dan (273, 373) untuk Kelvin.

Cek satuan: Rumus ini juga menyelesaikan soal "termometer X buatan sendiri": cukup ganti titik tetapnya.

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

CONTOH **Siang terik di Surabaya**

Suhu siang di Surabaya 30 °C. Nyatakan dalam °F, °R, dan K.

1. Fahrenheit: $F = \frac{9}{5}C + 32 = 54 + 32 = 86$ °F.
2. Reamur: $R = \frac{4}{5}C = 24$ °R.
3. Kelvin: $K = C + 273 = 303$ K.

30 °C = 86 °F = 24 °R = 303 K. Kenaikan 1 °C sama dengan kenaikan 1 K, tetapi sama dengan kenaikan 1,8 °F.

TAMU DARI MASA LALU

Daniel Fahrenheit membuat skalanya pada 1724, dan René de Réaumur pada 1730. Pada 1742, Anders Celsius dari Swedia mengusulkan skala seratus derajat, tetapi terbalik: **0 untuk air mendidih dan 100 untuk es mencair!** Setelah ia wafat, skalanya dibalik menjadi yang kita pakai sekarang. Pada 1848, William Thomson (Lord Kelvin) memperkenalkan skala mutlak yang dimulai dari suhu terendah yang mungkin, yaitu −273,15 °C.

FISIKA INDONESIA: EMBUN UPAS DI DIENG

Indonesia terletak di khatulistiwa, tetapi tidak selalu hangat. Di Dataran Tinggi Dieng (±2.000 m), pada malam-malam musim kemarau sekitar Juli–Agustus, suhu bisa turun mendekati atau di bawah 0 °C. Embun membeku menjadi kristal es tipis di daun dan rumput, yang oleh warga disebut **embun upas**. Di puncak Jaya Wijaya (Papua) bahkan ada gletser abadi, walaupun kini terus menyusut karena pemanasan global.

AWAS JEBAKAN

Menaikkan suhu dari 20 °C menjadi 40 °C **bukan** berarti "dua kali lebih panas". Skala Celsius tidak dimulai dari nol mutlak. Dalam kelvin, suhunya naik dari 293 K menjadi 313 K, hanya ±7% lebih besar. Untuk perbandingan dan rumus gas (Bab 16), selalu pakai kelvin.

15.2 Pemuaian: benda yang "melar" saat panas

Saat dipanaskan, partikel-partikel zat bergetar lebih hebat sehingga jarak rata-rata antarpartikel sedikit bertambah. Hasilnya, benda **memuai**. Saat didinginkan, benda **menyusut**. Perubahan panjang sebuah batang sebanding dengan panjang awalnya dan kenaikan suhunya:

$$\Delta L = \alpha\, L_0\, \Delta T$$

Konstanta α disebut **koefisien muai panjang**, dengan satuan /°C atau /K. Untuk luas dan volume berlaku rumus serupa, dengan koefisien muai luas $\beta \approx 2\alpha$ dan koefisien muai volume $\gamma \approx 3\alpha$.

Bahan	α (×10^{-6} / °C)	Catatan
Aluminium	±24	panci, kusen jendela
Tembaga	±17	kabel listrik
Baja	±12	rel kereta, jembatan
Beton	±10–14	hampir sama dengan baja, jadi beton bertulang tidak retak saat panas
Kaca biasa	±9	gelas mudah retak bila dituangi air mendidih

Kaca borosilikat	±3,3	gelas tahan panas laboratorium

RUMUS HIDUP **Pemuaian panjang**

$$\Delta L = \alpha\, L_0\, \Delta T$$

Pertambahan panjang = koefisien muai × panjang awal × kenaikan suhu. Kecil, tetapi bisa membengkokkan rel!

- α Koefisien muai panjang (×10⁻⁶) /°C
- L_0 Panjang awal m
- ΔT Kenaikan suhu °C
- ΔL Pertambahan panjang mm

PERTAMBAHAN PANJANG

9

mm

Batang **25** m (α = **12** × 10⁻⁶ /°C) yang suhunya naik **30** °C bertambah panjang **9** mm.

Cek satuan: $/^\circ\mathrm{C} \times \mathrm{m} \times {}^\circ\mathrm{C} = \mathrm{m}$, lalu dikali 1000 menjadi mm.

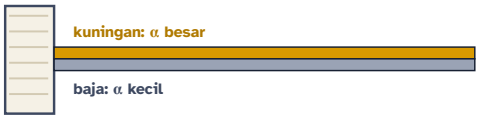
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-KALOR-MUAI

KERJAKAN BERSAMA **Celah sambungan rel**

Satu batang rel baja panjangnya 12 m pada 25 °C. Di siang terik, suhu rel mencapai 55 °C. Berapa milimeter minimal celah antarbatang rel agar ujung-ujungnya tidak saling mendorong? ($\alpha_{\text{baja}} = 12 \times 10^{-6}$ /°C)

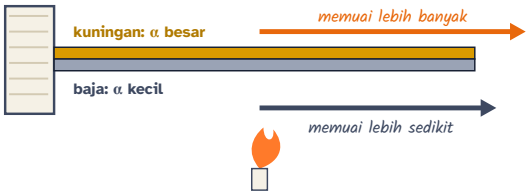
1. Kenaikan suhu: $\Delta T = 55 - 25 = 30$ °C.
2. $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times 12 \times 30 = 4{,}32 \times 10^{-3}$ m.

Celah minimal ±4,3 mm. Bunyi "tek-tek, tek-tek" kereta lama berasal dari roda yang melewati celah-celah ini.

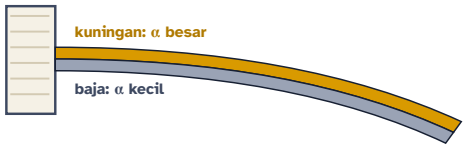


Langkah 1. Keping bimetal: dua logam berbeda (kuningan dan baja) dikeling menjadi satu keping lurus pada suhu kamar.

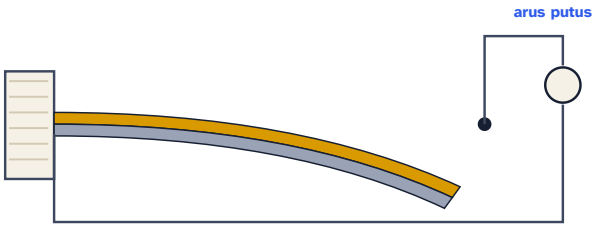
Langkah 2. Keping dipanaskan. Kedua logam memuai, tetapi koefisien muai kuningan (±19 × 10^{-6} /°C) lebih besar daripada baja (±12 × 10^{-6} /°C).



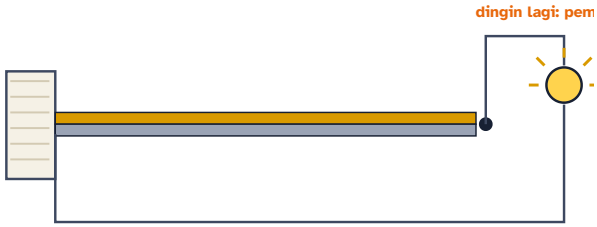
Langkah 3. Kuningan "ingin" bertambah panjang lebih banyak, tetapi tertahan oleh baja yang menempel padanya.



Langkah 4. Akibatnya keping **melengkung**, dengan logam yang lebih banyak memuai (kuningan) berada di sisi luar lengkungan.



Langkah 5. Di dalam setrika, ujung keping menjadi sakelar. Saat setrika terlalu panas, keping melengkung menjauhi kontak dan arus listrik putus.



Langkah 6. Setelah agak dingin, keping lurus kembali, kontak tersambung, dan pemanas menyala lagi. Suhu setrika pun terjaga. Inilah **termostat**.

Air yang "nakal": anomali air

Hampir semua zat menyusut saat didinginkan. Air juga, tetapi hanya sampai 4 °C. Dari 4 °C ke 0 °C, air justru **memuai**, dan saat membeku volumenya bertambah ±9%. Karena itu es mengapung, botol kaca berisi air penuh bisa pecah di freezer, dan danau di negeri empat musim membeku dari permukaan, sehingga ikan tetap hidup di air 4 °C di dasarnya.

FISIKA INDONESIA: REL KERETA DAN KABEL PLN

Rel kereta generasi lama dipasang dengan celah kecil di setiap sambungan. Jalur modern, termasuk banyak lintasan KRL, memakai **rel panjang yang dilas** dan dijepit kuat ke bantalan beton, sehingga rel tidak bisa memuai memanjang. Sebagai gantinya, rel menahan tegangan termal yang besar. Kabel listrik PLN sengaja dipasang agak kendur: di siang hari kabel memuai dan makin melengkung, di malam yang dingin kabel menyusut dan makin tegang. Jika dipasang tegang di siang hari, kabel bisa putus di malam hari.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TEGANGAN TERMAL: KEKUATAN YANG TERSEMBUNYI

Jika batang dijepit sehingga tidak bisa memuai, batang menekan penjepitnya dengan tegangan $\sigma = E\alpha\Delta T$, dengan E modulus Young (Bab 12). Untuk baja ($E \approx 200$ GPa) yang suhunya naik 30 °C: $\sigma = 200 \times 10^9 \times 12 \times 10^{-6} \times 30 = 72$ MPa, setara beban ±730 kg pada setiap sentimeter persegi penampang rel! Jika bantalannya lemah, rel bisa melengkung ke samping (*sun kink*). Itulah sebabnya rel las panjang dipasang pada suhu netral tertentu dan diperiksa saat cuaca sangat panas.

15.3 Kalor dan kalor jenis

Panaskan 1 kg air dan 1 kg minyak goreng di atas kompor yang sama. Minyak jauh lebih cepat panas. Air "lebih rakus" menyerap kalor sebelum suhunya naik. Banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 kg zat sebesar 1 °C disebut **kalor jenis** c:

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

Zat	c (J/kg·°C)
Air	4.200
Es	2.100
Uap air	±2.010
Minyak goreng	±2.000
Udara	±1.000
Aluminium	900
Pasir kering	±800
Besi	450
Tembaga	390

Air punya kalor jenis yang sangat besar. Akibatnya laut lambat panas dan lambat dingin, sedangkan pasir pantai cepat panas di siang hari dan cepat dingin di malam hari. Perbedaan inilah yang nanti menggerakkan angin darat dan angin laut (subbab 15.6). Hasil kali mc disebut **kapasitas kalor** C (J/°C), yaitu kalor untuk menaikkan suhu seluruh benda sebesar 1 °C.

RUMUS HIDUP **Kalor untuk menaikkan suhu**

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

Kalor = massa × kalor jenis × kenaikan suhu. Air yang banyak dan 'rakus kalor' butuh energi besar.

m Massa kg | c Kalor jenis J/kg°C | ΔT Kenaikan suhu °C | Q Kalor yang diserap J

KALOR YANG DISERAP

472.500

J

Memanaskan **1,5** kg zat (c = **4.200** J/kg°C) sebesar **75** °C membutuhkan **472.500** J.

Satuan Nusantara: ≈ 19% dari sepiring nasi goreng (±600 kkal) · ≈ 13% dari 1 kWh token listrik · ≈ 113 × 1 kkal (kalori makanan)

Cek satuan: $\mathrm{kg} \times \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\,^{\circ}\mathrm{C}} \times {}^{\circ}\mathrm{C} = \mathrm{J}$. Satu kalori (kal) = 4,2 J, yaitu kalor untuk menaikkan 1 gram air sebesar 1 °C.

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

CONTOH **Merebus air untuk teh**

Kak Nara merebus 1,5 kg air dari 25 °C sampai 100 °C dengan teko listrik 1000 W. Berapa kalor yang diperlukan, dan berapa lama jika semua energi listrik diserap air? ($c_{\text{air}} = 4200$ J/kg·°C)

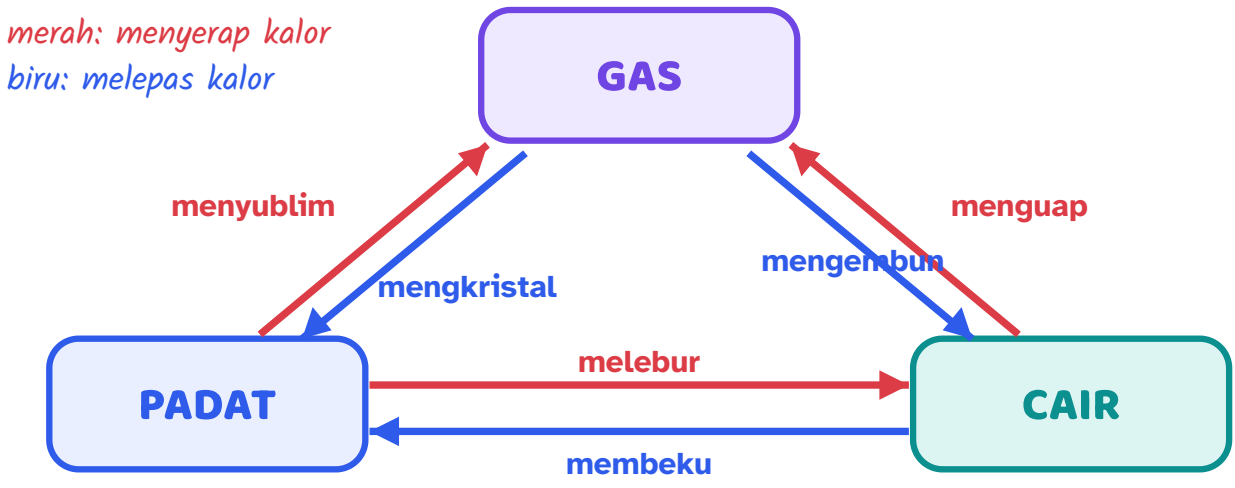
1. $\Delta T = 100 - 25 = 75$ °C.
2. $Q = mc\Delta T = 1{,}5 \times 4200 \times 75 = 472\,500$ J.
3. Daya 1000 W berarti 1000 J tiap detik: $t = 472\,500/1000 = 472{,}5$ s $\approx 7{,}9$ menit.

Butuh ±473 kJ, atau ±8 menit. Dalam praktik lebih lama, karena sebagian kalor hilang ke udara dan ke badan teko.

TAMU DARI MASA LALU

Dulu kalor dianggap zat cair tak terlihat bernama "kalorik". Pada 1840-an, James Prescott Joule, anak pengusaha bir di Inggris, memutar kincir di dalam air dengan beban jatuh dan mengukur kenaikan suhu airnya. Ia membuktikan bahwa usaha mekanik bisa berubah menjadi kalor dengan nilai tukar tetap: ±4,2 joule untuk setiap kalori. Kalor ternyata adalah energi!

15.4 Perubahan wujud dan kalor laten



Enam perubahan wujud. Menuju wujud yang partikelnya lebih "bebas" selalu memerlukan kalor.

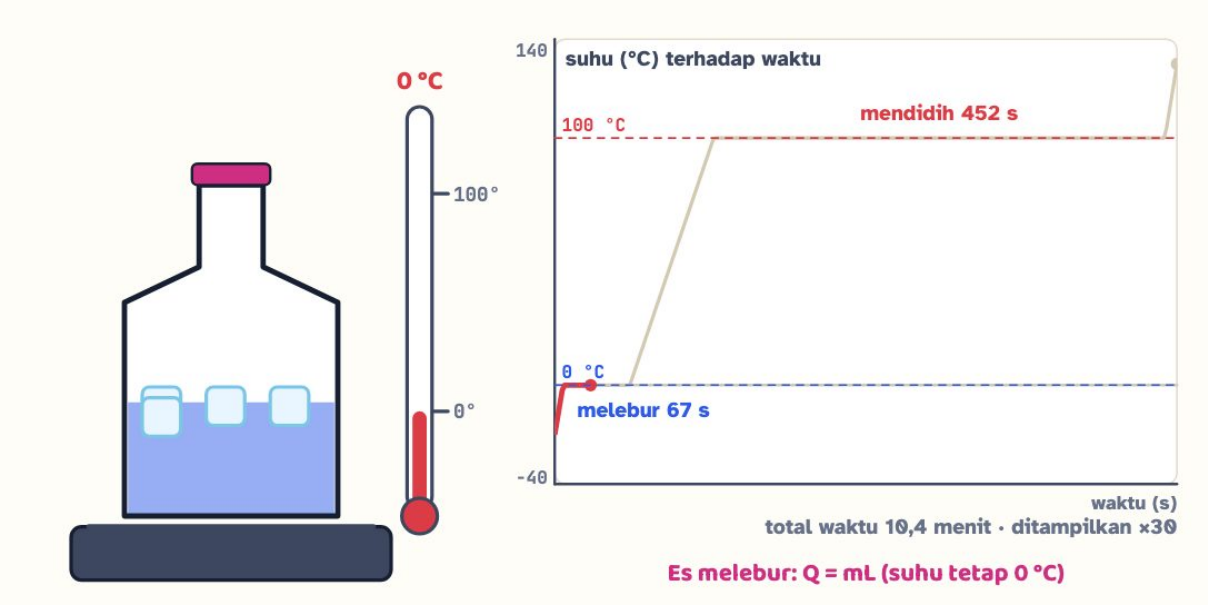
Saat es mencair atau air mendidih, kalor terus diserap tetapi **suhunya tidak naik**. Energi itu dipakai untuk memutus ikatan antarpartikel, bukan untuk mempercepat gerak partikel. Kalor "tersembunyi" ini disebut **kalor laten**:

$$Q = m\,L$$

- Kalor lebur es: $L_f = 334\,000$ J/kg (sering dibulatkan 336 kJ/kg = 80 kal/g).
- Kalor uap air: $L_u = 2\,260\,000$ J/kg (±540 kal/g), hampir 7 kali kalor leburnya!

LAB MINI **Kurva pemanasan: dari es batu sampai uap**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-15



Suhu	Keadaan	Kalor diserap
0 °C	Es melebur: Q = mL (suhu tetap 0 °C)	36 kJ

Waktu sungguhan
36 s

Jalankan kompor dan amati grafik suhu terhadap waktu. Kapan suhunya **berhenti naik**? Bandingkan panjang "dataran" saat es melebur dengan saat air mendidih. Ubah massa dan daya kompor: bagian mana yang berubah?

JAWABAN MISTERI ES TEH

Udara di sekitarmu mengandung uap air. Saat uap menyentuh dinding gelas yang sangat dingin, uap melepas kalor laten dan **mengembun** menjadi titik-titik air. Air itu berasal dari udara, bukan dari dalam gelas. Karena itu rasanya tawar! Di hari yang lembap, "keringat" gelas makin banyak.

FISIKA INDONESIA: RICE COOKER TAHU KAPAN NASI MATANG

Selama masih ada air di panci, suhu dasar panci tertahan di sekitar 100 °C, karena kalor dipakai untuk menguapkan air (dataran pada kurva pemanasan!). Begitu air habis terserap beras, suhu dasar panci naik melewati 100 °C. Banyak rice cooker sederhana memakai sakelar bermagnet yang kehilangan sifat magnetnya pada suhu sedikit di atas 100 °C. Sakelar pun lepas, dan rice cooker pindah ke mode "hangat". Fisika kalor laten di setiap dapur Indonesia!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TITIK DIDIH BERGANTUNG PADA TEKANAN

Air mendidih saat tekanan uapnya sama dengan tekanan udara di atasnya. Di puncak gunung, tekanan udara lebih rendah (Bab 13), sehingga air mendidih di bawah 100 °C: di ketinggian ±3.000 m, kira-kira 90 °C. Pendaki Semeru tahu, mi instan lebih lama matang di Ranu Kumbolo! Sebaliknya, panci presto menahan uap sehingga tekanannya naik, dan air baru mendidih pada ±110–120 °C. Daging empal yang alot pun cepat empuk.

15.5 Asas Black: kalor dilepas = kalor diterima

Campurkan air panas dan air dingin di dalam wadah yang tertutup rapat dan tidak menghantarkan panas. Kalor mengalir dari yang panas ke yang dingin sampai suhunya sama. Tidak ada kalor yang hilang dan tidak ada yang tercipta (hukum kekekalan energi), sehingga

$$Q_{\text{lepas}} = Q_{\text{terima}}$$

Inilah **asas Black**. Wadah khusus untuk percobaannya disebut **kalorimeter**: bejana logam di dalam bejana lain yang dipisahkan lapisan udara atau bahan isolator, lengkap dengan tutup, termometer, dan pengaduk. Untuk dua zat yang dicampur dan tanpa perubahan wujud:

$$m_1 c_1 (T_1 - T_c) = m_2 c_2 (T_c - T_2) \;\Rightarrow\; T_c = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

Tebak Dulu!

100 g es bersuhu 0 °C dimasukkan ke dalam 100 g air bersuhu 80 °C di dalam termos. Berapa suhu akhirnya? (Kalor lebur es 80 kal/g, kalor jenis air 1 kal/g·°C)

- 40 °C, rata-rata dari 0 dan 80.
- 50 °C.
- 0 °C.
- 20 °C.

Jawabannya: 0 °C! Untuk mencairkan seluruh es diperlukan $100 \times 80 = 8000$ kal. Air 80 °C yang mendingin sampai 0 °C melepas $100 \times 1 \times 80 = 8000$ kal juga. Semua kalor dari air panas habis hanya untuk melebur es. Hasilnya 200 g air bersuhu 0 °C. Kalor laten itu besar sekali, dan itulah sebabnya es batu sangat ampuh mendinginkan minuman.

RUMUS HIDUP

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.

- m_1 Massa air panas kg
- T_1 Suhu air panas °C
- m_2 Massa air dingin kg
- T_2 Suhu air dingin °C
- T_c Suhu campuran °C

SUHU CAMPURAN

39,2

°C

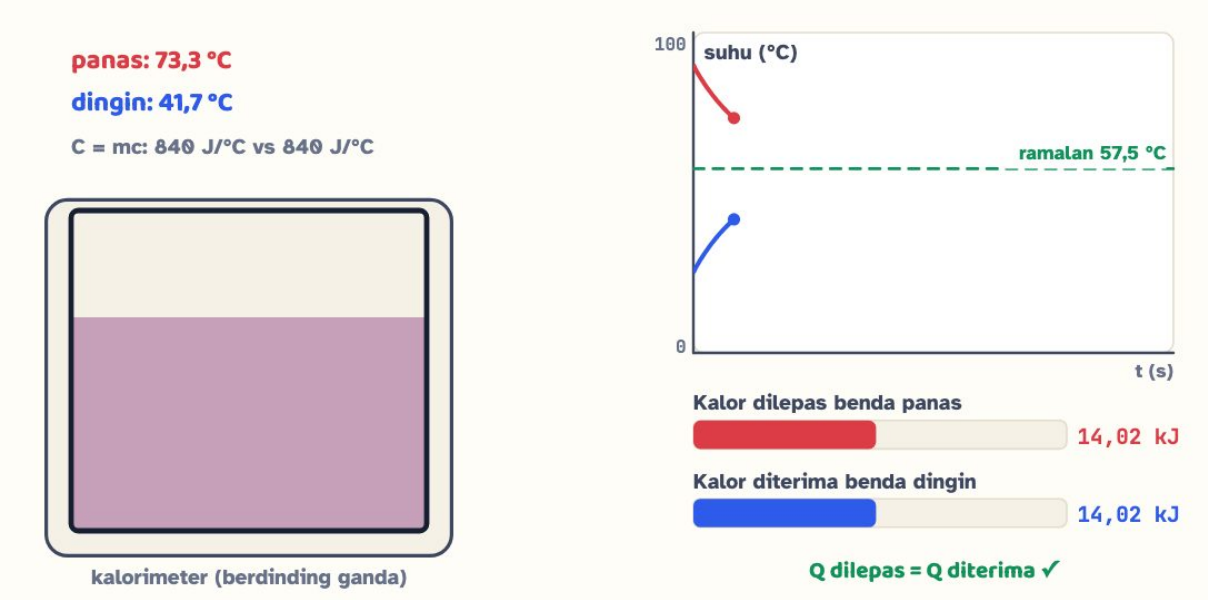
Mencampur **4** kg air **100** °C dengan **20** kg air **27** °C menghasilkan air **39,2** °C (jika tidak ada kalor yang bocor).

Cek satuan: Rumus ini khusus untuk zat sejenis (kalor jenis sama). Untuk zat berbeda, kalikan setiap massa dengan kalor jenisnya.

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

LAB MINI Lab asas Black: campurkan, lalu amati kalornya

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-15



Suhu benda panas	Suhu benda dingin	Ramalan asas Black
73,3 °C	41,7 °C	57,5 °C

Keadaan
Kalor mengalir panas → dingin

Pilih benda panas dan benda dingin, lalu tekan **Campurkan!** Grafik menunjukkan suhu keduanya. Batang di bawah membandingkan kalor yang **dilepas** dan yang **diterima**. Coba es batu. Lalu nyalakan "kalorimeter bocor": apa bedanya dengan ramalan teori?

KERJAKAN BERSAMA Air mandi hangat untuk adik

Ember mandi berisi 20 kg air bersuhu 27 °C. Berapa kilogram air mendidih (100 °C) yang harus dituangkan agar suhu air mandi menjadi 40 °C? Abaikan kalor yang diserap ember dan udara.

1. Air mendidih melepas kalor: $Q_{\text{lepas}} = m \cdot c\,(100 - 40) = 60\,mc$.
2. Air ember menerima kalor: $Q_{\text{terima}} = 20 \cdot c\,(40 - 27) = 260\,c$.
3. Asas Black: $60\,mc = 260\,c \Rightarrow m = 260/60 \approx 4{,}3$ kg.

Perlu ±4,3 kg (±4,3 liter) air mendidih. Kalor jenis air saling coret, jadi tidak perlu diketahui nilainya. Hati-hati menuangnya, dan aduk dulu sebelum dicoba dengan tangan!

COBA SENDIRI **Es teh yang pas**

Raka memasukkan 50 g es batu 0 °C ke dalam 200 g teh bersuhu 30 °C. Anggap teh = air ($c = 1$ kal/g·°C, $L_f = 80$ kal/g) dan gelas tidak menyerap kalor. Apakah semua es mencair? Berapa suhu akhirnya?

1. Kalor untuk mencairkan semua es: $50 \times 80 = 4000$ kal.
2. Kalor maksimum yang bisa dilepas teh jika didinginkan sampai 0 °C: $200 \times 1 \times 30 = 6000$ kal. Karena 6000 > 4000, semua es mencair.
3. Asas Black dengan suhu akhir T: $200(30 - T) = 4000 + 50(T - 0)$.
4. $6000 - 200T = 4000 + 50T \Rightarrow 250T = 2000 \Rightarrow T = 8$ °C.

Semua es mencair dan es teh menjadi 8 °C. Perhatikan: air lelehan es (50 g) juga harus dipanaskan dari 0 °C ke 8 °C, jangan dilupakan!

TAMU DARI MASA LALU

Joseph Black (1728–1799), dosen kimia di Skotlandia, memperhatikan bahwa es yang mencair menyerap banyak kalor tanpa menjadi lebih hangat. Ia menyebutnya kalor "laten" (tersembunyi). Ia juga orang pertama yang membedakan dengan jelas antara banyaknya kalor dan suhu. Rekannya di Universitas Glasgow, James Watt, kelak menyempurnakan mesin uap (Bab 17).

15.6 Tiga jalan kalor: konduksi, konveksi, radiasi

Konduksi: estafet getaran partikel

Ujung sendok logam yang dicelupkan ke kuah bakso panas lama-lama ikut panas. Partikel di ujung panas bergetar hebat dan "menyenggol" tetangganya, yang lalu menyenggol tetangga berikutnya, seperti estafet. Pada logam, elektron bebas ikut membawa energi dengan sangat cepat. Perpindahan kalor tanpa disertai perpindahan zat ini disebut **konduksi**. Laju kalornya:

$$H = \frac{Q}{t} = \frac{k\,A\,\Delta T}{L}$$

dengan k konduktivitas termal (W/m·K), A luas penampang, ΔT beda suhu kedua ujung, dan L panjang atau tebal benda.

Bahan	k (W/m·K)	Sifat

Tembaga	±400	konduktor yang sangat baik
Aluminium	±205	
Besi	±80	konduktor
Ubin keramik, kaca	±1	penghantar sedang
Air	±0,6	penghantar buruk
Kayu	±0,1–0,2	isolator
Karpet berbulu, wol	±0,04	
Udara diam	±0,026	

Sekarang misteri ubin terpecahkan: k ubin ±25 kali k karpet. Ubin menarik kalor dari telapak kakimu jauh lebih cepat, sehingga kulitmu "melaporkan" dingin. Isolator yang baik hampir selalu menjebak **udara diam**: bulu karpet, jaket, busa, dan atap ijuk rumah adat.

COBA SENDIRI **Batang tembaga di antara uap dan es**

Batang tembaga sepanjang 50 cm dengan luas penampang 2 cm² diselimuti isolator di sisinya. Satu ujung berada di uap air mendidih (100 °C), ujung lain menempel pada es (0 °C). Berapa laju kalor yang mengalir, dan berapa gram es yang mencair tiap menit? ($k = 400$ W/m·K, $L_f = 334$ J/g)

1. $H = \dfrac{kA\Delta T}{L} = \dfrac{400 \times 2 \times 10^{-4} \times 100}{0{,}5} = 16$ W.
2. Kalor dalam satu menit: $Q = 16 \times 60 = 960$ J.
3. Es yang mencair: $m = Q/L_f = 960/334 \approx 2{,}9$ g.

Kalor mengalir 16 W, dan ±2,9 g es mencair tiap menit. Batang besi yang sama hanya menghantarkan ±3,2 W, lima kali lebih lambat.

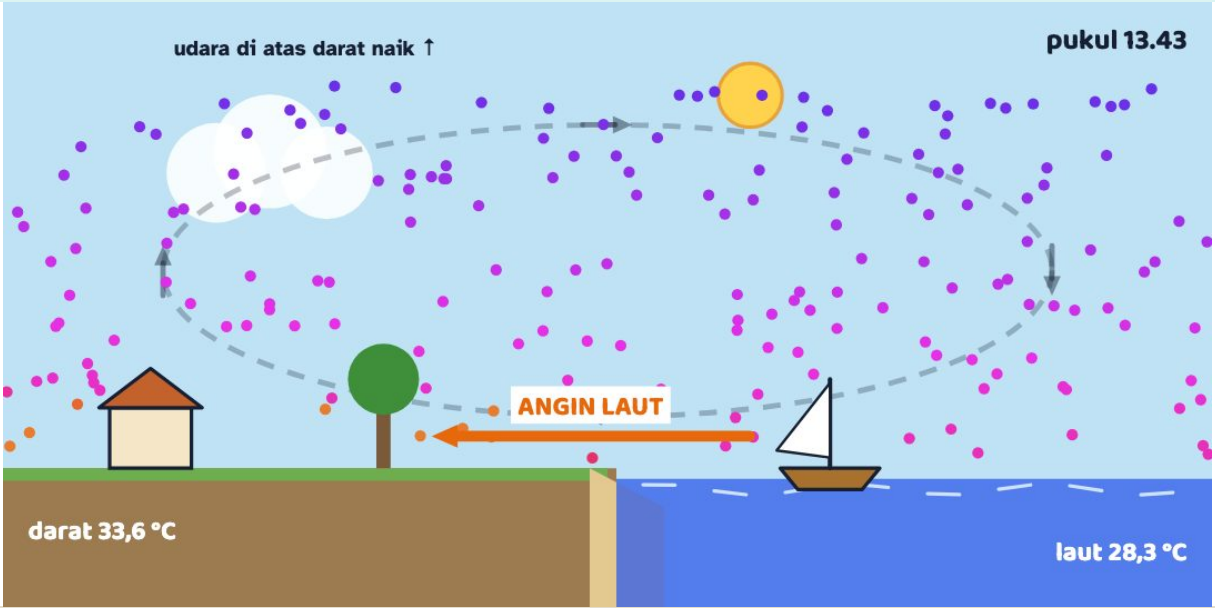
Konveksi: kalor yang menumpang

Pada zat cair dan gas, bagian yang dipanaskan memuai, menjadi kurang rapat, lalu **naik**. Bagian yang lebih dingin dan lebih rapat **turun** menggantikannya. Terbentuklah arus yang membawa kalor ke mana-mana. Inilah **konveksi**: perpindahan kalor yang disertai perpindahan zat. Air di panci bergolak, asap naik di atas api unggun, dan AC dipasang tinggi di dinding agar udara dinginnya turun ke seluruh ruangan.

Konveksi raksasa terjadi setiap hari di pantai. Siang hari, daratan (kalor jenis kecil) jauh lebih cepat panas daripada laut. Udara di atas daratan memuai dan naik, lalu udara laut yang lebih sejuk mengalir ke darat: **angin laut**. Malam hari, daratan lebih cepat dingin daripada laut, sehingga arahnya berbalik: **angin darat** bertiup dari darat ke laut.

LAB MINI **Angin darat dan angin laut: putar jamnya!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-15



Pukul	Suhu darat	Suhu laut	Angin
13.43	33,6 °C	28,3 °C	Angin laut: laut → darat

Geser jam atau tekan **Jalankan** untuk memutar waktu sehari semalam. Warna partikel udara menunjukkan suhunya (biru = sejuk, ungu = sedang, oranye = hangat). Garis putus-putus menunjukkan arah putaran sel konveksi. Perhatikan arah angin di dekat permukaan dan perahu nelayan. Jam berapa angin berbalik arah?

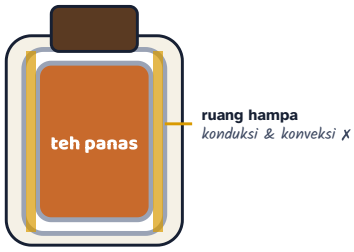
FISIKA INDONESIA: NELAYAN DAN ANGIN

Sejak dulu, nelayan tradisional di pesisir Nusantara memakai angin darat dan angin laut sebagai "mesin" gratis untuk perahu layar mereka. Mereka berangkat melaut pada **malam atau dini hari** bersama angin darat yang bertiup ke laut, lalu pulang pada **siang hari** didorong angin laut menuju pantai. Pengetahuan ini diwariskan turun-temurun, jauh sebelum ada buku fisika.

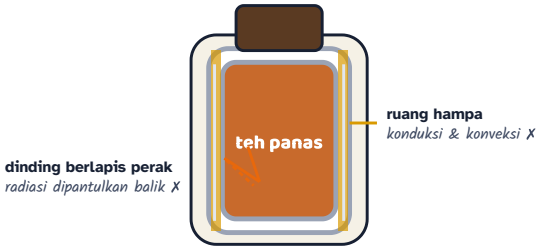
Radiasi: kalor tanpa perantara

Di antara Matahari dan Bumi ada ruang hampa sejauh 150 juta km. Tidak ada partikel untuk konduksi atau konveksi, tetapi kalor Matahari tetap sampai. Kalor ini merambat sebagai gelombang elektromagnetik, terutama cahaya tampak dan inframerah, yang disebut **radiasi**. Semua benda di atas 0 K memancarkan radiasi, termasuk tubuhmu. Permukaan hitam dan kusam adalah penyerap *dan* pemancar yang baik. Permukaan putih atau mengilap memantulkan sebagian besar radiasi.

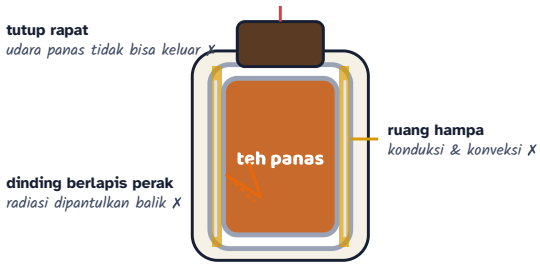
Langkah 1. Teh panas di dalam termos bisa tetap hangat berjam-jam. Padahal kalor punya tiga jalan untuk kabur: konduksi, konveksi, dan radiasi.



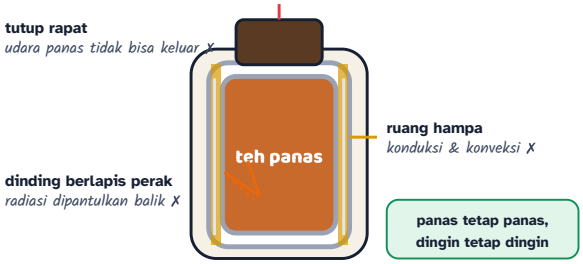
Langkah 2. Botol bagian dalam berdinding ganda, dan ruang di antaranya **hampa udara**. Tanpa partikel, konduksi dan konveksi melintasi celah itu hampir mustahil.



Langkah 3. Kedua dinding dilapisi **perak mengilap** yang memantulkan radiasi inframerah kembali ke dalam.



Langkah 4. Tutup yang rapat mencegah udara panas dan uap keluar lewat konveksi dan penguapan.



Langkah 5. Kalor hanya lolos sedikit lewat tutup dan leher botol. Termos yang sama juga menjaga es tetap dingin, karena ia menghambat kalor masuk maupun keluar. Termos vakum ditemukan James Dewar pada 1892.

MITOS

"Selimut tebal menghasilkan panas, makanya kita hangat."

FAKTA

Selimut tidak menghasilkan panas. Ia menjebak udara diam yang menghambat kalor tubuhmu keluar. Bungkus es batu dengan selimut, dan es itu justru lebih lama mencair!

MITOS

"Tutup jendelanya, nanti dinginnya masuk!"

FAKTA

Tidak ada "dingin" yang bisa masuk. Yang terjadi adalah
kalor keluar
dari ruangan atau tubuhmu yang lebih hangat. Dingin hanyalah keadaan saat kalornya sedikit.

MITOS

"Gelas es teh yang basah di luarnya pasti bocor."

FAKTA

Air itu berasal dari uap air di udara yang mengembun pada dinding gelas yang dingin. Buktinya: rasanya tawar, dan gelas berisi air es tanpa teh juga "berkeringat".

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM PENDINGINAN NEWTON

Untuk beda suhu yang tidak terlalu besar, laju pendinginan benda sebanding dengan selisih suhunya dengan lingkungan: $\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = -k\,(T - T_{\text{ling}})$. Solusinya eksponensial: $T(t) = T_{\text{ling}} + (T_0 - T_{\text{ling}})\,e^{-kt}$. Kopi panas mendingin cepat di awal, lalu makin lambat. Contoh: kopi 90 °C di ruangan 30 °C turun ke 60 °C dalam 10 menit. Selisih suhunya menjadi separuh setiap 10 menit, jadi 10 menit berikutnya kopi menjadi 45 °C, bukan 30 °C.

15.7 Radiasi benda hitam: warna rahasia benda panas

Besi yang dipanaskan pandai besi mula-mula tidak tampak berubah, tetapi terasa panas dari jauh (inframerah). Sekitar 500 °C ia membara merah redup. Makin panas, warnanya bergeser ke jingga, kuning, lalu putih. Bintang yang sangat panas bahkan tampak kebiruan. Fisikawan mempelajarinya dengan model **benda hitam**, yaitu benda ideal yang menyerap semua radiasi yang datang dan memancarkan radiasi hanya berdasarkan suhunya.

Hukum pergeseran Wien: panjang gelombang dengan pancaran paling kuat berbanding terbalik dengan suhu mutlak,

$$\lambda_{\text{maks}}\,T = b = 2{,}898 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,K}$$

RUMUS HIDUP **Hukum pergeseran Wien**

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{b}{T}$$

Makin panas benda, makin pendek panjang gelombang 'favoritnya': dari inframerah, ke merah, kuning, sampai biru.

T Suhu mutlak K

λ_{maks} Panjang gelombang puncak nm

PANJANG GELOMBANG PUNCAK

500

nm

Benda bersuhu **5.800** K paling terang pada **500** nm. Cahaya tampak berada di 380–700 nm; di atasnya inframerah, di bawahnya ultraviolet.

Cek satuan: $b = 2{,}898 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,K} = 2{,}898 \times 10^{6}\ \mathrm{nm\,K}$, jadi $\mathrm{nm\,K/K} = \mathrm{nm}$.

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

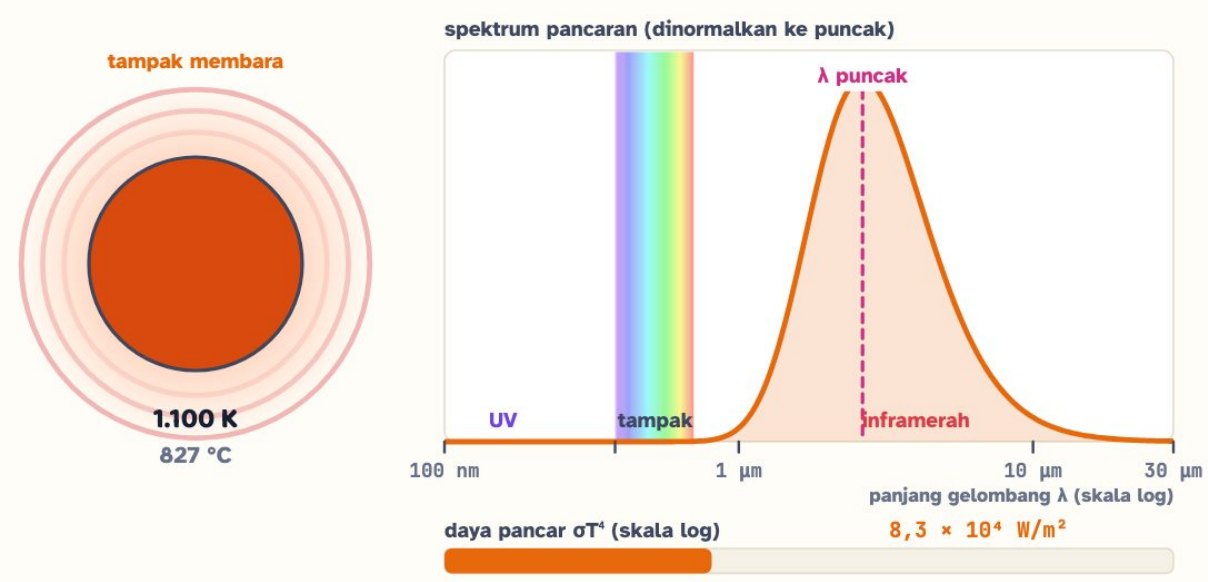
Hukum Stefan–Boltzmann: daya total yang dipancarkan sebanding dengan pangkat empat suhu mutlak,

$$P = e\,\sigma\,A\,T^4, \qquad \sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$$

dengan e emisivitas (1 untuk benda hitam sempurna, lebih kecil untuk permukaan mengilap). Suhu mutlak dinaikkan dua kali, dayanya menjadi $2^4 = 16$ kali!

LAB MINI Warna benda pijar: dari tubuhmu sampai bintang biru

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-15



λ puncak (Wien)	Daerah spektrum puncak	Daya pancar per m² (σT⁴)	Dibanding tubuhmu
2,63 µm	inframerah	$8{,}3 \times 10^4$ W/m²	159 kali

Geser suhunya atau pilih contoh. Kurva menunjukkan "spektrum" pancaran benda hitam. Perhatikan puncaknya bergeser (Wien) dan daya pancarnya melonjak (Stefan–Boltzmann). Pada suhu berapa benda mulai tampak membara?

KERJAKAN BERSAMA Membaca suhu Matahari dari warnanya

Spektrum cahaya Matahari paling terang di sekitar $\lambda = 500$ nm. (a) Perkirakan suhu permukaan Matahari. (b) Tubuh manusia bersuhu ±310 K. Di panjang gelombang berapa tubuh paling kuat memancar?

1. (a) $T = \dfrac{b}{\lambda_{\text{maks}}} = \dfrac{2{,}898 \times 10^{-3}}{500 \times 10^{-9}} \approx 5800$ K.

2. (b) $\lambda_{\text{maks}} = \dfrac{2{,}898 \times 10^{-3}}{310} \approx 9{,}3 \times 10^{-6}$ m $= 9{,}3\ \mu$m, yaitu inframerah.

Matahari ±5800 K, sedangkan tubuh kita "bersinar" dalam inframerah ±9 µm. Kamera termal dan termometer tembak dahi menangkap pancaran inilah.

Hukum yang sama menjelaskan **efek rumah kaca**. Sinar Matahari (kebanyakan cahaya tampak) menembus atmosfer dan menghangatkan permukaan Bumi. Bumi yang jauh lebih dingin memancarkan kembali energi itu sebagai inframerah (±10 µm). Gas seperti uap air dan CO_2 menyerap inframerah ini, lalu memancarkan sebagian kembali ke bawah. Bumi pun lebih hangat daripada jika tanpa atmosfer. Lebih banyak CO_2 berarti "selimut" yang lebih tebal. Kisah lengkapnya ada di Bab 34.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGHITUNG SUHU BUMI TANPA EFEK RUMAH KACA

Bumi menerima $S = 1361$ W/m² dari Matahari dan memantulkan ±30% (albedo). Daya yang diserap $S(1-a)\pi R^2$ harus sama dengan daya yang dipancarkan $4\pi R^2 \sigma T^4$. Jadi $T = \left[\frac{S(1-a)}{4\sigma}\right]^{1/4} = \left[\frac{1361 \times 0{,}7}{4 \times 5{,}67 \times 10^{-8}}\right]^{1/4} \approx 255$ K ≈ -18 °C. Kenyataannya, suhu rata-rata permukaan Bumi ±15 °C. Selisih ±33 °C itulah sumbangan efek rumah kaca alami, yang membuat Bumi layak huni. Masalah muncul saat kita menambah "selimut" ini terlalu cepat.

CATATAN JUJUR: RUMAH KACA SUNGGUHAN

Rumah kaca untuk tanaman sebenarnya hangat terutama karena kaca menahan udara panas agar tidak naik dan pergi (konveksi dihentikan). "Efek rumah kaca" di atmosfer bekerja lewat radiasi inframerah. Namanya sama, mekanismenya agak berbeda.

Kendi tanah liat

Air merembes lewat pori-pori kendi lalu menguap di permukaannya. Penguapan menyerap kalor laten, sehingga air di dalam kendi tetap sejuk tanpa kulkas.

Rice cooker

Selama air masih ada, suhu tertahan ±100 °C. Setelah air habis, suhu naik dan sakelar termal memindahkan alat ke mode hangat.

Setrika & bimetal

Keping bimetal melengkung saat panas dan memutus arus, lalu menyambung lagi saat dingin. Suhu setrika terjaga sesuai pilihan bahan kain.

Gagang panci

Badan panci dari aluminium (konduktor) agar cepat panas, gagangnya dari kayu atau plastik (isolator) agar aman dipegang.

Atap ijuk dan rumbia

Serat atap tradisional menjebak banyak udara diam, sehingga rumah adat tetap sejuk di siang hari tanpa AC.

Termometer tembak dahi

Termometer ini membaca radiasi inframerah dari kulit, lalu menghitung suhunya dengan hukum radiasi benda hitam. Tidak perlu menyentuh!

Cek Cepat

Kalor 21.000 J diberikan pada 0,5 kg air ($c = 4200$ J/kg·°C). Kenaikan suhunya adalah…

- 5 °C
- 10 °C
- 20 °C
- 42 °C

Saat es sedang melebur pada 0 °C dan terus dipanaskan, suhunya…

- naik perlahan
- naik cepat
- turun sedikit
- tetap 0 °C sampai semua es mencair

Pada siang hari di pantai, angin bertiup dari…

- laut ke darat, karena daratan lebih cepat panas
- darat ke laut, karena daratan lebih cepat panas
- laut ke darat, karena laut lebih cepat panas
- darat ke laut, karena laut lebih cepat panas

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: siapa paling cepat mencairkan es?

Bahan: dua es batu sama besar, sendok logam (atau tutup kaleng), talenan kayu atau plastik, stopwatch HP.

1. Biarkan sendok logam dan talenan di ruangan yang sama selama 10 menit, supaya suhunya sama. Sentuh keduanya: mana yang terasa lebih dingin?
2. Letakkan satu es batu di atas permukaan logam dan satu lagi di atas talenan, bersamaan.
3. Catat waktu sampai masing-masing es mencair separuhnya.

Pertanyaan: Es mana yang mencair lebih cepat? Mengapa permukaan yang terasa *lebih dingin* justru mencairkan es *lebih cepat*? (Petunjuk: ingat misteri ubin dan karpet.)

RINGKASAN KILAT — Bab 15 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan **suhu** dan **kalor**, serta mengubah skala Celsius, Fahrenheit, Reamur, dan Kelvin
- menghitung **pemuaian** dan menjelaskan celah rel serta keping bimetal
- memakai $Q = mc\Delta T$, **kalor laten** $Q = mL$, dan **asas Black** untuk soal campuran
- menjelaskan **konduksi, konveksi, radiasi**, termasuk angin darat dan angin laut
- memakai hukum **Wien** dan **Stefan–Boltzmann** untuk benda pijar, tubuh manusia, dan Matahari

Istilah kunci

Suhu · Kalor · kesetimbangan termal · koefisien muai panjang · kalor jenis · kapasitas kalor · kalor laten · asas Black · kalorimeter · konduksi · konveksi · radiasi · benda hitam · efek rumah kaca

Rumus penting

$$X = X_b + \frac{t_C}{100}\,(X_d - X_b)$$

Termometer skala apa saja. Cari dulu 'berapa persen perjalanan' dari titik beku ke titik didih, lalu terapkan pada skala lain.

$$\Delta L = \alpha\, L_0\, \Delta T$$

Pemuaian panjang. Pertambahan panjang = koefisien muai × panjang awal × kenaikan suhu. Kecil, tetapi bisa membengkokkan rel!

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

Kalor untuk menaikkan suhu. Kalor = massa × kalor jenis × kenaikan suhu. Air yang banyak dan 'rakus kalor' butuh energi besar.

$$T_c = \frac{m_1\,T_1 + m_2\,T_2}{m_1 + m_2}$$

Suhu campuran air panas + air dingin. Untuk zat sejenis, suhu campuran adalah rata-rata suhu yang 'ditimbang' dengan massa.

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{b}{T}$$

Hukum pergeseran Wien. Makin panas benda, makin pendek panjang gelombang 'favoritnya': dari inframerah, ke merah, kuning, sampai biru.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Menaikkan suhu dari 20 °C menjadi 40 °C bukan berarti "dua kali lebih panas".

⛰️ 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=15

🧩 Teka-teki untuk Bab 16

Pagi hari sebelum mudik, ban motor Raka diisi angin sampai 29 psi. Siang harinya, setelah ratusan kilometer di bawah terik matahari, alat ukur menunjukkan 33 psi, padahal tidak ada angin yang ditambahkan. Dari mana datangnya "tekanan tambahan" itu?

▼ **Intip petunjuk**

Udara di dalam ban adalah miliaran triliun molekul yang terus menabrak dinding ban. Saat ban panas, apa yang terjadi pada kelajuan molekul-molekul itu dan seberapa keras mereka menabrak? Jawabannya ada di Bab 16: Teori Kinetik Gas.

BAB 16 · FLUIDA & PANAS

16 Teori Kinetik Gas: Miliaran Bola Kecil yang Tak Pernah Diam

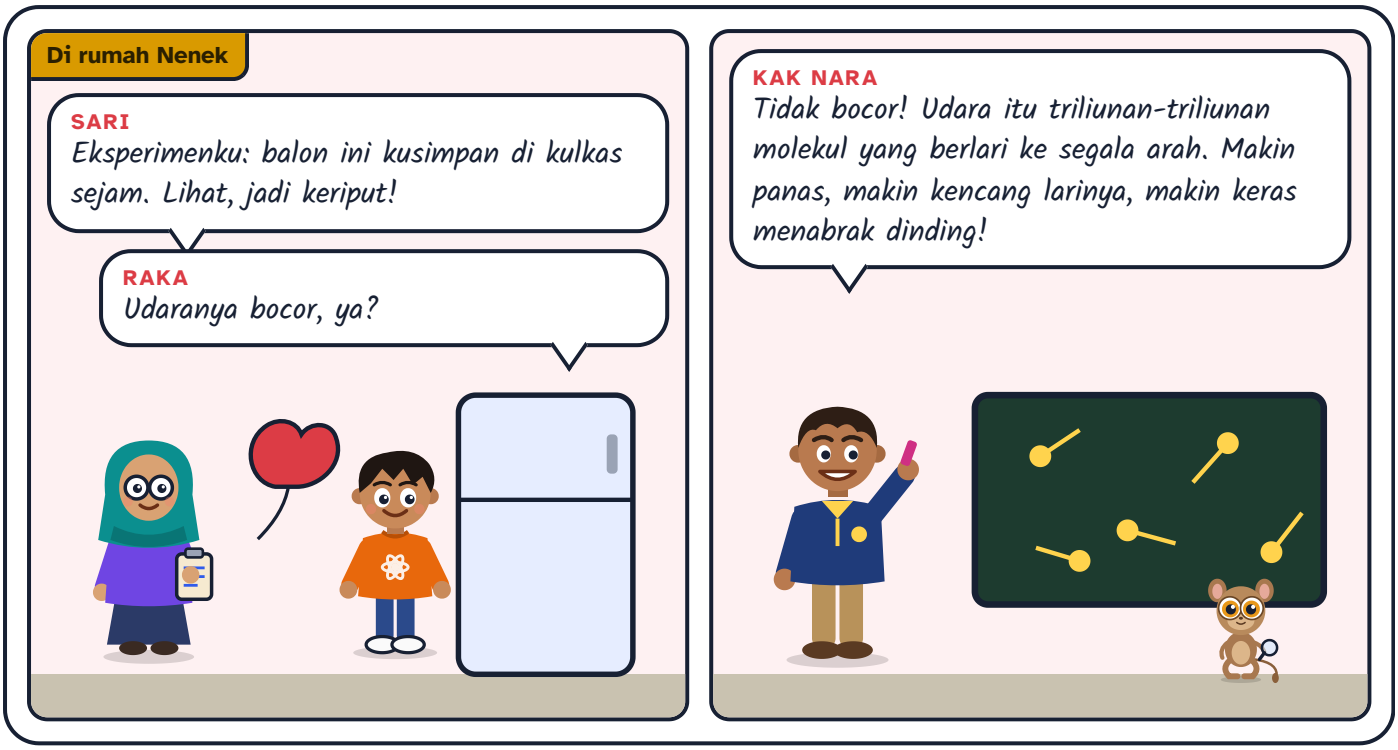
Ban motor lebih keras pada siang hari. Balon mengerut di dalam kulkas. Di balik semua itu ada triliunan-triliunan molekul udara yang berlari secepat peluru dan terus bertabrakan.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan gas sebagai kumpulan partikel kecil yang bergerak acak dan bertumbukan;
- memakai hukum **Boyle**, **Charles**, **Gay-Lussac**, dan persamaan gas ideal $PV = nRT$;
- menjelaskan **tekanan** gas sebagai akibat tumbukan molekul pada dinding;
- menghubungkan **suhu** dengan energi kinetik rata-rata molekul dan menghitung **kecepatan rms**;
- (Lanjut) memakai **derajat kebebasan** untuk menghitung energi dalam gas.

MISTERI BAN DAN BALON

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Balon yang disimpan di kulkas mengerut, lalu kembali menggembung setelah dikeluarkan beberapa menit. Penjelasan terbaiknya adalah...

- Udara bocor lewat pori-pori karet, lalu masuk lagi.
- Molekul-molekul udara menyusut saat dingin dan membesar lagi saat hangat.
- Molekul bergerak lebih lambat saat dingin sehingga tumbukannya pada dinding balon lebih lemah dan lebih jarang.
- Udara dingin lebih berat sehingga turun ke dasar balon.

Jawabannya: molekulnya melambat. Jumlah molekul di dalam balon tetap. Ukuran molekul juga tidak berubah. Yang berubah adalah kelajuannya. Molekul yang lebih lambat menabrak dinding balon lebih jarang dan lebih lemah, sehingga "dorongan dari dalam" berkurang dan karet menarik balon mengecil. Saat dihangatkan, molekul kembali ngebut dan balon menggembung lagi.

16.1 Model gas ideal: bola-bola kecil yang bertumbukan

Kita tidak bisa melihat molekul udara, tetapi kita bisa membuat **model**, lalu mengujinya dengan percobaan. Teori kinetik gas memakai model **gas ideal** dengan anggapan berikut:

1. Gas terdiri atas sangat banyak partikel (atom atau molekul) yang sangat kecil dibandingkan jarak antarpartikel.
2. Partikel bergerak **acak** ke segala arah dengan berbagai kelajuan, dan mematuhi hukum Newton.
3. Tumbukan antarpartikel dan dengan dinding bersifat **lenting sempurna** (energi kinetik total tetap).
4. Tidak ada gaya tarik-menarik antarpartikel, kecuali saat bertumbukan.

Seberapa "ramai" dunia molekul itu? Satu liter udara di ruang kelasmu berisi sekitar $2{,}5 \times 10^{22}$ molekul. Rata-rata kelajuannya sekitar 500 m/s, lebih cepat daripada pesawat jet! Setiap molekul menabrak molekul lain beberapa miliar kali per detik, dan hanya menempuh jarak ±70 nm di antara dua tumbukan.

Bahasa sederhana · Gampangnya: bayangkan gas sebagai **kelereng-kelereng super kecil** yang tidak pernah diam, terus berlarian dan saling bertabrakan di dalam wadah. Makin panas gasnya, makin kencang kelereng itu berlari.

✏️ **TRIK KAK NARA: KENAPA AROMA RENDANG TIDAK LANGSUNG TERCIUM?**

Kalau molekul berlari 500 m/s, mengapa aroma rendang dari dapur baru tercium beberapa detik kemudian? Karena molekul aroma terus bertabrakan dengan molekul udara dan arahnya berubah-ubah, seperti orang yang mencoba keluar dari pasar yang sangat padat. Gerak zig-zag ini disebut **difusi**. Lajunya cepat, tetapi kemajuannya lambat!

Mol dan bilangan Avogadro

Karena jumlah molekul sangat besar, kimiawan dan fisikawan menghitungnya per "lusin raksasa" bernama **mol**. Satu mol berisi $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ partikel (bilangan Avogadro). Jumlah mol $n = N/N_A$, dan massa satu mol zat disebut massa molar M: ±2 g/mol untuk H_2, 28 g/mol untuk N_2, 32 g/mol untuk O_2, dan ±29 g/mol untuk udara.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Pada 1827, ahli botani Robert Brown melihat butiran-butiran halus dari dalam serbuk sari di dalam air bergerak gemetar tanpa henti di bawah mikroskop. Hampir 80 tahun kemudian, pada 1905, Albert Einstein menjelaskan bahwa butiran itu "ditendang" dari segala arah oleh molekul-molekul air yang tak terlihat. Jean Perrin lalu mengukurnya dan menghitung bilangan Avogadro. Inilah bukti meyakinkan pertama bahwa atom dan molekul benar-benar ada!

16.2 Hukum Boyle, Charles, dan Gay-Lussac

Keadaan sejumlah gas ditentukan oleh tiga besaran: tekanan P, volume V, dan suhu mutlak T. Jika salah satunya dibuat tetap, dua lainnya punya hubungan yang sederhana:

Hukum	Yang tetap	Hubungan	Penjelasan molekul	Contoh
Boyle (1662)	T dan jumlah gas	$PV = \text{tetap}$	volume setengahnya → molekul lebih rapat → tumbukan pada dinding dua kali lebih sering	pompa ban, suntikan yang ditutup

Charles (±1787)	P dan jumlah gas	$V/T = \text{tetap}$	molekul lebih cepat → mendorong dinding yang bisa bergeser sampai tekanannya kembali sama	balon di kulkas, balon udara panas
Gay-Lussac (1802)	V dan jumlah gas	$P/T = \text{tetap}$	molekul lebih cepat → tumbukan lebih sering dan lebih keras	ban pada siang hari, botol tertutup di dalam mobil yang dijemur

⚠️ **AWAS JEBAKAN: WAJIB KELVIN!**

Dalam semua hukum gas, T harus dalam **kelvin**. Gas yang dipanaskan dari 27 °C menjadi 54 °C pada volume tetap **tidak** menjadi dua kali tekanannya. Dalam kelvin, suhunya naik dari 300 K ke 327 K, sehingga tekanannya hanya naik 9%.

Tebak Dulu!

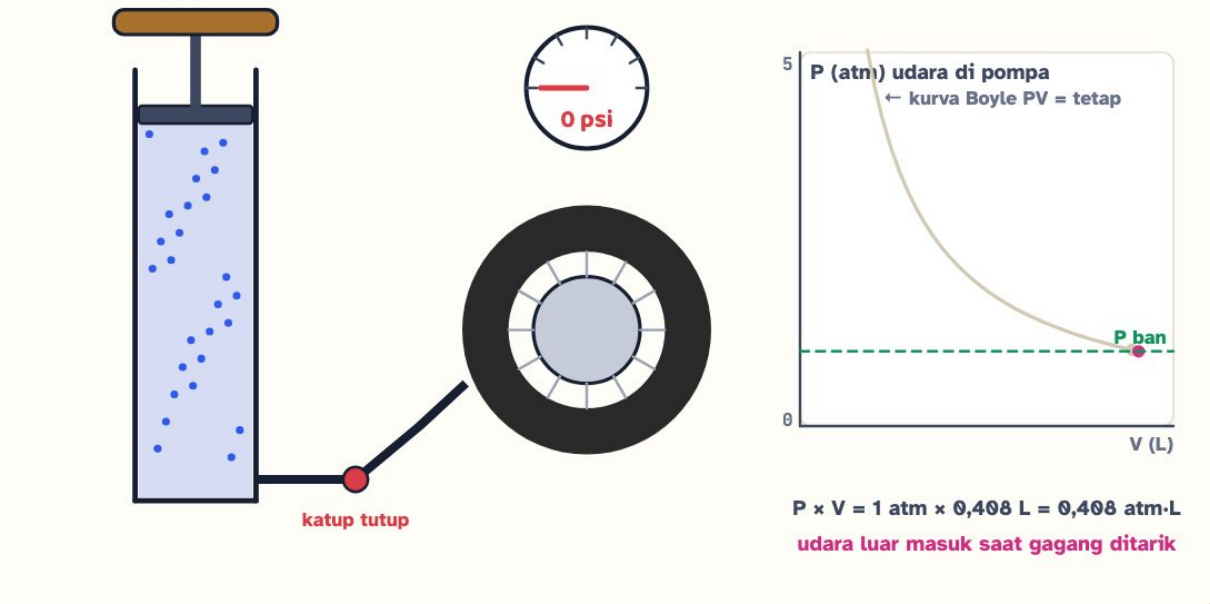
Gas dalam tabung tertutup (volume tetap) bertekanan 100 kPa pada 27 °C. Gas dipanaskan sampai 327 °C. Berapa tekanannya sekarang?

- Sekitar 1.200 kPa, karena suhunya naik 12 kali.
- Tetap 100 kPa, karena volumenya tidak berubah.
- Sekitar 109 kPa.
- 200 kPa.

Jawabannya: 200 kPa. Ubah ke kelvin: 27 °C = 300 K dan 327 °C = 600 K. Suhu mutlaknya tepat dua kali, jadi menurut Gay-Lussac tekanannya juga dua kali: $P_2 = 100 \times \frac{600}{300} = 200$ kPa. Menghitung dengan derajat Celsius memberi jawaban yang konyol.

LAB MINI **Pompa ban: hukum Boyle di tanganmu**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-16



Tekanan udara pompa	Tekanan ban (alat ukur)	Jumlah pompaan	Katup
101 kPa	0 psi	0	tertutup

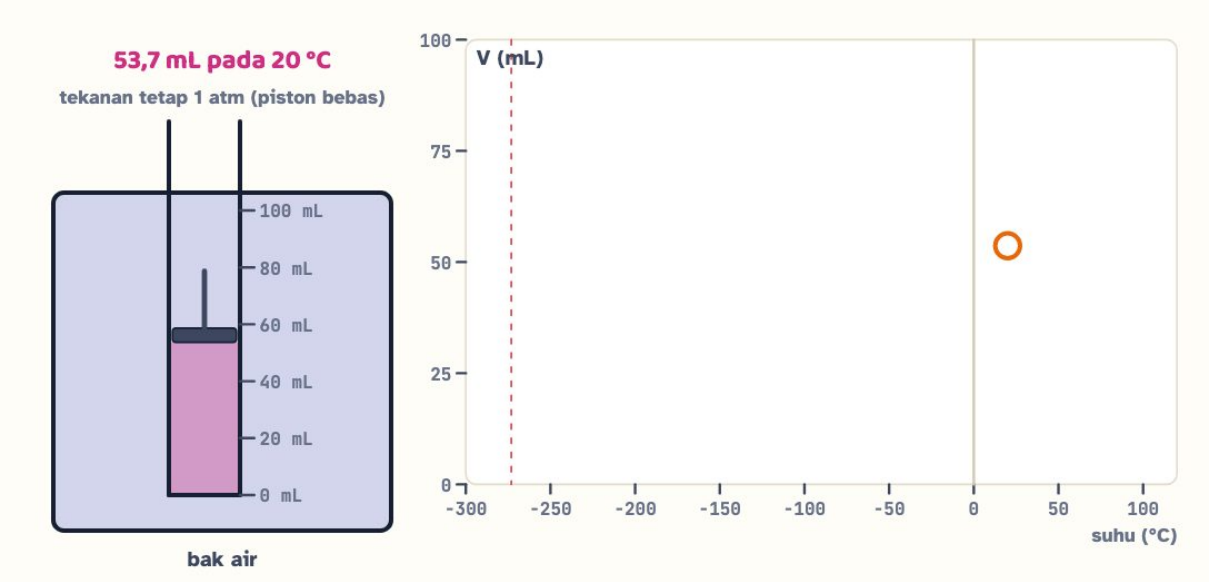
Seret gagang pompa ke bawah, atau tekan tombol pompa. Grafik P–V menunjukkan udara di dalam tabung pompa: mula-mula mengikuti kurva Boyle PV = tetap, lalu katup terbuka saat tekanannya melebihi tekanan ban. Berapa kali memompa sampai ban mencapai 40 psi?

Menemukan suhu nol mutlak

Jika volume gas pada tekanan tetap diukur pada beberapa suhu, titik-titiknya membentuk garis lurus. Perpanjang garis itu ke arah volume nol. Ajaibnya, garis untuk gas apa pun, dengan jumlah berapa pun, memotong sumbu suhu di titik yang sama: sekitar **–273 °C**. Itulah **nol mutlak**, titik nol skala kelvin. (Gas sungguhan sudah mencair sebelum mencapai suhu itu, tetapi garisnya tetap menunjuk ke sana.)

LAB MINI **Detektif nol mutlak: perpanjang garisnya!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-16



Suhu	Suhu mutlak	Volume gas	Titik potong garis
20 °C	293 K	53,7 mL	–

Atur suhu bak air, lalu tekan **Catat data** pada paling sedikit tiga suhu berbeda. Ganti jumlah gas dan ulangi. Tekan **Tarik garis**: di mana semua garis bertemu?

TAMU DARI MASA LALU

Robert Boyle menerbitkan hukumnya pada 1662 setelah percobaan dengan tabung kaca berbentuk J berisi air raksa. Jacques Charles, yang juga perintis balon udara hidrogen, menemukan hubungan volume dan suhu sekitar 1787 tetapi tidak menerbitkannya. Joseph Louis Gay-Lussac menerbitkannya pada 1802, lengkap dengan hukum tekanan dan suhu. Gay-Lussac bahkan pernah naik balon sampai ketinggian ±7 km untuk mengambil sampel udara!

FISIKA INDONESIA: BOTOL PENYOK DARI DIENG

Tutup rapat botol plastik kosong di Dataran Tinggi Dieng (±2.000 m), lalu bawa turun ke pantai. Botol itu akan penyok! Di Dieng tekanan udara ±80 kPa, sedangkan di pantai ±101 kPa. Udara di luar botol menekan lebih kuat. Hukum Boyle memperkirakan volume udara di dalam botol ingin menyusut ±20%. Telingamu juga merasakan hal yang sama saat berkendara turun gunung atau saat pesawat mendarat.

16.3 Persamaan gas ideal: $PV = nRT$

Ketiga hukum tadi bisa digabung menjadi satu persamaan untuk jumlah gas yang tetap:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Percobaan menunjukkan bahwa konstanta PV/T sebanding dengan jumlah mol gas, apa pun jenis gasnya. Hasilnya adalah **persamaan gas ideal**:

$$PV = nRT = NkT$$

dengan $R = 8{,}31$ J/mol·K (tetapan gas umum) dan $k = R/N_A = 1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K (tetapan Boltzmann). Pada 0 °C dan 1 atm, satu mol gas apa pun menempati ±22,4 liter. Pada 25 °C, ±24,5 liter.

RUMUS HIDUP **Persamaan gas ideal**

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Lebih banyak gas atau lebih panas → tekanan naik. Ruang lebih lega → tekanan turun.

n Jumlah gas mol | T Suhu mutlak K | V Volume L | P Tekanan kPa

TEKANAN
101,3
kPa

1 mol gas pada **273** K di dalam wadah **22,4** L menekan **101,3** kPa. (Tekanan udara di pantai ±101 kPa.)

Cek satuan: $\frac{\text{mol} \cdot \text{J/(mol K)} \cdot \text{K}}{\text{L}} = \frac{\text{J}}{10^{-3}\,\text{m}^3} = 10^3\,\text{Pa} = \text{kPa}$. Praktis: liter di penyebut langsung memberi kPa.

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

⚠️ **AWAS JEBAKAN: TEKANAN ALAT UKUR ≠ TEKANAN MUTLAK**

Alat ukur ban di bengkel menunjukkan **tekanan terukur** (*gauge*), yaitu kelebihan tekanan di atas tekanan udara luar. Ban yang "kempis total" menunjukkan 0 psi, padahal di dalamnya masih ada udara bertekanan 1 atm (±14,7 psi). Rumus gas hanya berlaku untuk **tekanan mutlak** = tekanan terukur + tekanan udara luar.

RUMUS HIDUP **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.

- P_1 Tekanan ban pagi (alat ukur) psi
- t_1 Suhu udara ban pagi °C
- t_2 Suhu udara ban siang °C
- P_2 Tekanan ban siang (alat ukur) psi

TEKANAN BAN SIANG (ALAT UKUR)

33,4

psi

Ban **29** psi pada **27** °C menjadi **33,4** psi saat udaranya **57** °C, tanpa tambahan angin sedikit pun.

Cek satuan: Volume ban dianggap tetap. 1 atm ≈ 14,7 psi ≈ 101 kPa.

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

CONTOH **Suntikan yang ditutup**

Sebuah suntikan (tanpa jarum) berisi 60 mL udara bertekanan 1 atm. Ujungnya ditutup jari, lalu pendorongnya ditekan perlahan sampai volumenya 20 mL. Jika suhu tetap, berapa tekanan udara di dalamnya?

1. Suhu tetap → hukum Boyle: $P_1V_1 = P_2V_2$.
2. $P_2 = \frac{P_1V_1}{V_2} = \frac{1 \times 60}{20} = 3$ atm.

Tekanannya 3 atm. Volume menjadi sepertiga, tekanan menjadi tiga kali. Jarimu akan merasakan dorongan yang makin kuat.

KERJAKAN BERSAMA **Ban motor saat mudik**

Pagi hari (27 °C), alat ukur menunjukkan tekanan ban 29 psi. Setelah perjalanan, udara di dalam ban mencapai 57 °C. Anggap volume ban tetap dan tekanan udara luar 14,7 psi. Berapa angka pada alat ukur sekarang?

1. Tekanan mutlak pagi: $P_1 = 29 + 14{,}7 = 43{,}7$ psi. Suhu: $T_1 = 300$ K, $T_2 = 330$ K.
2. Gay-Lussac: $P_2 = P_1 \dfrac{T_2}{T_1} = 43{,}7 \times \dfrac{330}{300} = 48{,}1$ psi (mutlak).
3. Kembali ke angka alat ukur: $48{,}1 - 14{,}7 = 33{,}4$ psi.

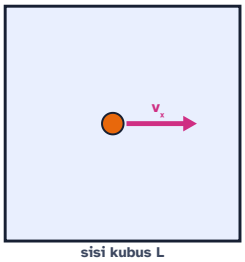
Alat ukur menunjukkan ±33 psi, persis misteri di Bab 15! Karena itu, ukur dan isi angin ban saat ban masih dingin, dan jangan mengurangi angin ban yang panas.

FISIKA INDONESIA: BALON UDARA TRADISIONAL WONOSOBO

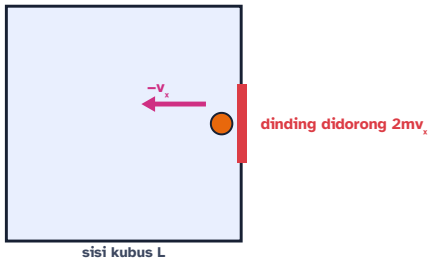
Setiap musim Lebaran, warga Wonosobo dan Pekalongan menerbangkan balon udara tradisional dari kertas. Udara di dalam balon dipanaskan, memuai, dan menjadi kurang rapat (hukum Charles), sehingga balon terangkat oleh gaya apung (Bab 13). Namun balon liar tanpa tali bisa terbang ke jalur pesawat dan membahayakan penerbangan. Kini balon diterbangkan dalam festival dengan **ditambatkan tali** dan diawasi petugas. Fisika yang indah, dengan cara yang aman!

16.4 Tekanan: hujan tumbukan molekul

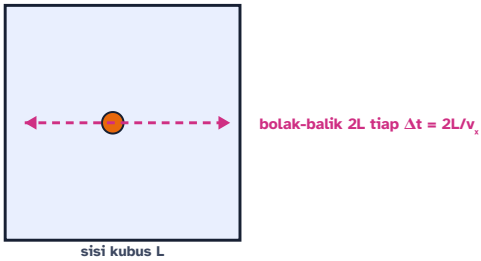
Tekanan gas pada dinding ban bukan dorongan yang mulus. Tekanan itu adalah "hujan" miliaran-miliaran tumbukan kecil setiap detik. Setiap molekul yang memantul dari dinding memberi dorongan kecil, dan rata-rata semua dorongan itulah tekanan. Mari kita hitung!



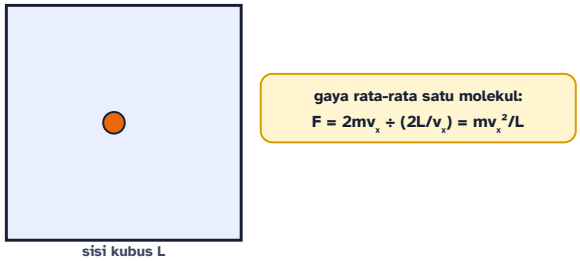
Langkah 1. Satu molekul bermassa m di dalam kubus bersisi L. Komponen kecepatannya ke arah dinding kanan adalah v_x.



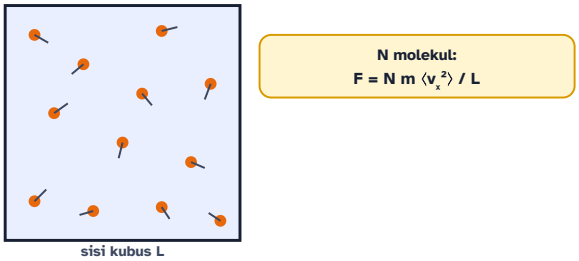
Langkah 2. Molekul memantul lenting dari dinding: v_x menjadi $-v_x$. Momentumnya berubah $-2mv_x$, jadi dinding menerima dorongan (impuls) $2mv_x$.



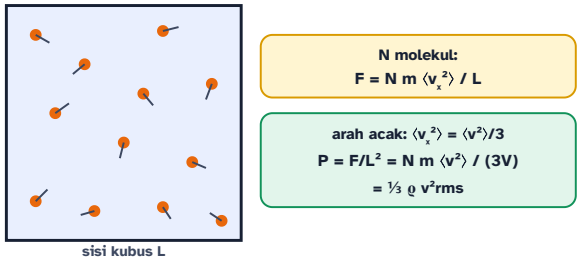
Langkah 3. Molekul bolak-balik menempuh $2L$ sebelum menabrak dinding yang sama lagi, sehingga selang waktu antartumbukan $\Delta t = 2L/v_x$.



Langkah 4. Gaya rata-rata dari satu molekul = impuls ÷ selang waktu $= \dfrac{2mv_x}{2L/v_x} = \dfrac{mv_x^2}{L}$.



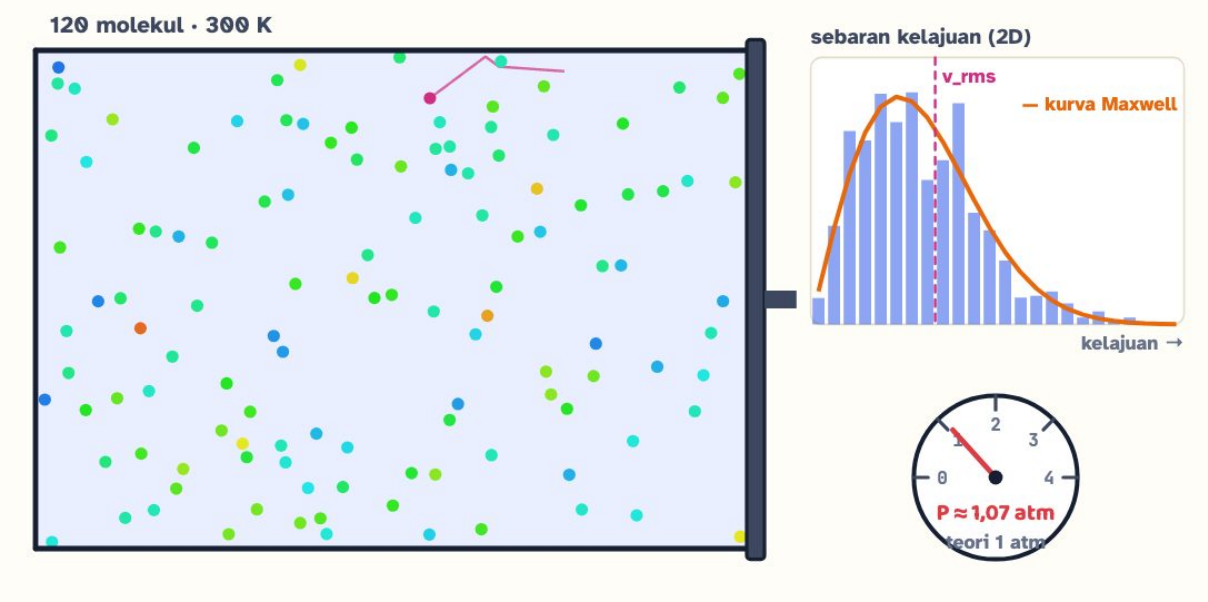
Langkah 5. Untuk N molekul, jumlahkan semuanya: $F = \dfrac{Nm\langle v_x^2\rangle}{L}$, dengan $\langle v_x^2\rangle$ rata-rata kuadrat kecepatan arah x.



Langkah 6. Karena geraknya acak, tidak ada arah istimewa: $\langle v_x^2\rangle = \langle v_y^2\rangle = \langle v_z^2\rangle = \frac{1}{3}\langle v^2\rangle$. Tekanan $P = F/L^2$ dan $V = L^3$, sehingga $P = \dfrac{Nm\langle v^2\rangle}{3V} = \frac{1}{3}\rho\, v_{\text{rms}}^2$.

LAB MINI **Kotak gas: lihat tekanan lahir dari tumbukan**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-16



P terukur (tumbukan)	P teori (PV = NkT)	v_rms gas sungguhan	E_k rata-rata
1,07 atm	1 atm	517 m/s	$6{,}21 \times 10^{-21}$ J

Setiap titik adalah molekul. "P terukur" dihitung langsung dari tumbukan pada dinding, lalu dibandingkan dengan teori $PV = NkT$. Naikkan suhu, perkecil volume, tambah molekul, atau ganti jenis gas. Tekan **Samakan semua kelajuan**, lalu amati histogramnya kembali ke bentuk lonceng miring (sebaran Maxwell).

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Gas memuai saat dipanaskan **bukan** karena molekulnya membesar. Ukuran molekul tetap. Yang bertambah adalah kelajuannya, sehingga molekul mendorong dinding lebih kuat dan, jika dindingnya bisa bergeser, ruang yang ditempati gas bertambah.

16.5 Suhu adalah energi kinetik rata-rata

Bandingkan dua rumus tekanan: $PV = NkT$ (dari percobaan) dan $PV = \frac{1}{3}Nm\langle v^2\rangle$ (dari model tumbukan). Keduanya harus sama, sehingga $\frac{1}{3}m\langle v^2\rangle = kT$. Kalikan dengan $\frac{3}{2}$:

$$\overline{E_k} = \frac{1}{2}m\langle v^2\rangle = \frac{3}{2}\,k\,T$$

Inilah salah satu hasil terindah fisika: **suhu mutlak adalah ukuran energi kinetik rata-rata molekul**. Pada suhu yang sama, molekul gas apa pun, ringan atau berat, punya energi kinetik rata-rata yang sama. Molekul hidrogen yang ringan berlari jauh lebih cepat daripada oksigen yang berat, tetapi energi kinetik rata-ratanya sama.

RUMUS HIDUP **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!

T Suhu mutlak K

$\overline{E_k}$ Energi kinetik rata-rata J

ENERGI KINETIK RATA-RATA

$6{,}21 \times 10^{-21}$

J

Pada **300** K, setiap molekul gas rata-rata membawa energi gerak **$6{,}21 \times 10^{-21}$** joule. Kecil sekali, tetapi jumlah molekulnya luar biasa banyak!

Cek satuan: $\mathrm{J/K} \times \mathrm{K} = \mathrm{J}$. Jawaban boleh ditulis seperti 6,21e-21 atau 6,21×10^-21.

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

TRIK KAK NARA: SUHU = "KEHEBOHAN" RATA-RATA

Bayangkan molekul sebagai penonton konser. Suhu tidak mengukur seberapa heboh *satu* orang, tetapi kehebohan **rata-rata** semua penonton. Ada yang melompat tinggi, ada yang diam, tetapi rata-ratanya ditentukan oleh suhu. Pada nol mutlak (0 K), pesta gerak ini (secara klasik) berhenti total.

MITOS

"Pada suhu 0 °C, molekul berhenti bergerak."

FAKTA

Pada 0 °C (273 K), molekul udara masih melaju ratusan meter per detik. Gerak molekul baru mendekati nol pada nol mutlak, –273,15 °C. Bahkan di sana, fisika kuantum menyisakan sedikit "getaran titik nol".

MITOS

"Gas yang molekulnya lebih berat, misalnya CO_2, menekan dinding lebih kuat."

FAKTA

Pada suhu, volume, dan jumlah molekul yang sama, tekanannya **sama**. Molekul berat bergerak lebih lambat tetapi menabrak lebih keras. Kedua efek itu tepat saling mengimbangi, karena energi kinetik rata-ratanya sama: $\frac{3}{2}kT$.

16.6 Kecepatan rms dan sebaran Maxwell

Dari $\frac{1}{2}m\langle v^2\rangle = \frac{3}{2}kT$ kita bisa menghitung "kelajuan khas" molekul, yaitu akar dari rata-rata kuadrat kelajuan atau **kecepatan rms** (*root mean square*):

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\langle v^2\rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

dengan M massa molar dalam **kg/mol** (bukan g/mol!).

RUMUS HIDUP **Kecepatan rms molekul gas**

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Gas makin panas → makin cepat. Molekul makin berat → makin lambat (sebanding 1/√M).

T Suhu mutlak K | M Massa molar g/mol | v_{rms} Kecepatan rms m/s

KECEPATAN RMS
517
m/s

Molekul bermassa molar **28** g/mol pada **300** K melaju sekitar **517** m/s (rms).

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

Cek satuan: $\sqrt{\frac{\mathrm{J/(mol\,K)\cdot K}}{\mathrm{kg/mol}}} = \sqrt{\mathrm{J/kg}} = \sqrt{\mathrm{m^2/s^2}} = \mathrm{m/s}.$

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

Gas (300 K)	M (g/mol)	v_{rms} (m/s)
Hidrogen, H_2	2	±1.930
Helium, He	4	±1.370
Nitrogen, N_2	28	±517
Oksigen, O_2	32	±484
Karbon dioksida, CO_2	44	±412

Tentu tidak semua molekul berlari dengan kelajuan yang sama. James Clerk Maxwell (1860) menemukan **sebaran kelajuan** molekul gas: sedikit molekul yang sangat lambat, kebanyakan di sekitar nilai tengah, dan "ekor" panjang molekul yang sangat cepat. Saat suhu naik, puncak kurvanya bergeser ke kanan dan kurvanya

melebar. Kelajuan paling mungkin v_p, kelajuan rata-rata $\bar{v}$, dan v_{rms} berbanding $1 : 1{,}13 : 1{,}22$. Lihat histogram di Lab Kotak Gas!

COBA SENDIRI **Mengapa Bumi kehilangan hidrogen?**

Di lapisan atmosfer paling atas, suhu bisa mencapai ±1.000 K. (a) Hitung v_{rms} molekul H_2 ($M = 2$ g/mol) di sana. (b) Berapa kali lebih cepat H_2 dibanding O_2 pada suhu yang sama? (c) Kecepatan lepas Bumi 11,2 km/s. Mengapa H_2 perlahan-lahan lolos ke antariksa, sedangkan O_2 tidak?

1. (a) $v_{\text{rms}} = \sqrt{\dfrac{3 \times 8{,}31 \times 1000}{0{,}002}} \approx 3{,}5 \times 10^3$ m/s.
2. (b) $\dfrac{v_{H_2}}{v_{O_2}} = \sqrt{\dfrac{M_{O_2}}{M_{H_2}}} = \sqrt{\dfrac{32}{2}} = 4$ kali.
3. (c) Rata-ratanya memang hanya ±1/3 kecepatan lepas. Tetapi sebaran Maxwell punya "ekor" molekul yang jauh lebih cepat. Selama jutaan tahun, H_2 di ekor itu terus lolos. Untuk O_2 yang 4 kali lebih lambat, ekor itu praktis kosong.

Itulah sebabnya atmosfer Bumi hampir tidak mengandung hidrogen dan helium bebas, sedangkan planet raksasa seperti Jupiter (gravitasinya jauh lebih kuat) tetap menyimpannya. Bulan, dengan kecepatan lepas hanya 2,4 km/s, bahkan hampir tidak punya atmosfer.

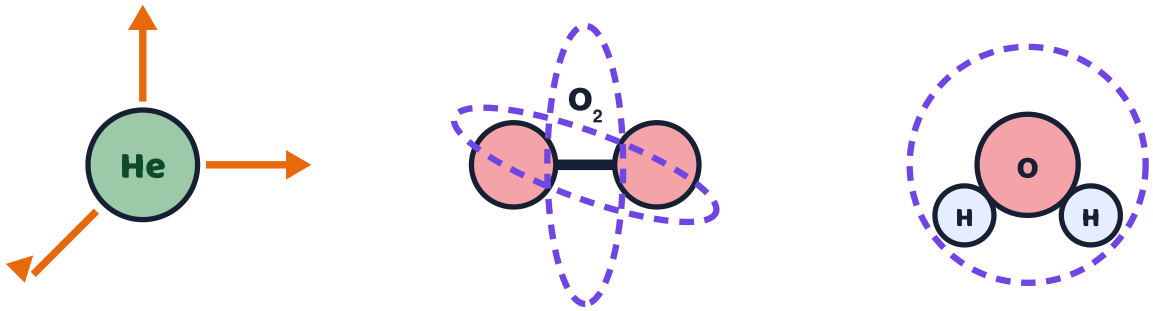
FAKTA UNIK DARI TARSI

Kelajuan bunyi di udara (±343 m/s) ternyata tidak jauh dari v_{rms} molekul udara (±500 m/s). Itu bukan kebetulan: bunyi "dititipkan" dari molekul ke molekul lewat tumbukan, jadi bunyi tidak mungkin merambat lebih cepat daripada molekul pembawanya. Di Bab 19, kamu akan melihat $v_{\text{bunyi}} = \sqrt{\gamma RT/M}$, sangat mirip dengan v_{rms}!

16.7 Derajat kebebasan dan energi dalam

Molekul tidak hanya bisa berpindah tempat. Molekul yang terdiri atas dua atom atau lebih juga bisa **berputar**, dan pada suhu tinggi bisa **bergetar**. Setiap cara bebas untuk menyimpan energi disebut **derajat kebebasan** f.

Bahasa sederhana · Gampangnya: gas monoatomik seperti helium hanya bisa "berlari". Gas diatomik seperti oksigen bisa berlari *dan* berputar seperti barbel yang dilempar, sehingga menyimpan lebih banyak energi pada suhu yang sama.



monoatomik: f = 3
3 translasi

diatomik: f = 5
3 translasi + 2 rotasi

poliatomik tak linear: f = 6
3 translasi + 3 rotasi

Derajat kebebasan pada suhu kamar. Getaran ikatan baru "aktif" pada suhu tinggi.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

TEOREMA EKIPARTISI ENERGI

Pada kesetimbangan, setiap derajat kebebasan kuadratik menyimpan rata-rata $\frac{1}{2}kT$ per molekul. Jadi energi dalam gas ideal adalah

$$U = \frac{f}{2}NkT = \frac{f}{2}nRT$$

Contoh: 1 mol udara (diatomik, $f = 5$) pada 300 K menyimpan $U = \frac{5}{2} \times 8{,}31 \times 300 \approx 6{,}2$ kJ. Kalor jenis molar pada volume tetap adalah $C_V = \frac{f}{2}R$, pada tekanan tetap $C_P = C_V + R$ (hubungan Mayer), dan perbandingannya $\gamma = C_P/C_V = 1 + \frac{2}{f}$: 1,67 untuk gas monoatomik, 1,40 untuk diatomik, dan ±1,33 untuk poliatomik. Angka γ ini akan menjadi bintang di Bab 17 (proses adiabatik) dan Bab 19 (kelajuan bunyi).

LANJUT · OLIMPIADE

KAPAN GAS TIDAK IDEAL?

Model gas ideal mulai meleset saat tekanan sangat tinggi (molekul berdesakan, sehingga volume molekul sendiri tidak bisa diabaikan) atau suhu sangat rendah (gaya tarik antarmolekul mulai berperan, dan gas hampir mengembun). Van der Waals (1873) memperbaikinya: $\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$. Suku a mewakili tarikan antarmolekul, suku b mewakili volume molekul. Udara pada kondisi sehari-hari menyimpang kurang dari ±0,1% dari gas ideal.

Ban saat mudik

Ukur tekanan ban saat ban masih dingin. Ban panas menunjukkan angka lebih tinggi, jadi jangan buang anginnya.

Panci presto

Tutupnya rapat sehingga uap terkurung. Saat dipanaskan, tekanan di dalamnya naik, terutama karena makin banyak air yang menguap (mirip semangat hukum Gay-Lussac). Air pun mendidih di atas 100 °C dan daging cepat empuk.

Kaleng semprot

Jangan menjemur atau membakar kaleng semprot! Gas di dalamnya bervolume tetap, jadi suhu tinggi menaikkan tekanannya sampai kaleng bisa meledak.

Telinga berdengung

Saat pesawat turun, tekanan udara luar naik, sedangkan udara di telinga tengah masih bertekanan rendah. Gendang telinga terdorong ke dalam sampai kamu menelan atau menguap.

Kompresor tambal ban

Kompresor memampatkan udara ke dalam tangki. Udara itu lalu mengisi ban sampai tekanan mutlaknya ±2–3 kali tekanan udara luar.

Balon udara tradisional

Udara panas di dalam balon lebih renggang daripada udara luar, sehingga balon terangkat. Terbangkan hanya dengan tambatan tali, demi keselamatan penerbangan.

Cek Cepat

Gas dalam ruang tertutup dipanaskan pada volume tetap. Tekanannya naik karena...

- molekul gas bertambah banyak
- molekul gas membesar
- molekul bergerak lebih cepat sehingga menumbuk dinding lebih sering dan lebih keras
- molekul saling menarik lebih kuat

Pada suhu yang sama, molekul hidrogen (M = 2 g/mol) dibandingkan molekul oksigen (M = 32 g/mol) memiliki...

- energi kinetik rata-rata sama, kecepatan rms 4 kali lebih besar
- energi kinetik rata-rata 16 kali lebih besar
- kecepatan rms sama
- kecepatan rms 16 kali lebih besar

Udara dalam pompa sepeda bervolume 400 mL bertekanan 100 kPa. Jika ujungnya ditutup dan udara ditekan perlahan menjadi 100 mL, tekanannya menjadi...

- 25 kPa
- 400 kPa
- 200 kPa
- 100 kPa

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. B

🧪 Tantangan Rumah: balon yang menggembung sendiri

Bahan: botol plastik kosong (bukan botol kaca, yang bisa retak karena perubahan suhu mendadak), balon, dua baskom, air keran, air panas dari termos (minta bantuan orang dewasa, hati-hati tersiram!), es batu.

1. Pasang mulut balon yang kempis pada mulut botol kosong (botol berisi udara).
2. Rendam botol di baskom berisi air panas (±60 °C) selama 2 menit. Amati balonnya.
3. Pindahkan botol ke baskom berisi air dan es batu. Amati lagi.

Pertanyaan: Hukum gas yang mana yang bekerja? Jika suhu udara naik dari 27 °C ke 60 °C pada tekanan hampir tetap, berapa persen volumenya bertambah? (Petunjuk: pakai kelvin.)

⚡ RINGKASAN KILAT **Bab 16 dalam 3 menit**

✅ **Kamu sekarang bisa...**

- menjelaskan gas sebagai kumpulan partikel kecil yang bergerak acak dan bertumbukan
- memakai hukum **Boyle**, **Charles**, **Gay-Lussac**, dan persamaan gas ideal $PV = nRT$
- menjelaskan **tekanan** gas sebagai akibat tumbukan molekul pada dinding
- menghubungkan **suhu** dengan energi kinetik rata-rata molekul dan menghitung **kecepatan rms**
- (Lanjut) memakai **derajat kebebasan** untuk menghitung energi dalam gas

🔑 Istilah kunci

gas ideal · difusi · mol · nol mutlak · persamaan gas ideal · kecepatan rms · sebaran kelajuan · derajat kebebasan

🧮 Rumus penting

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Persamaan gas ideal. Lebih banyak gas atau lebih panas → tekanan naik. Ruang lebih lega → tekanan turun.

$$P_2 + 14{,}7 = (P_1 + 14{,}7)\,\frac{t_2 + 273}{t_1 + 273}$$

Tekanan ban motor saat siang hari (volume dianggap tetap). Ubah ke tekanan mutlak dan kelvin dulu, pakai Gay-Lussac, lalu kembalikan ke angka alat ukur.

$$\overline{E_k} = \tfrac{3}{2}\,k\,T$$

Energi kinetik rata-rata satu molekul. Suhu mutlak dua kali → energi kinetik rata-rata dua kali. Jenis gasnya tidak berpengaruh!

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Kecepatan rms molekul gas. Gas makin panas → makin cepat. Molekul makin berat → makin lambat (sebanding $1/\sqrt{M}$).

⚠️ Jangan sampai terjebak

- Dalam semua hukum gas, T harus dalam kelvin.
- Alat ukur ban di bengkel menunjukkan tekanan terukur (gauge), yaitu kelebihan tekanan di atas tekanan udara luar.
- Gas memuai saat dipanaskan bukan karena molekulnya membesar.

⛰️ 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=16

Teka-teki untuk Bab 17

Saat kamu memompa ban sepeda dengan cepat, ujung bawah pompa terasa hangat, padahal tidak ada api. Sebaliknya, saat obat nyamuk atau deodoran disemprotkan lama, kalengnya terasa dingin. Dari mana panas itu datang, dan ke mana ia pergi?

▼ Intip petunjuk

Menekan piston berarti melakukan **usaha** pada gas, dan usaha itu menambah energi kinetik molekul, jadi suhunya naik. Gas yang mengembang keluar dari kaleng melakukan usaha dan kehilangan energi. Hubungan antara kalor, usaha, dan energi dalam inilah Hukum I Termodinamika di Bab 17.

BAB 17 · FLUIDA & PANAS

17 Termodinamika: Mengubah Panas Menjadi Gerak

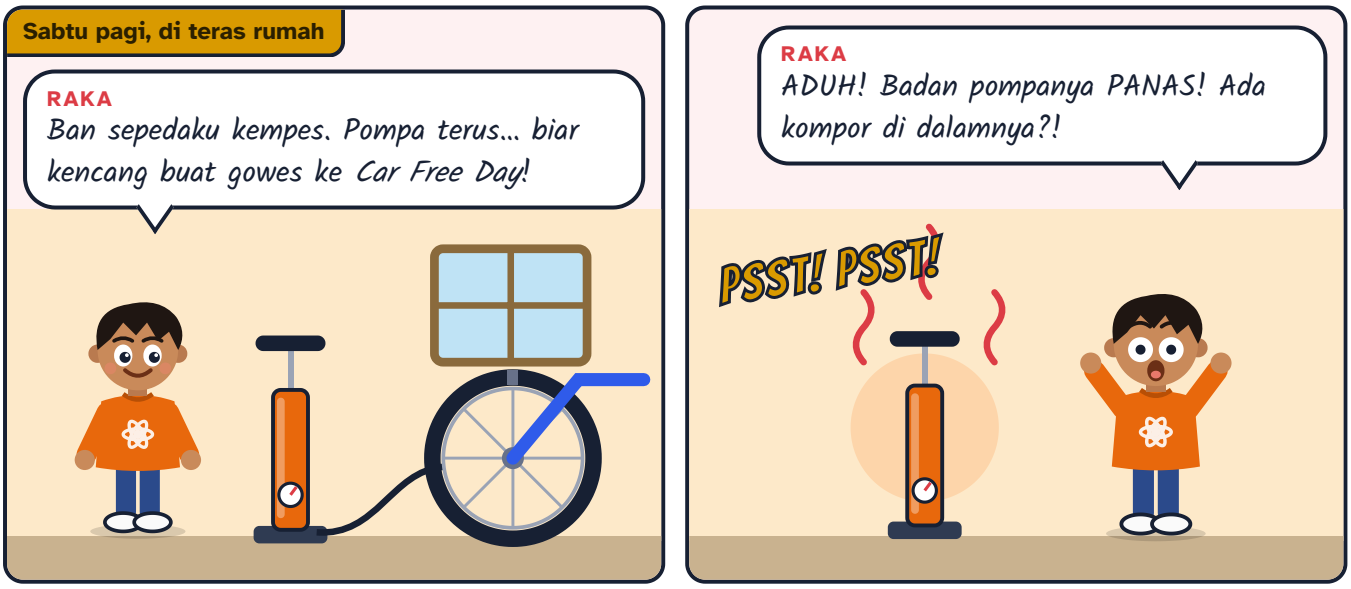
Kenapa pompa sepeda jadi hangat saat dipakai? Kenapa kulkas justru membuang panas di belakangnya? Dua hukum termodinamika menjawab semuanya, dan keduanya tidak pernah bisa diakali.

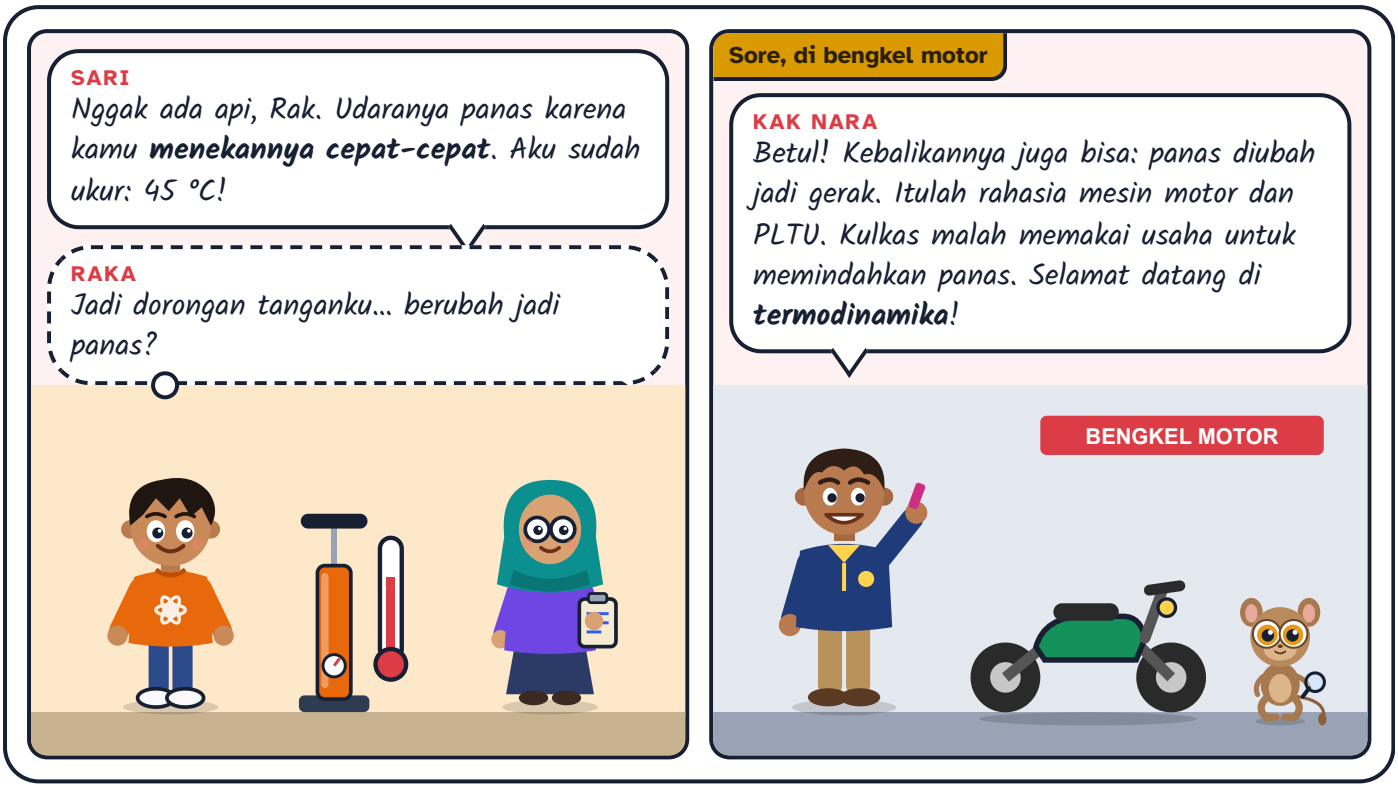
Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan **sistem** dan **lingkungan**, lalu memakai **hukum ke-0** untuk menjelaskan cara kerja termometer;
- menghitung **usaha gas** sebagai luas di bawah kurva pada **diagram P–V**;
- memakai **Hukum I** $\Delta U = Q - W$ pada proses isobarik, isokhorik, isotermal, dan adiabatik;
- menghitung **efisiensi** mesin kalor, efisiensi **Carnot**, dan **COP** kulkas atau AC;
- menjelaskan **Hukum II** dan **entropi** dengan contoh sehari-hari.

POMPA SEPEDA YANG DEMAM

KOMIK · 4 PANEL





Tebak Dulu!

Kamu menekan piston pompa sepeda dengan sangat cepat sehingga kalor belum sempat keluar. Apa yang terjadi pada suhu udara di dalam pompa?

- Tetap, karena tidak ada api atau sumber panas.
- Turun, karena udara yang dimampatkan menjadi lebih padat.
- Naik, karena usaha dari tanganmu menambah energi dalam udara.
- Naik, tetapi semata-mata karena gesekan piston dengan dinding.

Jawabannya: naik, karena usaha berubah menjadi energi dalam. Piston yang bergerak ke dalam memukul molekul-molekul udara sehingga molekul itu memantul lebih cepat. Molekul yang lebih cepat berarti suhu lebih tinggi. Gesekan memang ikut menyumbang sedikit, tetapi penyebab utamanya adalah *pemampatan*. Inilah inti bab ini: **kalor dan usaha adalah dua cara memindahkan energi**.

17.1 Sistem, lingkungan, dan hukum ke-0

Termodinamika adalah ilmu tentang **energi, kalor, dan usaha**. Langkah pertamanya selalu sama: pilih bagian alam yang ingin dipelajari. Bagian itu disebut **sistem**, misalnya udara di dalam pompa. Semua yang ada di luarnya disebut **lingkungan**, misalnya tanganmu, badan pompa, dan udara teras.

Jenis sistem	Energi bisa keluar-masuk?	Materi bisa keluar-masuk?	Contoh
Terbuka	ya	ya	panci tanpa tutup berisi air mendidih (uap keluar)
Tertutup	ya	tidak	udara di dalam pompa yang ujungnya ditutup jari, kaleng minuman tersegel di kulkas
Terisolasi	tidak (idealnya)	tidak	termos yang sangat bagus (mendekati, tidak pernah sempurna)

Dua benda yang bersentuhan akan bertukar kalor sampai suhunya sama. Keadaan akhir ini disebut **kesetimbangan termal**. Dari pengamatan inilah lahir hukum yang paling mendasar.

Hukum ke-0 termodinamika. Jika benda A setimbang termal dengan C, dan B juga setimbang termal dengan C, maka A setimbang termal dengan B.

Kedengarannya sepele, tetapi inilah alasan **termometer** bisa dipercaya. Termometer berperan sebagai benda C. Saat dokter menempelkan termometer di ketiakmu, termometer menyesuaikan suhunya dengan tubuhmu. Angka yang terbaca menjadi "juru bicara" suhu tubuhmu.

Bahasa sederhana · Gampangnya: kalau es teh dan gelasnya dibiarkan lama, suhunya jadi sama. Termometer bekerja dengan cara yang sama. Ia "ikut-ikutan" suhu benda yang disentuhnya, lalu menunjukkan angkanya.

TAMU DARI MASA LALU

Hukum ke-0 justru dirumuskan **paling belakang**. Hukum I dan II sudah terkenal sejak abad ke-19. Sekitar tahun 1930-an, fisikawan Inggris Ralph Fowler menyadari ada aturan yang lebih mendasar daripada keduanya. Karena nomor 1 dan 2 sudah terpakai, ia menamainya **hukum ke-nol**. Hasilnya, termodinamika menjadi salah satu ilmu yang hitungannya dimulai dari nol!

Energi dalam: tabungan energi molekul

Molekul gas selalu bergerak, berputar, dan bertumbukan. Jumlah seluruh energi gerak molekul itu disebut **energi dalam** U. Untuk gas ideal, energi dalam hanya bergantung pada **suhu**. Suhu naik berarti U naik, dan suhu turun berarti U turun.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DERAJAT KEBEBASAN & EKUIPARTISI

Teorema ekuipartisi menyatakan bahwa setiap *derajat kebebasan* molekul menyimpan energi rata-rata $\frac{1}{2}kT$. Gas monoatomik (He, Ne, Ar) hanya bisa bergerak lurus ke tiga arah, sehingga $f = 3$. Gas diatomik seperti N_2 dan O_2 (udara) pada suhu kamar juga bisa berputar terhadap dua sumbu, sehingga $f = 5$. Energi dalam gas ideal:

$$U = \frac{f}{2}\,nRT.$$

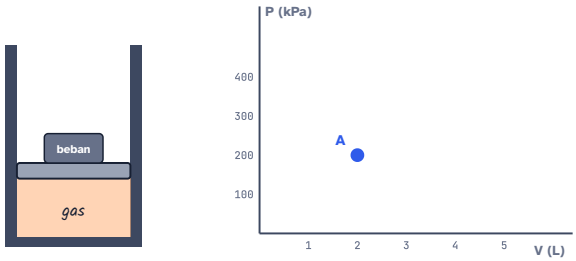
Akibatnya, kalor jenis molar pada volume tetap adalah $C_V = \frac{f}{2}R$.

17.2 Usaha gas dan diagram P–V

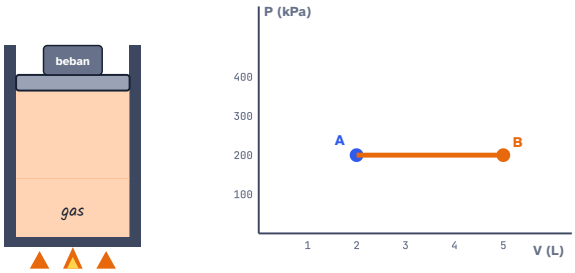
Gas bertekanan P mendorong piston seluas A dengan gaya $F = PA$. Jika piston bergeser sejauh Δx, usaha yang dilakukan gas adalah $W = F\,\Delta x = PA\,\Delta x$. Karena $A\,\Delta x$ adalah perubahan volume, kita dapat rumus yang ringkas: $W = P\,\Delta V$.

- Gas **memuai** ($\Delta V > 0$): gas mendorong lingkungan, W **positif**.
- Gas **dimampatkan** ($\Delta V < 0$): lingkungan mendorong gas, W **negatif**.
- Volume **tetap**: $W = 0$, seberapa pun tekanannya berubah.

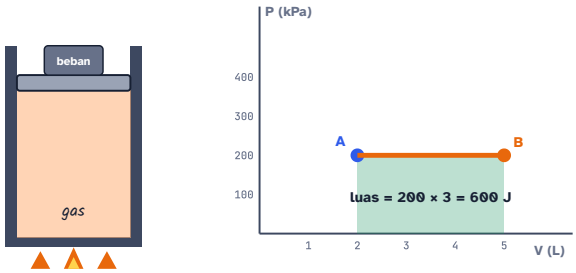
Fisikawan suka menggambar keadaan gas sebagai titik pada **diagram P–V** (tekanan terhadap volume). Ikuti animasi ini untuk melihat mengapa usaha selalu sama dengan **luas**.



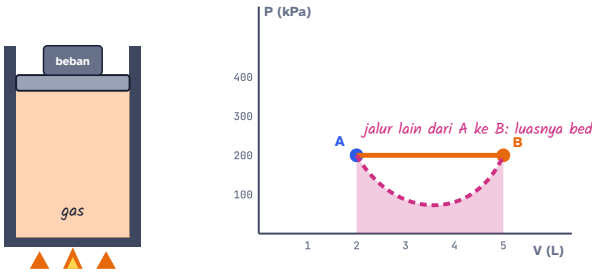
Langkah 1. Gas di dalam silinder bertekanan 200 kPa dan bervolume 2 L. Keadaan ini menjadi titik A pada diagram P–V.



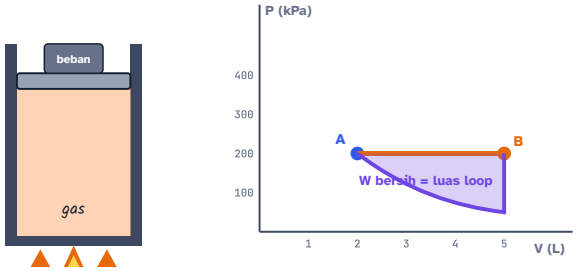
Langkah 2. Gas dipanaskan pelan-pelan. Beban di atas piston tidak berubah, jadi **tekanan tetap** (isobarik). Piston naik dan volume bertambah menjadi 5 L (titik B).



Langkah 3. Usaha gas $W = P\,\Delta V = 200\ \mathrm{kPa} \times 3\ \mathrm{L} = 600$ J. Perhatikan: angka ini persis **luas persegi panjang** di bawah garis AB.



Langkah 4. Jika gas berpindah dari A ke B lewat jalur lain (misalnya melengkung), luas di bawahnya berbeda. Jadi **usaha bergantung pada jalur**, bukan hanya titik awal dan akhir.



Langkah 5. Jika gas kembali ke A lewat jalur bawah, usaha saat kembali bernilai negatif. Usaha bersih satu putaran = **luas di dalam loop**. Inilah cara kerja semua mesin kalor!

RUMUS HIDUP

Usaha gas pada tekanan tetap

$$W = P\,(V_2 - V_1)$$

Usaha gas = tekanan × perubahan volume. Memuai → positif, dimampatkan → negatif.

- P Tekanan gas kPa
- V_1 Volume awal L
- V_2 Volume akhir L
- W Usaha oleh gas J

USAHA OLEH GAS

600

J

Gas bertekanan **200** kPa berubah volume dari **2** L menjadi **5** L, sehingga usaha gas = **600** J. Positif berarti gas mendorong piston keluar, negatif berarti gas ditekan.

Satuan Nusantara: ≈ 14% dari 1 kkal (kalori makanan)

Cek satuan: $1\,\mathrm{kPa} \times 1\,\mathrm{L} = 10^3\,\mathrm{Pa} \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3 = 1\,\mathrm{J}$

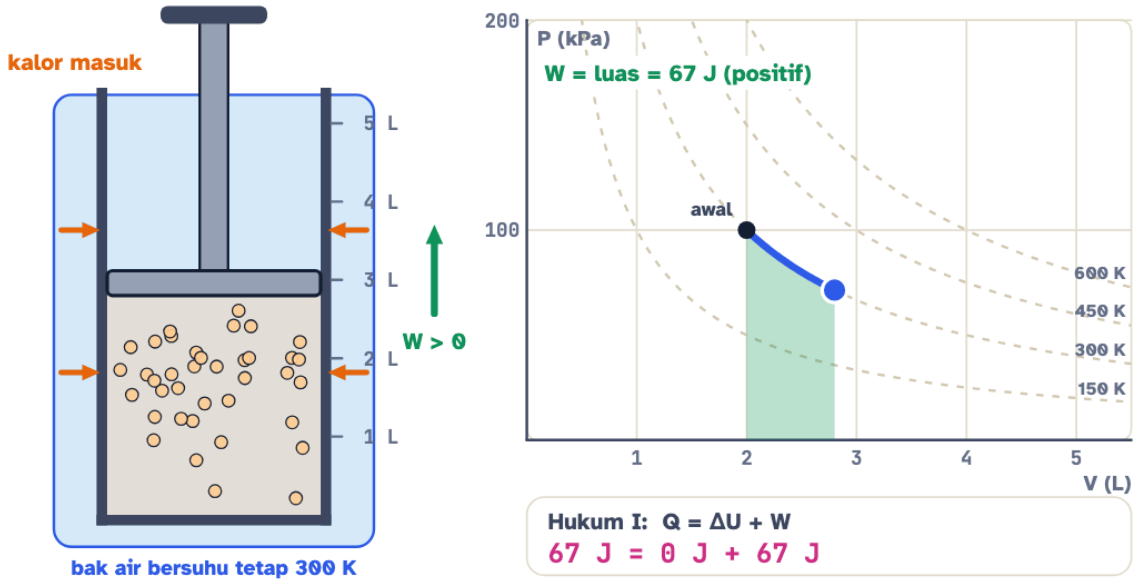
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-TERMO-USAHA

✏️ **TRIK KAK NARA: KPA × L = J**

Malas mengubah satuan? Ingat pasangan ajaib ini: **kilopascal dikali liter langsung menghasilkan joule**, karena $10^3 \times 10^{-3} = 1$. Jadi 150 kPa × 4 L = 600 J, tanpa repot menulis pangkat sepuluh.

LAB MINI **Silinder piston: lihat usaha menjadi luas**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-17



Tekanan P	Volume V	Suhu T	Usaha gas W	Kalor masuk Q
71 kPa	2,8 L	300 K	67 J	67 J

Perubahan energi dalam ΔU
0 J

Pilih proses, lalu tekan **Jalankan** atau **seret piston** naik-turun. Bandingkan pemuaian *isotermal* dan *adiabatik* ke volume yang sama: jejak yang tersimpan memperlihatkan luas (usaha) mana yang lebih besar. Perhatikan juga warna molekul: makin merah, makin panas.

⚠ **AWAS JEBAKAN**

"Tekanan gas naik, pasti gas melakukan usaha." **Salah.** Usaha gas hanya ada jika **volumenya berubah**. Tabung gas LPG yang terjemur di bawah terik matahari tekanannya naik, tetapi volumenya tetap, sehingga $W = 0$. Semua kalor yang masuk hanya menaikkan energi dalamnya (dan itu sebabnya tabung gas tidak boleh dijemur!).

17.3 Hukum I termodinamika: energi tidak pernah hilang

Energi dalam gas bisa berubah lewat dua "pintu": **kalor** Q (energi yang berpindah karena beda suhu) dan **usaha** W (energi yang berpindah karena gaya menggeser sesuatu). Hukum I adalah hukum kekekalan energi versi termodinamika.

Hukum I termodinamika. Perubahan energi dalam sama dengan kalor yang diterima sistem dikurangi usaha yang dilakukan sistem: $\Delta U = Q - W$.

Bayangkan energi dalam sebagai **saldo dompet digital** gas. Kalor yang masuk itu seperti uang saku yang ditransfer ($+Q$). Usaha yang dilakukan gas itu seperti uang yang dipakai jajan ($+W$ berarti uang keluar). Saldo akhir berubah sebesar uang masuk dikurangi uang keluar.

Besaran	Positif (+) jika...	Negatif (−) jika...
Kalor Q	sistem **menerima** kalor (dipanaskan)	sistem **melepas** kalor (didinginkan)
Usaha W	gas **memuai**, melakukan usaha pada lingkungan	gas **dimampatkan**, menerima usaha dari lingkungan
ΔU	suhu gas **naik**	suhu gas **turun**

RUMUS HIDUP **Hukum I termodinamika**

$$\Delta U = Q - W$$

Perubahan energi dalam = kalor yang masuk − usaha yang dikeluarkan gas.

Q Kalor masuk J | W Usaha oleh gas J | ΔU Perubahan energi dalam J

PERUBAHAN ENERGI DALAM

500

J

Gas menerima kalor **800** J dan melakukan usaha **300** J, sehingga energi dalamnya berubah **500** J. Positif berarti gas makin panas, negatif berarti gas makin dingin.

Cek satuan: semua suku bersatuan joule (J). Dulu kalor diukur dalam kalori: 1 kal ≈ 4,2 J.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-TERMO-HUKUM1

⚠️ **AWAS JEBAKAN TANDA**

Buku kimia (dan sebagian buku fisika) menulis $\Delta U = Q + W$. Itu **bukan** hukum yang berbeda. Di sana W berarti usaha yang dilakukan **pada** gas, bukan **oleh** gas. Sebelum menghitung, selalu cek: W milik siapa? Di buku ini, W selalu usaha **oleh** gas.

TAMU DARI MASA LALU

Dulu orang mengira kalor adalah zat tak terlihat bernama *kalorik*. James Prescott Joule (1818–1889), putra pemilik pabrik bir di Inggris, membuktikan sebaliknya. Ia menjatuhkan beban yang memutar kincir kecil di dalam air, lalu mengukur kenaikan suhu air dengan teliti. Hasilnya: usaha mekanis sekitar **4,2 joule** selalu menghasilkan kenaikan suhu yang sama dengan **1 kalori** kalor. Konon, saat bulan madu di Pegunungan Alpen, Joule membawa termometer untuk memeriksa apakah air di dasar air terjun lebih hangat daripada di puncaknya!

CONTOH **Gas dalam silinder dipanaskan**

Gas dalam silinder menerima kalor 1.200 J dari kompor. Gas memuai dan mendorong piston dengan usaha 500 J. Berapa perubahan energi dalamnya?

1. Kalor masuk: $Q = +1.200$ J. Gas memuai: $W = +500$ J.
2. $\Delta U = Q - W = 1.200 - 500 = 700$ J.

Energi dalam naik 700 J, jadi suhu gas naik. Dari 1.200 J kalor, 500 J "dibelanjakan" untuk mendorong piston dan 700 J "ditabung" sebagai energi dalam.

COBA SENDIRI **Air terjun Sipiso-piso**

Air Terjun Sipiso-piso di Sumatra Utara tingginya sekitar 120 m. Jika seluruh energi potensial air berubah menjadi energi dalam air itu sendiri, berapa kenaikan suhu air di dasar air terjun? ($g = 9{,}8$ m/s², kalor jenis air $c = 4.200$ J/kg·K)

1. Tinjau 1 kg air. Energi potensialnya $mgh = 1 \times 9{,}8 \times 120 = 1.176$ J.
2. Energi ini menaikkan suhu: $mc\,\Delta T = mgh$, sehingga $\Delta T = \dfrac{gh}{c}$.
3. $\Delta T = \dfrac{9{,}8 \times 120}{4.200} \approx 0{,}28\ ^\circ\text{C}$.

Kenaikannya hanya sekitar 0,3 °C, dan pada kenyataannya tertutup oleh pendinginan karena penguapan. Pantas saja Joule kesulitan mengukurnya di air terjun!

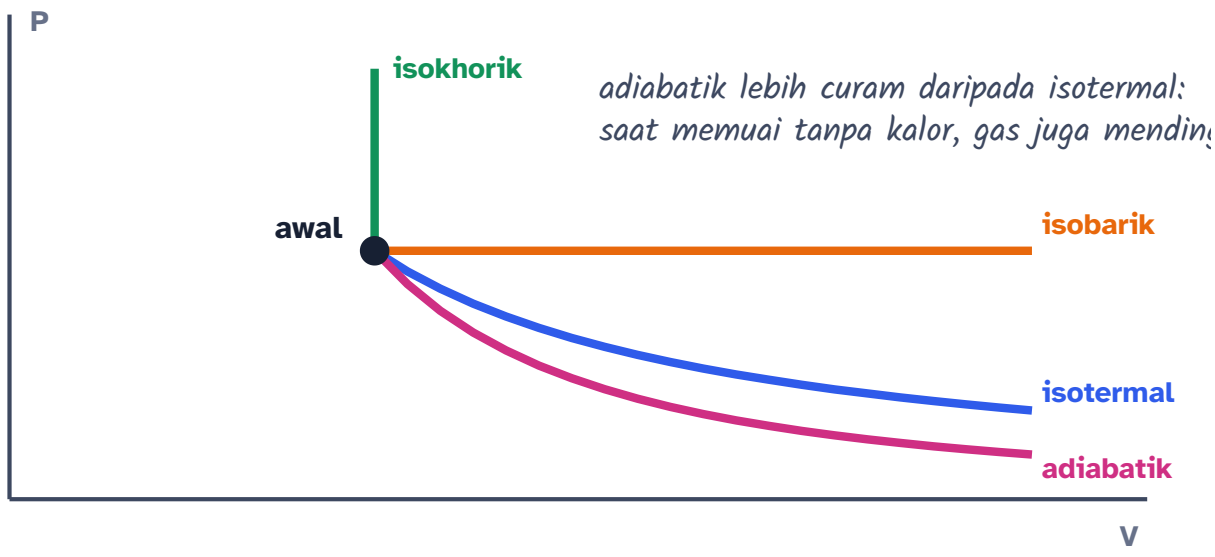
17.4 Empat proses: isobarik, isokhorik, isotermal, adiabatik

Gas bisa berubah keadaan dengan banyak cara. Empat cara istimewa punya nama sendiri, karena pada setiap proses itu ada satu hal yang dijaga **tetap**.

TRIK KAK NARA: BACA NAMANYA!

Iso artinya "sama". Iso-**bar**-ik: tekanan tetap (seperti satuan *bar*). Iso-**khor**-ik: ruang atau volume tetap. Iso-**term**-al: suhu tetap (seperti *termometer*). **A-diabatik**: kalor "tidak lewat", $Q = 0$.

Proses	Yang tetap	Usaha W	Hukum I menjadi	Contoh
Isobarik	tekanan P	$P\,\Delta V$	$Q = \Delta U + P\,\Delta V$	udara di silinder berpiston bebas yang dipanaskan
Isokhorik	volume V	0	$Q = \Delta U$	tabung gas atau kaleng tertutup yang terjemur
Isotermal	suhu T	$nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$	$\Delta U = 0$, jadi $Q = W$	gas memuai sangat pelan di dalam bak air bersuhu tetap
Adiabatik	tidak ada kalor masuk/keluar	$-\Delta U$	$Q = 0$, jadi $\Delta U = -W$	pompa sepeda ditekan cepat, mesin diesel, udara naik membentuk awan



Empat proses yang berangkat dari keadaan awal yang sama. Kurva adiabatik turun lebih tajam daripada isotermal.

Adiabatik terjadi bila prosesnya **sangat cepat** (kalor tidak sempat berpindah) atau sistemnya **berisolasi**. Saat gas dimampatkan secara adiabatik, semua usaha masuk menjadi energi dalam, sehingga gas memanas. Itulah yang terjadi di pompa Raka. Sebaliknya, gas yang memuai secara adiabatik akan mendingin. Udara yang menyembur dari pentil ban yang dikempiskan terasa sejuk karena alasan ini.

Bahasa sederhana · Versi singkatnya: udara yang **ditekan cepat jadi panas**, udara yang **mengembang cepat jadi dingin**. Coba sentuh pentil ban yang sedang dikempiskan!

MITOS

"Es batu memberikan 'dingin' kepada es teh."

FAKTA

Tidak ada zat bernama "dingin". Yang berpindah selalu
kalor
, dari benda panas ke benda dingin. Es teh terasa dingin karena tehnya
memberikan
kalor kepada es batu sampai es itu mencair.

MITOS

"Suhu gas hanya bisa naik kalau gas dipanaskan."

FAKTA

Usaha juga bisa menaikkan suhu! Pada proses adiabatik
$Q = 0$
, tetapi gas yang dimampatkan tetap memanas karena
$\Delta U = -W$
bernilai positif. Mesin diesel memakai trik ini untuk menyalakan solar tanpa busi.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

C_P, C_V, HUBUNGAN MAYER, DAN RUMUS ADIABATIK

Untuk menaikkan suhu 1 mol gas sebesar 1 K pada tekanan tetap, kita perlu kalor lebih banyak daripada pada volume tetap, karena sebagian kalor dipakai gas untuk memuai. Dari $Q = \Delta U + P\Delta V$ dan $P\Delta V = nR\Delta T$ diperoleh **hubungan Mayer**:

$$C_p - C_V = R.$$

Perbandingan $\gamma = C_p/C_V$ bernilai $5/3$ untuk gas monoatomik dan $7/5$ untuk gas diatomik. Pada proses adiabatik berlaku $PV^\gamma = \text{tetap}$ dan $TV^{\gamma-1} = \text{tetap}$, dengan usaha $W = \dfrac{P_1V_1 - P_2V_2}{\gamma - 1}$. Pada proses isotermal, usaha diperoleh dari integral $W = \int P\,\mathrm{d}V = \int \dfrac{nRT}{V}\mathrm{d}V = nRT\ln\dfrac{V_2}{V_1}$.

KERJAKAN BERSAMA **Memanaskan gas pada tekanan tetap**

Gas monoatomik pada tekanan tetap 200 kPa dipanaskan sehingga volumenya bertambah dari 3 L menjadi 5 L. Berapa usaha gas, perubahan energi dalam, dan kalor yang diserap?

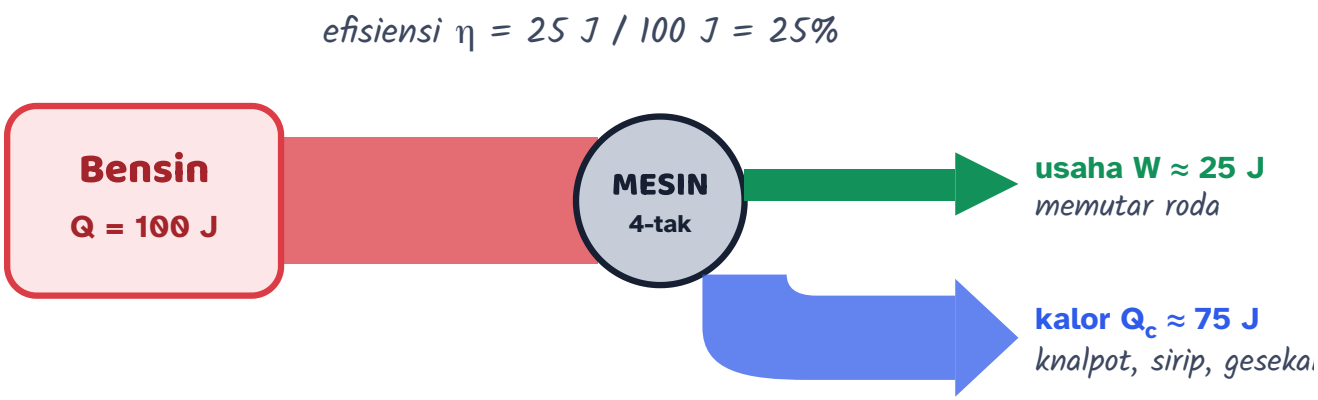
1. Usaha: $W = P\,\Delta V = 200\ \text{kPa} \times 2\ \text{L} = 400$ J.
2. Untuk gas monoatomik, $\Delta U = \frac{3}{2}nR\,\Delta T = \frac{3}{2}P\,\Delta V$ (karena $PV = nRT$). Jadi $\Delta U = 1{,}5 \times 400 = 600$ J.
3. Hukum I: $Q = \Delta U + W = 600 + 400 = 1.000$ J.

Usaha 400 J, energi dalam naik 600 J, dan kalor yang diserap 1.000 J. Dari setiap 5 bagian kalor, 2 bagian dipakai mendorong piston dan 3 bagian menaikkan suhu.

17.5 Mesin kalor dan efisiensi: rahasia motor 4-tak

Mesin kalor adalah alat yang mengubah kalor menjadi usaha secara berulang-ulang (bersiklus). Semua mesin kalor punya pola yang sama: menyerap kalor Q_h dari sumber panas, mengubah sebagian menjadi usaha W, lalu membuang sisanya Q_c ke lingkungan yang lebih dingin.

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}, \qquad W = Q_h - Q_c$$



Aliran energi kira-kira pada motor bensin. Lebar panah sebanding dengan banyaknya energi.

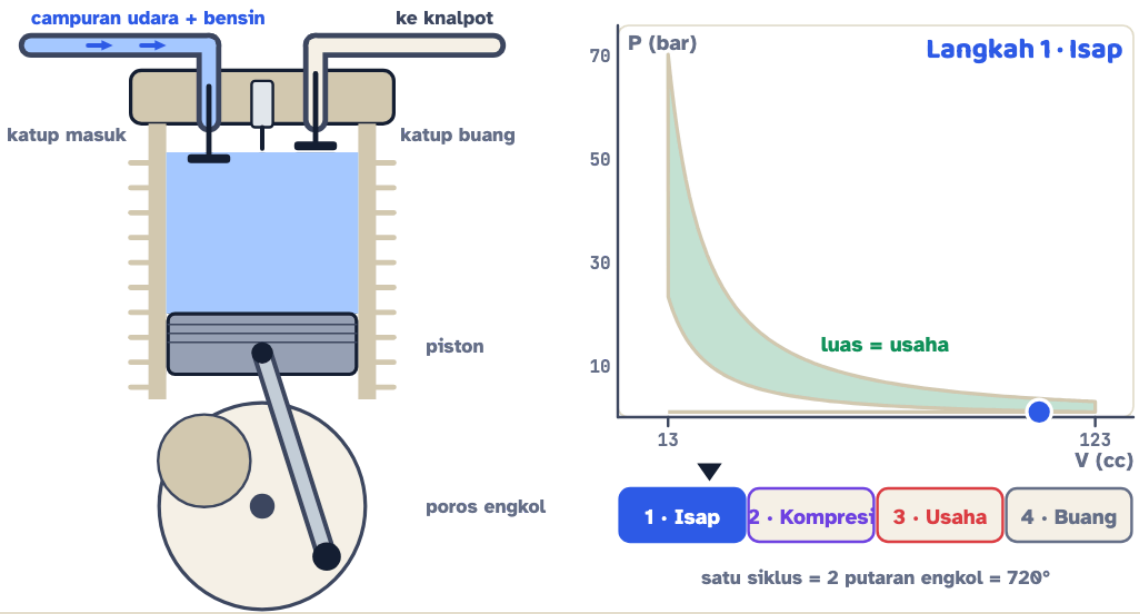
Empat langkah motor bebek

Motor bebek dan skuter di jalanan Indonesia umumnya bermesin **4-tak** (empat langkah). Piston menempuh empat langkah (dua kali turun, dua kali naik) untuk setiap satu kali ledakan bahan bakar, dan poros engkol berputar dua kali.

1. **Isap**: piston turun, katup masuk terbuka, campuran udara dan bensin tersedot ke silinder.
2. **Kompresi**: kedua katup tertutup, piston naik dan memampatkan campuran (hampir adiabatik, campuran memanas).
3. **Usaha**: busi memercikkan api, campuran terbakar, tekanan melonjak dan mendorong piston turun. Hanya di langkah inilah mesin menghasilkan usaha!
4. **Buang**: katup buang terbuka, piston naik dan mendorong gas sisa pembakaran ke knalpot.

LAB MINI **Mesin 4-tak dalam gerak lambat**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-17



Langkah	Sudut engkol	Tekanan gas	Usaha ideal per siklus	Efisiensi ideal (Otto)
1 · Isap	128 °	1 bar	90 J	59,4 %

Tekan **Jalankan** dan ikuti titik berwarna di diagram P–V. Pada langkah mana tekanan melonjak? Naikkan **rasio kompresi** dan lihat efisiensi ideal ikut naik. (Mesin sungguhan berputar puluhan kali per detik. Di sini gerakannya diperlambat.)

Mesin atau pembangkit	Efisiensi kira-kira	Ke mana sisa energinya?
Motor bensin 4-tak	20–30%	gas buang panas, sirip/radiator, gesekan
Mesin diesel truk dan bus	30–45%	gas buang dan sistem pendingin
PLTU batu bara	±33–40%	air pendingin kondensor (sering air laut)
PLTGU (gas dan uap)	±50–60%	gas buang dan kondensor

PLTP (panas bumi)	±10–20%	menara pendingin; uapnya tidak sepanas uap PLTU

FISIKA INDONESIA

Indonesia duduk di atas **Cincin Api Pasifik**, sehingga kaya panas bumi. **PLTP Kamojang** di Garut, Jawa Barat, termasuk PLTP tertua di Indonesia dan sudah beroperasi sejak awal 1980-an. Uap panas dari perut bumi memutar turbin, lalu didinginkan di menara pendingin. Efisiensinya lebih kecil daripada PLTU karena uapnya tidak terlalu panas, tetapi "bahan bakarnya" gratis dan terus diperbarui oleh panas bumi. Indonesia kini termasuk negara dengan kapasitas PLTP terbesar di dunia.

KERJAKAN BERSAMA **Efisiensi motor bebek**

Dalam satu menit, bensin yang terbakar di mesin motor melepaskan energi 1.200 kJ. Kalor yang terbuang ke knalpot dan sirip pendingin 900 kJ. Berapa usaha yang dihasilkan dan berapa efisiensinya?

1. Usaha: $W = Q_h - Q_c = 1.200 - 900 = 300$ kJ.
2. Efisiensi: $\eta = \dfrac{W}{Q_h} = \dfrac{300}{1.200} = 0{,}25 = 25\%$.
3. Daya rata-rata mesin: $P = \dfrac{300.000 \text{ J}}{60 \text{ s}} = 5.000$ W = 5 kW.

Mesin menghasilkan 300 kJ usaha per menit (±5 kW) dengan efisiensi 25%. Tiga perempat energi bensin berubah menjadi kalor yang terbuang.

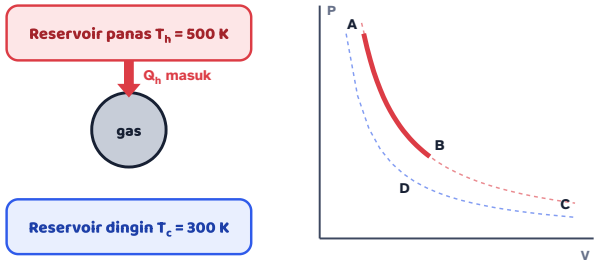
17.6 Mesin Carnot dan Hukum II: batas yang tidak bisa ditembus

Kalau gesekan dihilangkan dan mesin dibuat sempurna, bisakah efisiensinya 100%? Seorang insinyur muda Prancis menjawab pertanyaan ini sekitar dua abad lalu.

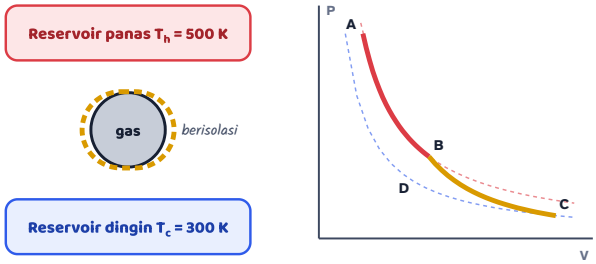
TAMU DARI MASA LALU

Pada tahun 1824, **Sadi Carnot** (1796–1832) yang berusia 28 tahun menerbitkan buku tipis berjudul *Renungan tentang Daya Penggerak Api*. Ia membayangkan mesin ideal tanpa gesekan dan tanpa kebocoran kalor. Kesimpulannya mengejutkan: bahkan mesin ideal pun **tidak bisa** mengubah seluruh kalor menjadi usaha. Batas efisiensinya hanya ditentukan oleh **suhu** sumber panas dan suhu pembuangan. Bukunya hampir terlupakan, sampai fisikawan lain menemukannya kembali bertahun-tahun kemudian.

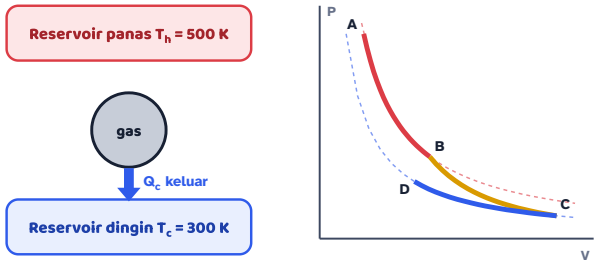
Mesin Carnot adalah mesin ideal yang bekerja dengan siklus dua proses isotermal dan dua proses adiabatik.



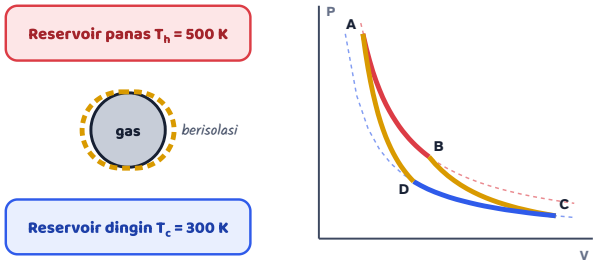
Langkah 1. A→B: **pemuaian isotermal** pada T_h. Gas bersentuhan dengan reservoir panas, menyerap kalor Q_h, dan mendorong piston. Suhunya tetap 500 K.



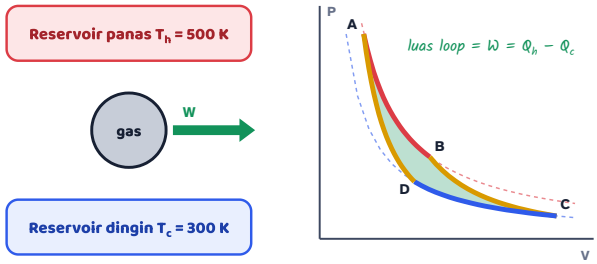
Langkah 2. B→C: **pemuaian adiabatik**. Silinder diselimuti isolator. Gas terus memuai tanpa menerima kalor, sehingga suhunya turun dari 500 K menjadi 300 K.



Langkah 3. C→D: **pemampatan isotermal** pada T_c. Gas bersentuhan dengan reservoir dingin dan membuang kalor Q_c sambil dimampatkan.



Langkah 4. D→A: **pemampatan adiabatik**. Gas dimampatkan tanpa pertukaran kalor sampai suhunya kembali 500 K. Siklus selesai.



Langkah 5. Luas loop adalah usaha bersih $W = Q_h - Q_c$. Untuk mesin Carnot, $Q_c/Q_h = T_c/T_h$, sehingga $\eta = 1 - 300/500 = 40\%$. Tidak ada mesin di antara 500 K dan 300 K yang bisa lebih efisien daripada ini.

RUMUS HIDUP **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(°C) + 273.

T_h Suhu sumber panas °C | T_c Suhu pembuangan °C | η_C Efisiensi Carnot %

EFISIENSI CARNOT

62,7

%

Mesin ideal di antara **540** °C dan **30** °C paling banyak mengubah **62,7%** kalor menjadi usaha. Sisanya pasti terbuang, sehebat apa pun teknologinya.

Cek satuan: efisiensi tidak bersatuan. Pakai suhu mutlak (K): mengganti °C dengan K mengubah hasilnya!

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

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

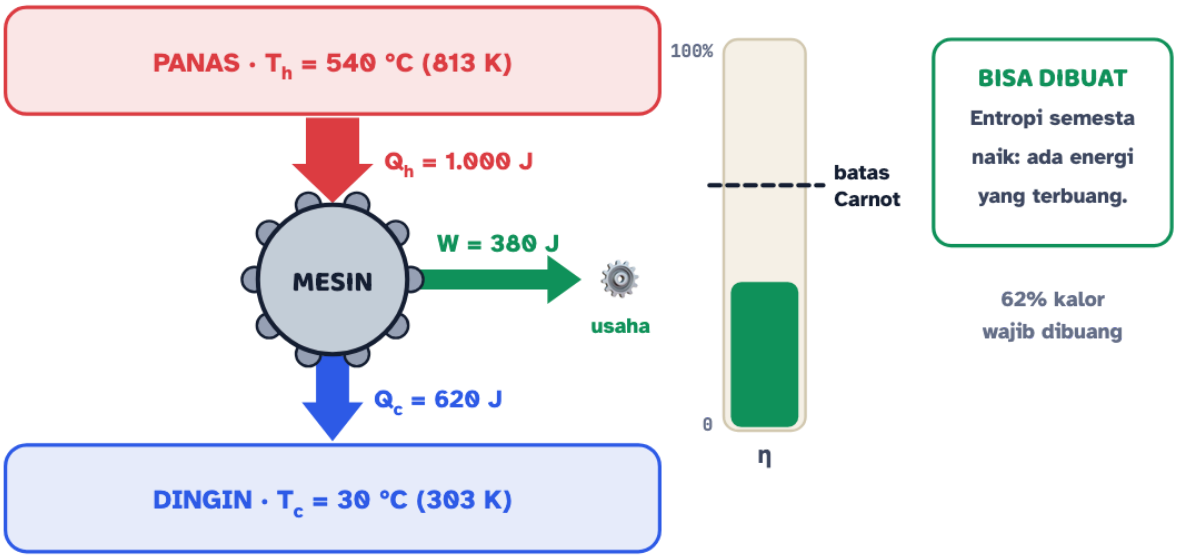
Dalam rumus Carnot, suhu **wajib dalam kelvin**. Mesin di antara 100 °C dan 25 °C **tidak** berefisiensi $1 - 25/100 = 75\%$. Yang benar: $1 - \frac{298}{373} \approx 20\%$.

Hukum II termodinamika punya dua bunyi yang setara:

- **Kelvin–Planck:** tidak ada mesin bersiklus yang mengubah **seluruh** kalor menjadi usaha. Selalu ada kalor yang harus dibuang.
- **Clausius:** kalor tidak bisa mengalir **dengan sendirinya** dari benda dingin ke benda panas. Perlu "dipompa" dengan usaha.

LAB MINI Neraca energi: bisakah kamu mengakali Hukum II?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-17



Batas ideal (Carnot)	Klaim kamu	ΔS semesta per siklus	Putusan
62,7 %	38 %	0,816 J/K	✅ Mungkin dibuat

Pilih contoh nyata (PLTU, PLTP, motor, kulkas, AC) atau atur sendiri. Lalu coba **klaim** efisiensi melebihi batas Carnot. Perhatikan perubahan entropi semesta: jika bernilai negatif, mesinmu mustahil dibuat!

MITOS

"Kalau gesekan bisa dihilangkan seluruhnya, mesin bisa 100% efisien."

MITOS

"Pada hari panas, membuka pintu kulkas bisa mendinginkan kamar."

FAKTA

Mesin tanpa gesekan pun tetap dibatasi Carnot: $\eta \leq 1 - T_c/T_h$. Untuk 100%, pembuangannya harus bersuhu 0 K. Itu mustahil dicapai.

FAKTA

Kalor yang diambil dari depan kulkas dibuang lagi di belakangnya, **ditambah** energi listrik motor kompresor. Kamar justru makin hangat. Coba tebakan di subbab 17.7!

KERJAKAN BERSAMA **PLTU: Carnot vs kenyataan**

Uap PLTU bersuhu 540 °C, sedangkan air laut pendingin kondensornya 30 °C. Berapa efisiensi Carnot-nya? Bandingkan dengan efisiensi nyata ±38%.

1. Ubah ke kelvin: $T_h = 540 + 273 = 813$ K dan $T_c = 30 + 273 = 303$ K.
2. $\eta_C = 1 - \dfrac{303}{813} = 1 - 0{,}373 = 0{,}627 \approx 63\%$.
3. Efisiensi nyata 38% hanya sekitar $38/63 \approx 0{,}6$ bagian dari batas ideal.

Batas Carnot ±63%, sedangkan kenyataannya ±38%. Selisihnya hilang karena gesekan, kebocoran kalor, dan proses yang tidak ideal. Itu sebabnya insinyur terus berusaha menaikkan suhu uap: makin tinggi T_h, makin tinggi batas efisiensinya.

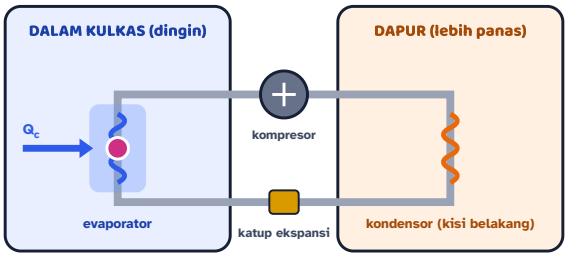
LANJUT · OLIMPIADE

MENGAPA TIDAK ADA MESIN YANG MENGALAHKAN CARNOT?

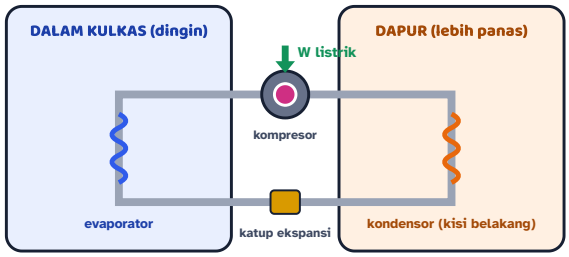
Misalkan ada mesin X dengan $\eta_X > \eta_C$. Pasangkan X dengan mesin Carnot yang dijalankan terbalik (sebagai pompa kalor), dan atur agar usaha keluaran X tepat dipakai untuk menggerakkan pompa Carnot. Hasil bersih gabungan keduanya: kalor berpindah dari reservoir dingin ke reservoir panas **tanpa usaha dari luar**. Ini melanggar pernyataan Clausius. Jadi asumsi awal salah: tidak ada mesin di antara dua reservoir yang lebih efisien daripada mesin reversibel (Carnot).

17.7 Kulkas, AC, dan entropi

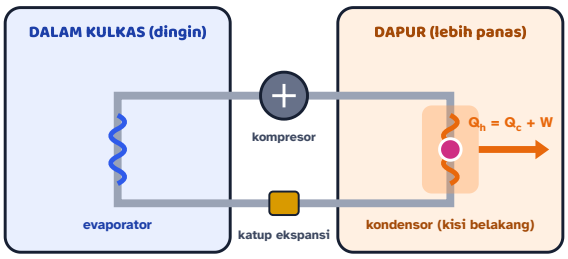
Kulkas dan AC adalah **mesin kalor yang dijalankan terbalik**. Dengan bantuan usaha listrik W, kalor Q_c "dipompa" dari tempat dingin (isi kulkas, kamar) ke tempat panas (dapur, udara luar). Kalor yang dibuang ke luar adalah $Q_h = Q_c + W$, jadi selalu **lebih besar** daripada kalor yang diambil.



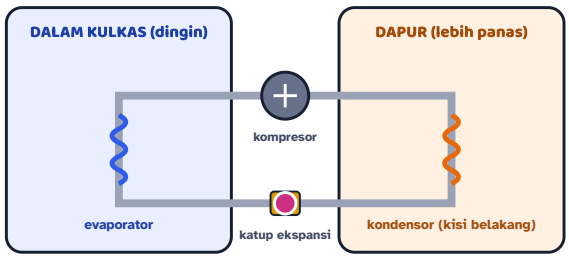
Langkah 1. Di **evaporator** (pipa di dalam kulkas), refrigeran cair bertekanan rendah menguap. Penguapan butuh kalor, jadi refrigeran menyerap kalor Q_c dari makanan. Isi kulkas mendingin.



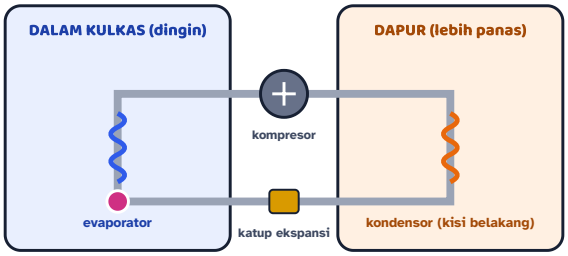
Langkah 2. Kompresor (motor listrik) memampatkan uap refrigeran. Usaha listrik W membuat uap menjadi bertekanan tinggi dan **sangat panas**, lebih panas daripada dapur.



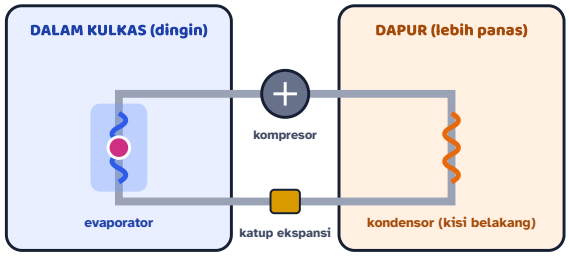
Langkah 3. Di **kondensor** (kisi-kisi di belakang kulkas), uap panas membuang kalor $Q_h = Q_c + W$ ke udara dapur dan mengembun menjadi cair. Itu sebabnya belakang kulkas terasa hangat.



Langkah 4. Refrigeran cair melewati **katup ekspansi** (pipa kapiler). Tekanannya turun drastis dan suhunya anjlok, lebih dingin daripada isi kulkas.



Langkah 5. Refrigeran dingin kembali ke evaporator.



Langkah 6. Siklus berulang. Kalor terus dipompa "menanjak" dari dingin ke panas, dan harga yang dibayar adalah listrik W.

Ukuran kehebatan kulkas atau AC adalah **koefisien kinerja** (COP, *coefficient of performance*): berapa joule kalor yang dipindahkan untuk setiap joule listrik.

$$\mathrm{COP} = \frac{Q_c}{W}, \qquad \mathrm{COP}_{\mathrm{Carnot}} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

RUMUS HIDUP

COP maksimum kulkas atau AC

$$\mathrm{COP}_C = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

Makin kecil beda suhu dalam dan luar, makin mudah kalor dipompa.

T_c Suhu ruang yang didinginkan °C

T_h Suhu tempat kalor dibuang °C

COP_C COP ideal (Carnot)

COP IDEAL (CARNOT)

29,7

Secara ideal, setiap 1 J listrik bisa memindahkan **29,7** J kalor dari **24** °C ke **34** °C. AC dan kulkas sungguhan hanya mencapai sekitar 2 sampai 4.

Cek satuan: COP tidak bersatuan (J/J). Berbeda dengan efisiensi, COP boleh lebih besar daripada 1!

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

Tebak Dulu!

Pada siang yang panas, Raka membuka pintu kulkas lebar-lebar di kamar yang tertutup rapat, berharap kamarnya jadi sejuk. Setelah beberapa jam, suhu kamar...

- turun, karena kulkas mengeluarkan udara dingin.
- turun sebentar, lalu kembali persis seperti semula.
- tetap, karena kalor yang diambil sama dengan kalor yang dibuang.
- naik, karena kalor yang dibuang lebih besar daripada kalor yang diambil.

Jawabannya: naik. Kalor yang diambil dari depan kulkas (Q_c) dibuang lagi ke kamar yang sama di bagian belakang, ditambah energi listrik kompresor: $Q_h = Q_c + W$. Kamar menerima tambahan energi W terus-menerus, jadi suhunya naik. AC bisa mendinginkan kamar karena unit pembuangnya (unit *outdoor*) dipasang **di luar** kamar.

COBA SENDIRI **AC 1 PK di kamar kos**

AC "1 PK" memindahkan kalor sekitar 2,6 kW dari kamar ke luar. Jika COP-nya 3,25, berapa daya listrik yang dipakai, dan berapa kalor per detik yang dibuang unit *outdoor*? Berapa COP Carnot jika kamar 24 °C dan udara luar 34 °C?

1. Daya listrik: $W = \dfrac{Q_c}{\mathrm{COP}} = \dfrac{2{,}6\ \mathrm{kW}}{3{,}25} = 0{,}8$ kW = 800 W.
2. Kalor dibuang per detik: $Q_h = Q_c + W = 2{,}6 + 0{,}8 = 3{,}4$ kW.
3. COP Carnot: $T_c = 297$ K, $T_h = 307$ K, jadi $\mathrm{COP}_C = \dfrac{297}{307 - 297} = 29{,}7$.

AC memakai ±800 W listrik dan membuang 3,4 kW kalor ke luar. COP nyatanya (3,25) jauh di bawah batas ideal (±30), karena refrigeran harus jauh lebih dingin daripada kamar dan jauh lebih panas daripada udara luar agar kalor mau mengalir cepat.

Entropi: mengapa es teh tidak pernah membeku sendiri

Kamu pernah melihat es batu mencair di dalam teh hangat. Pernahkah kamu melihat teh hangat **membeku sendiri** sambil memanaskan sekelilingnya? Tidak pernah, padahal energinya tetap kekal. Ada satu besaran lagi yang menentukan **arah** peristiwa alam, yaitu **entropi** S.

Entropi mengukur seberapa banyak cara energi bisa **tersebar** di antara molekul-molekul. Energi yang terkumpul di satu tempat (teh panas di sebelah es) punya sedikit cara. Energi yang tersebar rata (teh suam-suam kuku) punya sangat banyak cara. Alam selalu bergerak ke keadaan yang caranya paling banyak, sehingga **entropi semesta tidak pernah berkurang**. Itulah sebabnya parfum menyebar ke seluruh kelas tetapi tidak pernah berkumpul kembali ke botolnya.

Bahasa sederhana · Gampangnya: kalor selalu "turun" dari yang panas ke yang dingin, seperti air mengalir dari bukit ke lembah. Untuk membuatnya "naik", perlu pompa, dan pompa butuh listrik. Itulah tugas kulkas dan AC.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGHITUNG PERUBAHAN ENTROPI

Untuk kalor Q yang berpindah secara reversibel pada suhu T, perubahan entropinya $\Delta S = Q/T$ (satuan J/K). Contoh: 1.000 J kalor mengalir dari benda 400 K ke benda 300 K. Benda panas kehilangan entropi $1000/400 = 2{,}5$ J/K, benda dingin mendapat $1000/300 = 3{,}33$ J/K. Total $\Delta S = +0{,}83$ J/K, positif sesuai Hukum II. Pada mesin Carnot, $Q_h/T_h = Q_c/T_c$, sehingga entropi semesta tidak berubah ($\Delta S = 0$): itulah ciri proses reversibel.

Pompa ban dan kompresor tambal ban

Udara yang dimampatkan cepat (adiabatik) memanas. Tabung kompresor di bengkel tambal ban bisa terasa panas setelah bekerja lama.

Mesin diesel tanpa busi

Udara dimampatkan sampai belasan kali lebih kecil sehingga suhunya melampaui 500 °C. Solar yang disemprotkan langsung menyala sendiri.

Awan hujan sore hari

Udara lembap yang naik memuai secara adiabatik dan mendingin. Uap airnya mengembun menjadi awan, lalu hujan deras khas sore hari di kota tropis seperti Bogor.

AC split

Unit dalam ruangan adalah evaporator yang menyerap kalor, sedangkan unit *outdoor* adalah kompresor dan kondensor yang membuang kalor ke luar.

Panci presto

Volumenya tetap. Kalor menaikkan tekanan uap sehingga air mendidih di atas 100 °C, dan daging rendang lebih cepat empuk.

PLTP Dieng dan Kamojang

Mesin kalor raksasa: uap panas bumi sebagai sumber panas, udara pegunungan sebagai pembuangan, dan listrik sebagai usaha.

Cek Cepat

Gas dimampatkan sehingga menerima usaha 500 J dan pada saat yang sama melepas kalor 200 J. Perubahan energi dalamnya adalah...

- −700 J
- −300 J
- +300 J
- +700 J

Pada proses isotermal gas ideal, besaran yang bernilai nol adalah...

- perubahan energi dalam ΔU
- kalor Q
- usaha W
- tekanan P

Efisiensi maksimum mesin yang bekerja di antara reservoir 400 K dan 300 K adalah...

- 75%
- 25%
- 33%
- 100%

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. B

Tantangan Rumah: karet gelang termodinamika

Bahan: karet gelang yang agak tebal, bibir atau dahimu sebagai "termometer"

1. Tempelkan karet gelang yang kendur ke bibir atau dahimu. Rasakan suhunya.
2. Regangkan karet dengan **cepat** dan kuat, lalu segera tempelkan lagi. Apakah terasa lebih hangat?
3. Tahan karet tetap teregang selama ±30 detik sampai suhunya kembali normal. Lalu lepaskan regangan dengan cepat dan tempelkan lagi. Apa yang kamu rasakan?

Pertanyaan: Mengapa peregangan yang cepat menghangatkan karet, sedangkan pelepasan yang cepat mendinginkannya? Proses mana di bab ini yang paling mirip? (Petunjuk: apakah kalor sempat berpindah selama gerakan yang cepat?) Hati-hati, jangan sampai karetnya terlepas mengenai mata.

RINGKASAN KILAT — Bab 17 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan **sistem** dan **lingkungan**, lalu memakai **hukum ke-0** untuk menjelaskan cara kerja termometer
- menghitung **usaha gas** sebagai luas di bawah kurva pada **diagram P–V**
- memakai **Hukum I** $\Delta U = Q - W$ pada proses isobarik, isokhorik, isotermal, dan adiabatik
- menghitung **efisiensi** mesin kalor, efisiensi **Carnot**, dan **COP** kulkas atau AC
- menjelaskan **Hukum II** dan **entropi** dengan contoh sehari-hari

Istilah kunci

sistem · lingkungan · kesetimbangan termal · energi dalam · diagram P–V · Mesin kalor · Mesin Carnot · koefisien kinerja · entropi

Rumus penting

$$W = P\,(V_2 - V_1)$$

Usaha gas pada tekanan tetap. Usaha gas = tekanan × perubahan volume. Memuai → positif, dimampatkan → negatif.

$$\Delta U = Q - W$$

Hukum I termodinamika. Perubahan energi dalam = kalor yang masuk − usaha yang dikeluarkan gas.

$$\eta_C = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Efisiensi maksimum (mesin Carnot). Efisiensi terbaik yang mungkin hanya ditentukan suhu. Hitung dalam kelvin: T(K) = T(°C) + 273.

$$\mathrm{COP}_C = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

COP maksimum kulkas atau AC. Makin kecil beda suhu dalam dan luar, makin mudah kalor dipompa.

Jangan sampai terjebak

- "Tekanan gas naik, pasti gas melakukan usaha." Salah.
- Buku kimia (dan sebagian buku fisika) menulis $\Delta U = Q + W$.

- Dalam rumus Carnot, suhu wajib dalam kelvin.

⛰️ 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=17

🧩 Teka-teki untuk Bab 18

Saat mesin motor 4-tak menyala, kamu bisa mendengar suaranya dari ujung gang. Padahal tidak ada udara dari knalpot yang benar-benar terbang sampai ke telingamu. Bagaimana energi bisa berpindah sejauh itu tanpa ada benda yang ikut pindah?

▼ Intip petunjuk

Bayangkan penonton di stadion yang membuat "gelombang Meksiko": orangnya tetap di kursi, tetapi gelombangnya berkeliling stadion. Energi bisa merambat sebagai **gelombang**. Kita bongkar di Bab 18: Gelombang Mekanik.

BAB 18 · GELOMBANG & CAHAYA

18 Gelombang: Energinya Pergi, Airnya Tinggal

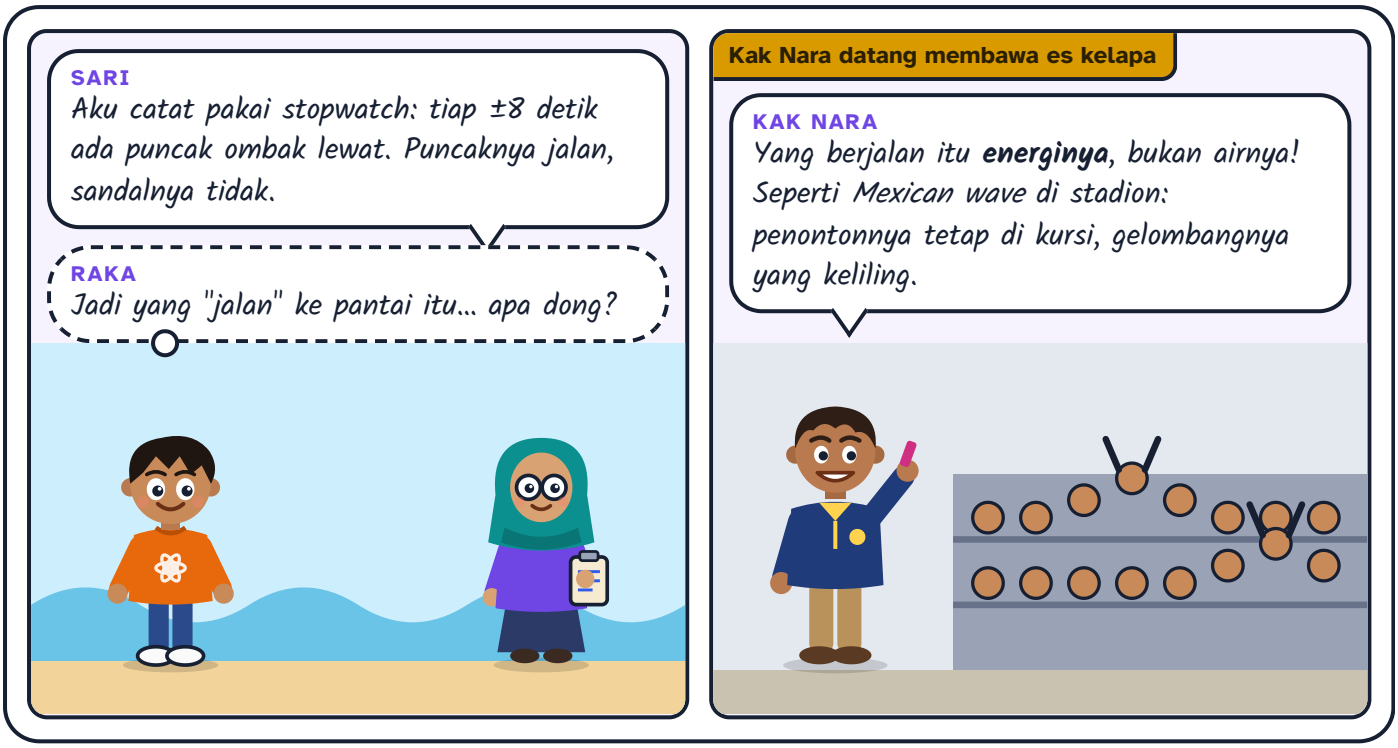
Ombak di Pantai Kuta datang tanpa henti, tetapi sandal yang hanyut hanya naik-turun di tempat. Lalu apa sebenarnya yang berjalan? Bab ini membongkar rahasia gelombang, dari slinky di kelas sampai ombak selancar Mentawai.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan bahwa gelombang memindahkan **energi**, bukan medium, serta membedakan gelombang **transversal** dan **longitudinal**;
- memakai $v = \lambda f$ dan membaca panjang gelombang, amplitudo, periode, dan frekuensi dari gambar atau grafik;
- membaca **persamaan gelombang berjalan** $y = A\sin(\omega t - kx)$ dan menghitung **beda fase**;
- menghitung cepat rambat gelombang pada tali $v = \sqrt{F/\mu}$;
- menjelaskan **superposisi**, **interferensi**, **pemantulan**, dan **gelombang stasioner** pada dawai.

SANDAL DI PANTAI KUTA

KOMIK · 4 PANEL



18.1 Apa itu gelombang?

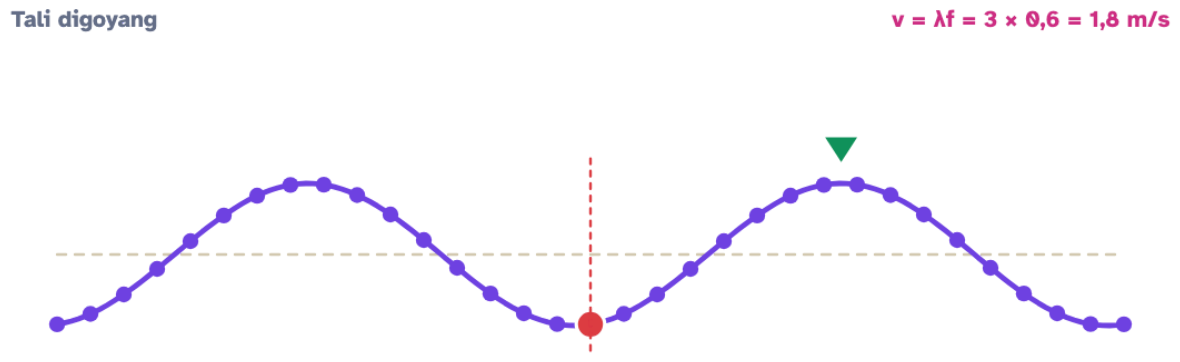
Gelombang adalah **getaran yang merambat**. Saat kamu menggoyang ujung tali, bagian tali di dekat tanganmu menarik bagian sebelahnya, yang lalu menarik bagian berikutnya, dan seterusnya. Yang berpindah dari ujung ke ujung adalah **energi** dan **pola goyangannya**. Setiap bagian tali hanya bergetar di sekitar posisinya sendiri.

Benda tempat gelombang merambat disebut **medium**: tali, air, udara, atau batuan bumi. Gelombang yang membutuhkan medium disebut **gelombang mekanik**. Ada juga gelombang yang bisa merambat di ruang hampa, yaitu gelombang elektromagnetik seperti cahaya. Itu akan kita jelajahi di bab-bab berikutnya.

Bahasa sederhana · Gampangnya: gelombang itu seperti **kabar yang menyebar** dari mulut ke mulut di kelas. Kabarnya sampai ke bangku paling belakang, tetapi tidak ada murid yang pindah tempat duduk.

LAB MINI **Siapa yang berjalan: partikel atau gelombang?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-18



Panjang gelombang λ = v/f	Periode T	Partikel merah
3 m	1,67 s	naik-turun di tempat

Puncak hijau
maju 1,8 m tiap detik

Ikuti **partikel merah** dan **segitiga hijau** (puncak gelombang). Ganti jenisnya: tali, slinky, ombak laut, dan stadion. Partikel merah selalu kembali ke tempatnya, sedangkan puncaknya terus berjalan. Lalu gandakan **frekuensi**: cepat rambat tetap karena ditentukan medium, jadi yang berubah adalah **panjang gelombang** ($\lambda = v/f$). Ganti medium dengan slider v untuk melihat gelombang yang lebih cepat.

MITOS

"Ombak membawa air laut dari tengah samudra sampai ke pantai."

MITOS

"Gelombang yang lebih tinggi pasti merambat lebih cepat."

FAKTA

Di laut lepas, air hanya berputar di tempat seperti bianglala kecil. Yang menyeberangi samudra adalah **energinya**. Air baru benar-benar menghempas ke pantai ketika ombak pecah di perairan dangkal.

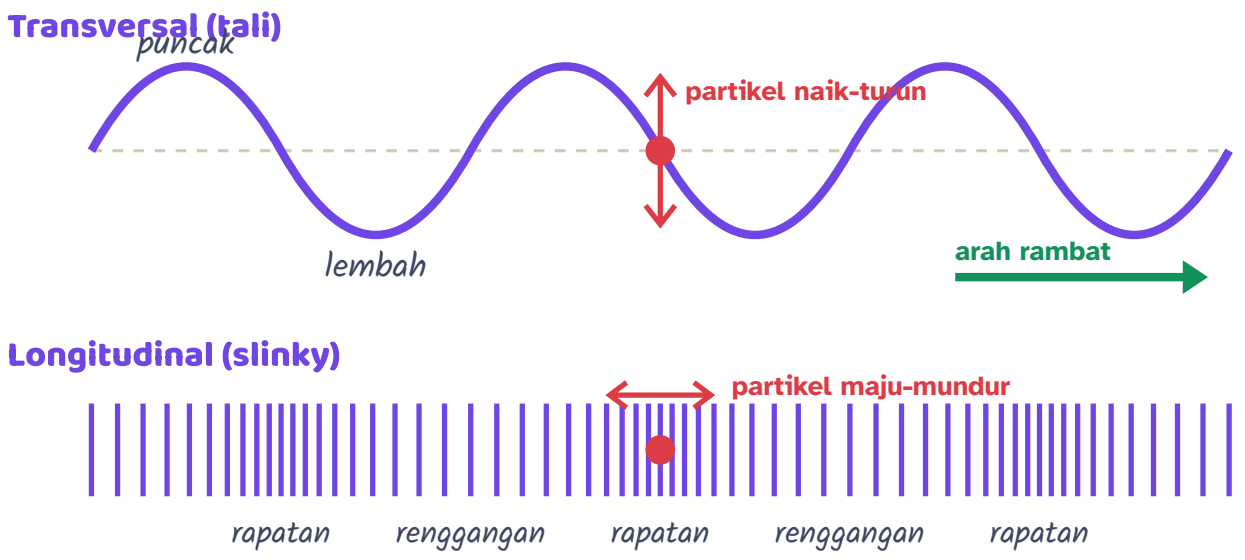
FAKTA

Pada tali atau slinky, cepat rambat ditentukan oleh **medium** (tegangan dan massa tali), bukan oleh tinggi gelombang. Pulsa kecil dan pulsa besar tiba di ujung tali pada saat yang sama.

18.2 Transversal dan longitudinal

Gelombang dibedakan menurut **arah getar** partikel dibandingkan dengan **arah rambat** gelombang.

- **Transversal**: arah getar **tegak lurus** arah rambat. Contoh: gelombang tali, riak permukaan air (sebagian), gelombang gempa S.
- **Longitudinal**: arah getar **sejajar** arah rambat. Contoh: slinky yang didorong-tarik, bunyi di udara, gelombang gempa P.



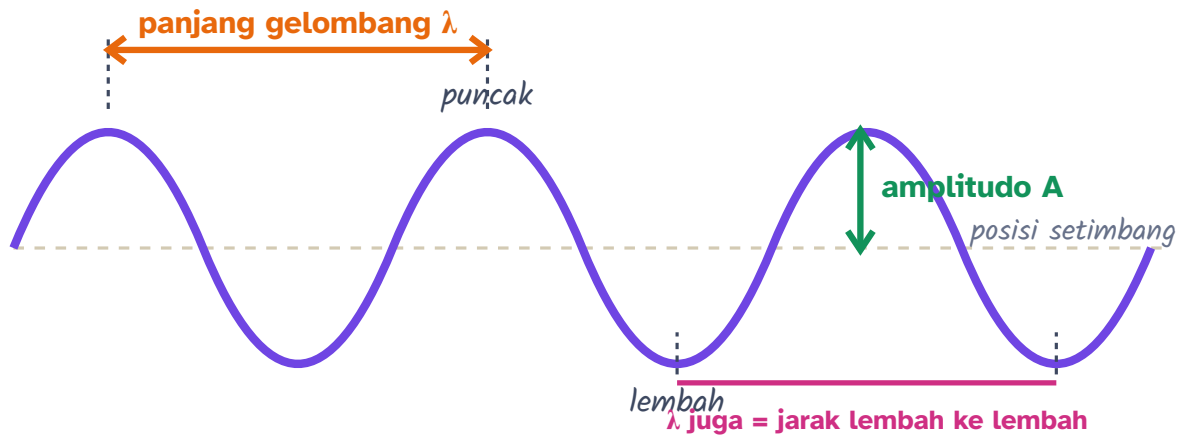
Atas: tali digoyang naik-turun. Bawah: slinky didorong-tarik; lilitannya merapat dan merenggang bergantian.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

GELOMBANG S DAN INTI BUMI

Gelombang transversal membutuhkan medium yang bisa "menarik balik" saat digeser ke samping. Zat cair tidak punya kekakuan geser seperti itu. Karena itu, gelombang gempa S (transversal) tidak bisa merambat melalui zat cair, sedangkan gelombang P (longitudinal) bisa. Seismograf di seluruh dunia mencatat bahwa gelombang S tidak pernah muncul di sisi Bumi yang berseberangan dengan pusat gempa. Dari "bayangan" inilah para ilmuwan menyimpulkan bahwa **inti luar Bumi berupa cairan**.

18.3 Besaran gelombang dan rumus $v = \lambda f$



Anatomi gelombang. Waktu untuk satu gelombang penuh lewat disebut periode T.

Besaran	Simbol	Arti	Satuan
Amplitudo	A	simpangan terbesar dari posisi setimbang	m
Panjang gelombang	λ (lambda)	jarak dua puncak (atau dua rapatan) berurutan	m
Periode	T	waktu untuk satu getaran penuh	s
Frekuensi	$f = 1/T$	banyak getaran tiap detik	Hz (hertz)
Cepat rambat	v	jarak yang ditempuh puncak tiap detik	m/s

Dalam satu periode T, gelombang maju tepat satu panjang gelombang λ. Jadi cepat rambatnya $v = \lambda/T$, atau:

$$v = \lambda f$$

✏️ **TRIK KAK NARA: SEPERTI BERJALAN KAKI**

Kecepatan jalanmu = panjang satu langkah × banyak langkah per detik. Jika langkah Raka 0,6 m dan ia melangkah 2 kali per detik, kecepatannya 1,2 m/s. Gelombang juga begitu: **λ itu panjang langkahnya, f itu banyak langkah per detik**.

RUMUS HIDUP

Cepat rambat gelombang

$$v = \lambda f$$

Cepat rambat = panjang satu gelombang × banyak gelombang per detik.

- λ Panjang gelombang m
- f Frekuensi Hz
- v Cepat rambat m/s

CEPAT RAMBAT

2

m/s

Gelombang dengan λ = **4** m dan f = **0,5** Hz merambat **2** m/s. Periodenya 1/f, dan dalam satu periode gelombang maju satu λ.

Satuan Nusantara: ≈ 1,4 × jalan kaki santai · ≈ 18% dari ojek di jalan kota (±40 km/jam) · ≈ 2% dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\mathrm{m} \times \mathrm{Hz} = \mathrm{m} \times \mathrm{s}^{-1} = \mathrm{m/s}$

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

Tebak Dulu!

Kamu menggoyang ujung tali yang sama dua kali lebih sering (frekuensi dua kali lipat), tanpa mengubah kekencangan tali. Apa yang terjadi?

- Gelombang merambat dua kali lebih cepat.
- Cepat rambatnya tetap, panjang gelombangnya menjadi setengah.
- Panjang gelombangnya menjadi dua kali lipat.
- Amplitudonya otomatis menjadi dua kali lipat.

Jawabannya: v tetap, λ menjadi setengah. Cepat rambat ditentukan oleh **medium** (tegangan dan massa tali), bukan oleh tanganmu. Karena $v = \lambda f$ tetap, menggandakan f memaksa λ mengecil separuhnya. Gelombangnya jadi lebih rapat, bukan lebih cepat. Cek di Lab Mini "Siapa yang berjalan" di atas, atau di lab tali (subbab 18.7): ubah frekuensinya, cepat rambat v tetap, sedangkan λ berubah.

Gelombang	Panjang gelombang	Frekuensi	Cepat rambat (kira-kira)
Ombak laut lepas	±100 m	±0,12 Hz (periode ±8 s)	±12 m/s
Slinky di kelas	±0,5 m	±2 Hz	±1 m/s
Bunyi nada "la" (440 Hz) di udara	±0,78 m	440 Hz	±343 m/s
Gelombang gempa P di kerak bumi	beberapa km	±1 Hz	±6.000 m/s

CONTOH **Pelampung pancing di danau**

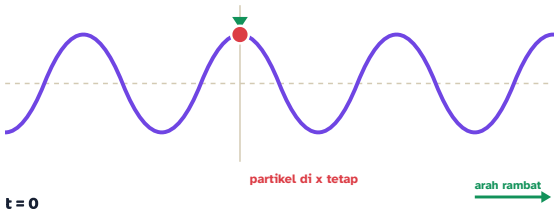
Pelampung pancing Sari naik-turun 10 kali dalam 20 detik. Jarak antara dua puncak riak yang berurutan 4 m. Berapa frekuensi, periode, dan cepat rambat riak itu?

1. Frekuensi: $f = \dfrac{10 \text{ getaran}}{20 \text{ s}} = 0{,}5$ Hz. Periode: $T = 1/f = 2$ s.
2. Cepat rambat: $v = \lambda f = 4 \times 0{,}5 = 2$ m/s.

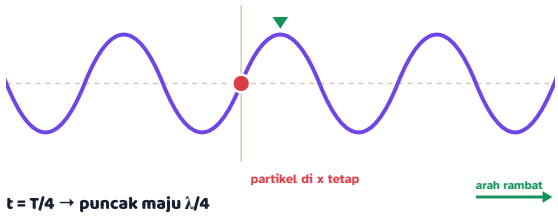
Riak merambat 2 m/s, padahal pelampungnya tidak bergeser ke mana-mana. Yang berjalan adalah polanya.

18.4 Persamaan gelombang berjalan

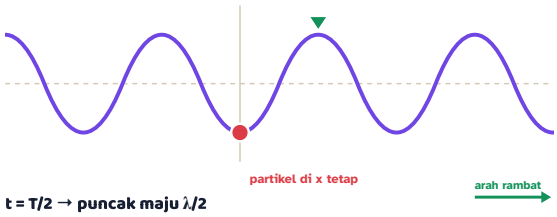
Bagaimana menulis gelombang dalam satu rumus? Kita butuh simpangan y untuk **setiap posisi** x dan **setiap waktu** t. Ikuti animasi ini: perhatikan partikel merah dan puncak hijau.



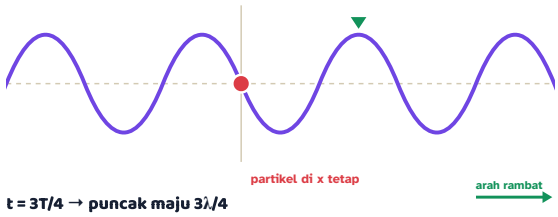
Langkah 1. Saat $t = 0$, puncak gelombang (segitiga hijau) tepat berada di partikel merah.



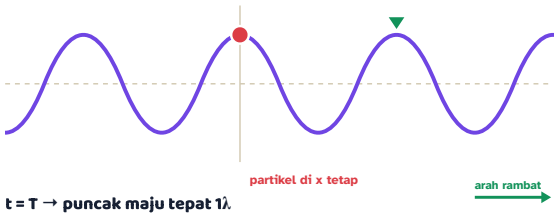
Langkah 2. Seperempat periode kemudian, seluruh pola bergeser $\lambda/4$ ke kanan. Partikel merah **tidak** ikut ke kanan, ia turun ke posisi setimbang.



Langkah 3. Setengah periode: partikel merah berada di lembah, sementara puncak hijau sudah maju $\lambda/2$.



Langkah 4. Tiga perempat periode: partikel merah naik lagi melewati posisi setimbang.



Langkah 5. Satu periode penuh: pola maju tepat satu λ dan partikel merah kembali ke puncak. Inilah bukti $v = \lambda/T = \lambda f$.

Gelombang sinus yang merambat ke arah x positif ditulis:

$$y(x,t) = A\sin(\omega t - kx), \qquad \omega = 2\pi f, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad v = \frac{\omega}{k}$$

ω disebut **frekuensi sudut** (rad/s) dan k disebut **bilangan gelombang** (rad/m). Tanda di dalam sinus menunjukkan arah: $(\omega t - kx)$ berarti merambat ke x positif, sedangkan $(\omega t + kx)$ berarti merambat ke x negatif. Seluruh isi kurung, $\varphi = \omega t - kx$, disebut **fase**.

RUMUS HIDUP **Simpangan gelombang berjalan**

$$y = A \sin\left(2\pi \left(f\,t - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

Masukkan posisi dan waktu, keluarlah simpangan titik itu. Sudut sinus dalam radian.

A Amplitudo cm | f Frekuensi Hz | λ Panjang gelombang m | x Posisi titik m | t Waktu s | y Simpangan titik cm

SIMPANGAN TITIK

10

cm

Titik di x = **0,5** m pada t = **0,25** s bersimpangan **10** cm. Geser t sedikit demi sedikit: simpangan titik itu naik-turun, tetapi titiknya tidak berpindah.

Cek satuan: isi kurung (fase) tak bersatuan: $\mathrm{Hz} \cdot \mathrm{s} = 1$ dan $\mathrm{m}/\mathrm{m} = 1$.

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

Beda fase. Dua titik yang berjarak Δx pada gelombang yang sama memiliki beda fase $\Delta\varphi = 2\pi \dfrac{\Delta x}{\lambda}$. Jika $\Delta x = \lambda, 2\lambda, \ldots$, keduanya **sefase** (bergerak kompak). Jika $\Delta x = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \ldots$, keduanya **berlawanan fase**: satu di puncak saat yang lain di lembah.

⚠️ **AWAS JEBAKAN: DUA KECEPATAN BERBEDA**

Jangan campur aduk **cepat rambat gelombang** $v = \lambda f$ (seberapa cepat pola bergeser) dengan **kecepatan partikel** $v_y = \dfrac{\partial y}{\partial t} = A\omega \cos(\omega t - kx)$ (seberapa cepat titik medium naik-turun). Cepat rambat tetap, sedangkan kecepatan partikel berubah-ubah: maksimum $A\omega$ saat melewati posisi setimbang dan nol di puncak atau lembah.

KERJAKAN BERSAMA **Membaca persamaan gelombang**

Gelombang pada tali dinyatakan oleh $y = 0{,}05\sin(10\pi t - 2\pi x)$, dengan x dan y dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan amplitudo, frekuensi, panjang gelombang, cepat rambat, arah rambat, dan beda fase dua titik yang berjarak 25 cm.

1. Bandingkan dengan $y = A\sin(\omega t - kx)$: $A = 0{,}05$ m = 5 cm, $\omega = 10\pi$ rad/s, $k = 2\pi$ rad/m.
2. $f = \dfrac{\omega}{2\pi} = 5$ Hz dan $\lambda = \dfrac{2\pi}{k} = 1$ m.
3. $v = \lambda f = 1 \times 5 = 5$ m/s, ke arah x positif (tanda minus di antara ωt dan kx).
4. Beda fase: $\Delta\varphi = 2\pi \times \dfrac{0{,}25}{1} = \dfrac{\pi}{2}$ rad (seperempat getaran).

$A = 5$ cm, $f = 5$ Hz, $\lambda = 1$ m, $v = 5$ m/s ke kanan, dan beda fase $\pi/2$. Kecepatan partikel maksimumnya $A\omega = 0{,}05 \times 10\pi \approx 1{,}6$ m/s, jauh berbeda dari cepat rambatnya.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

PERSAMAAN GELOMBANG

Setiap fungsi berbentuk $y = g(x - vt)$ adalah gelombang yang merambat ke kanan tanpa berubah bentuk, apa pun bentuk g (sinus, pulsa, atau bentuk lain). Semua bentuk itu memenuhi persamaan diferensial yang sama:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}.$$

Untuk tali, hukum Newton pada potongan kecil tali menghasilkan persamaan ini dengan $v^2 = F/\mu$. Lab mini tali di subbab 18.7 menyelesaikan persamaan ini secara numerik, langkah demi langkah.

18.5 Cepat rambat gelombang pada tali

Mengapa gelombang pada tali gitar sangat cepat, tetapi pada tali tambang yang kendur sangat lambat? Dua hal menentukan: **tegangan tali** F yang menarik setiap bagian kembali ke posisinya, dan **massa per satuan panjang** $\mu = m/L$ yang membuat tali "malas" bergerak.

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

RUMUS HIDUP **Cepat rambat gelombang pada tali**

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Tali yang kencang dan ringan → gelombang ngebut. Tali yang kendur dan berat → gelombang lambat.

F Tegangan tali N | μ Massa per panjang g/m | v Cepat rambat m/s

CEPAT RAMBAT
126,5
m/s

Tali bertegangan **80** N dengan massa **5** gram per meter: gelombang merambat **126,5** m/s. Gandakan tegangannya: kecepatannya naik $\sqrt{2} \approx 1{,}4$ kali.

Satuan Nusantara: ≈ 1,3 × kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 37% dari bunyi di udara · ≈ 11 × ojek di jalan kota (±40 km/jam)

Cek satuan: $\sqrt{\mathrm{N}/(\mathrm{kg/m})} = \sqrt{\mathrm{kg\,m\,s^{-2}} \cdot \mathrm{m/kg}} = \mathrm{m/s}$

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

TAMU DARI MASA LALU

Pada tahun 1636, biarawan dan ilmuwan Prancis **Marin Mersenne** menerbitkan hasil percobaannya dengan dawai. Ia menemukan bahwa nada dawai makin tinggi jika dawai makin **pendek**, makin **kencang**, atau makin **ringan**. Aturan yang kini dikenal sebagai *hukum Mersenne* ini persis berasal dari $v = \sqrt{F/\mu}$ yang kamu pelajari sekarang. Para pemain sasando dan kecapi sudah lama "mempraktikkan" hukum ini setiap kali menyetel dawainya.

Gelombang membawa energi

Gelombang yang lebih tinggi membawa energi jauh lebih banyak. Daya gelombang pada tali sebanding dengan **kuadrat amplitudo** dan **kuadrat frekuensi**: $P = \frac{1}{2}\mu\,\omega^2 A^2\,v$. Gandakan amplitudo, dayanya naik **empat kali**. Gelombang yang menyebar ke segala arah dari satu sumber makin melemah karena energinya terbagi ke permukaan bola yang makin luas: intensitasnya $I = \dfrac{P}{4\pi r^2}$, berkurang sebanding dengan $1/r^2$.

FISIKA INDONESIA

Indonesia punya gelombang yang menjadi tujuan peselancar dunia. Ombak di **Kepulauan Mentawai** (Sumatra Barat) dan **Plengkung** (Banyuwangi) berasal dari badai di Samudra Hindia selatan yang jaraknya ribuan kilometer. Energinya menyeberangi samudra, tetapi airnya tidak. Ada pula **Bono** di Sungai Kampar, Riau: gelombang pasang yang menerobos masuk dari laut dan merambat puluhan kilometer ke arah hulu, bisa setinggi beberapa meter. Peselancar dari berbagai negara datang untuk "menunggangi" gelombang sungai ini. Di sisi lain, gelombang tsunami di laut dalam bisa melaju sekitar 700 km/jam (secepat pesawat) dengan tinggi yang kecil, lalu melambat dan meninggi saat mendekati pantai. Kita bahas di Bab 33.

18.6 Superposisi dan interferensi

Apa yang terjadi jika dua gelombang bertemu? Batu bata akan bertabrakan, tetapi gelombang justru **saling menembus**. Saat bertumpuk, simpangannya dijumlahkan, lalu masing-masing melanjutkan perjalanan seolah tidak pernah bertemu. Inilah **prinsip superposisi**: $y_{\text{total}} = y_1 + y_2$.

Tebak Dulu!

Dua pulsa sama besar bergerak berlawanan arah di seutas tali: satu menonjol ke atas, satu lagi menonjol ke bawah. Saat keduanya tepat bertumpuk di tengah, talinya lurus sesaat. Apa yang terjadi setelah itu?

- Kedua pulsa musnah selamanya karena saling meniadakan.
- Kedua pulsa memantul dan kembali ke asalnya.
- Kedua pulsa muncul lagi dan terus bergerak ke arah semula.
- Terbentuk satu pulsa besar yang diam di tengah tali.

Jawabannya: keduanya muncul lagi. Saat tali tampak lurus, energinya tidak hilang. Talinya memang lurus, tetapi bagian-bagiannya sedang **bergerak** dengan cepat (energi kinetik). Sesudah melewati satu sama lain, kedua pulsa kembali ke bentuk dan arahnya semula.

- **Interferensi konstruktif**: puncak bertemu puncak, gelombang saling menguatkan. Amplitudo total = $A_1 + A_2$.
- **Interferensi destruktif**: puncak bertemu lembah, gelombang saling melemahkan. Jika amplitudonya sama, simpangannya nol.

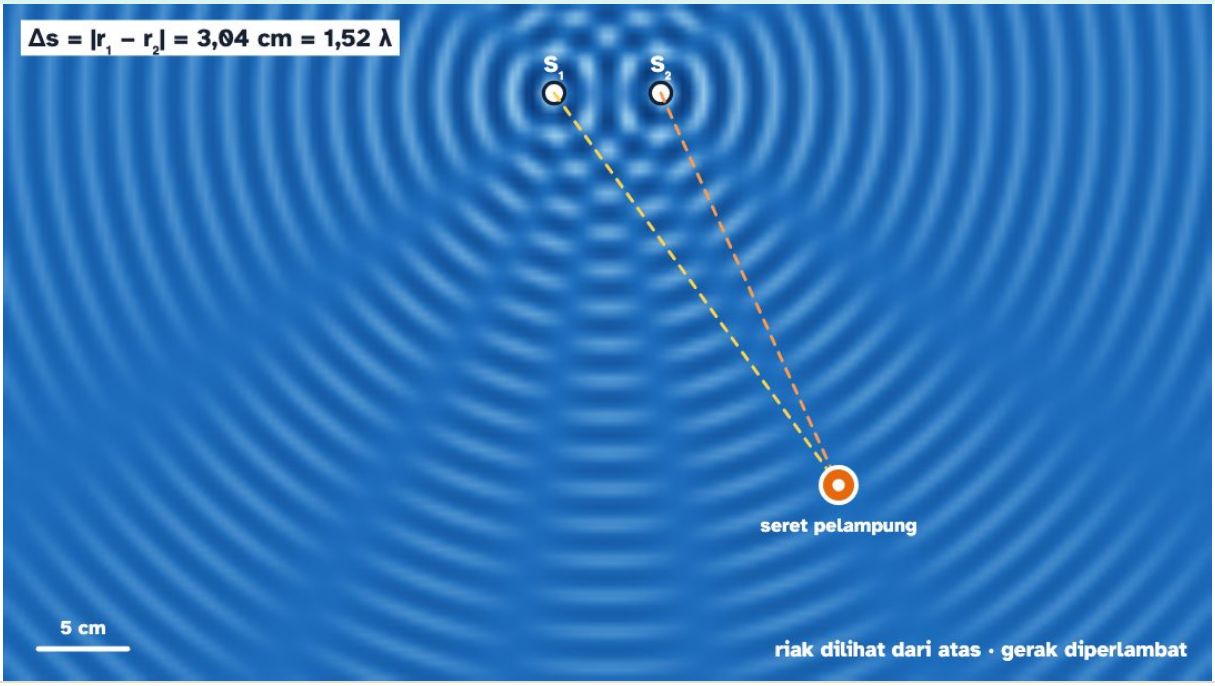
Dua sumber yang bergetar dengan frekuensi sama dan beda fase tetap disebut **sumber koheren**. Di sekitarnya terbentuk pola interferensi yang **diam**: ada garis-garis yang selalu tenang (simpul) dan garis-garis yang bergolak

kuat (perut). Untuk dua sumber sefase, jenis interferensi di suatu titik ditentukan oleh **selisih jarak** titik itu ke kedua sumber:

Selisih lintasan $\Delta s = \lvert r_1 - r_2 \rvert$	**Interferensi**	**Yang terlihat**
$0,\ \lambda,\ 2\lambda,\ \ldots = n\lambda$	konstruktif	air bergolak paling kuat
$\frac{1}{2}\lambda,\ \frac{3}{2}\lambda,\ \ldots = (n+\frac{1}{2})\lambda$	destruktif	air hampir tenang

LAB MINI **Tangki riak: dua sumber, satu pola**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-18



Jarak ke S_1	Jarak ke S_2	Selisih lintasan	Di pelampung
27,2 cm	24,2 cm	1,52 λ	destruktif (simpul)

Seret pelampung ke mana saja dan baca selisih lintasannya dalam satuan λ. Pilih mode **pola rata-rata** untuk melihat garis simpul dengan jelas. Apa yang terjadi pada jumlah garis simpul jika jarak kedua sumber diperbesar atau panjang gelombang diperkecil? Coba juga sumber berlawanan fase.

TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1800, dokter dan fisikawan Inggris **Thomas Young** mengamati riak air dari dua sumber di dalam bak dangkal. Ia menggambar pola garis-garis tenang dan bergolak yang mirip sekali dengan lab mini di atas. Young lalu menunjukkan bahwa cahaya yang melewati dua celah sempit membentuk pola serupa, sebuah bukti kuat bahwa cahaya juga gelombang. Ceritanya berlanjut di Bab 21.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGHITUNG GARIS SIMPUL

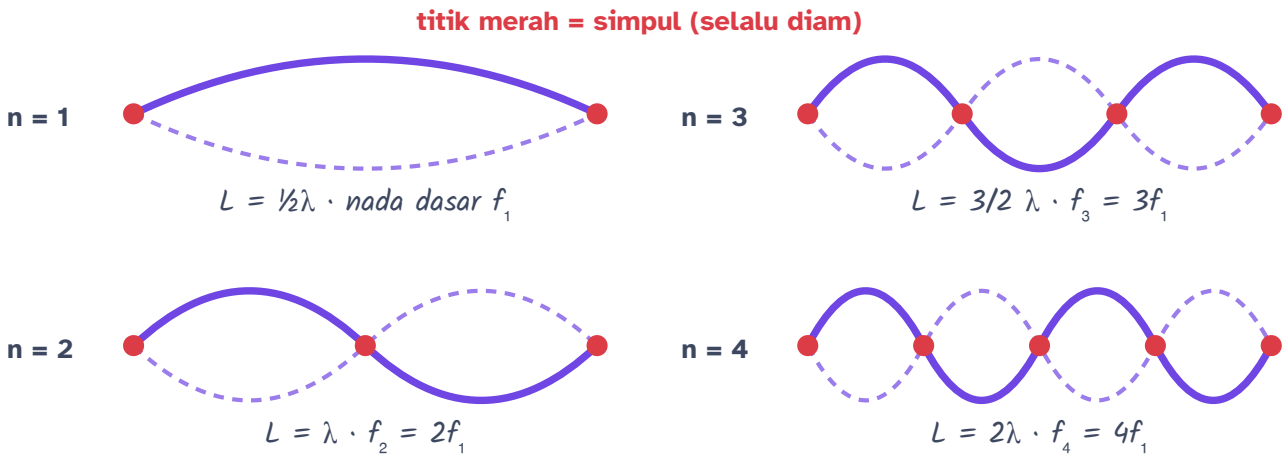
Untuk sumber sefase berjarak d, selisih lintasan tidak mungkin melebihi d. Garis simpul memenuhi $|r_1 - r_2| = (n + \frac{1}{2})\lambda < d$, sehingga di antara kedua sumber terdapat $2\times$ banyaknya bilangan bulat $n \geq 0$ yang memenuhi $(n + \frac{1}{2})\lambda < d$. Contoh: $d = 6$ cm dan $\lambda = 2$ cm memberi $n = 0, 1, 2$ (karena 1, 3, 5 cm < 6 cm), jadi ada 6 garis simpul. Bentuk garisnya adalah **hiperbola**, karena hiperbola adalah tempat kedudukan titik dengan selisih jarak tetap ke dua titik fokus.

18.7 Pemantulan dan gelombang stasioner

Gelombang yang tiba di ujung tali akan **memantul**. Cara memantulnya bergantung pada ujung tali:

- **Ujung tetap** (diikat mati ke tiang): pulsa yang kembali **terbalik**. Puncak memantul menjadi lembah, artinya fasenya berubah π (setengah getaran).
- **Ujung bebas** (cincin yang bisa meluncur di tiang licin): pulsa kembali **tidak terbalik**.

Jika ujung tali digetarkan terus-menerus, gelombang datang dan gelombang pantul bertumpuk. Pada frekuensi tertentu, hasilnya adalah pola yang tidak tampak berjalan, hanya bergoyang di tempat. Inilah **gelombang stasioner**. Titik yang selalu diam disebut **simpul** (S), dan titik yang bergetar paling kuat disebut **perut** (P). Jarak dua simpul berdekatan selalu $\frac{1}{2}\lambda$.



Pola gelombang stasioner pada dawai yang kedua ujungnya terikat. Garis penuh dan putus-putus adalah dua posisi ekstrem.

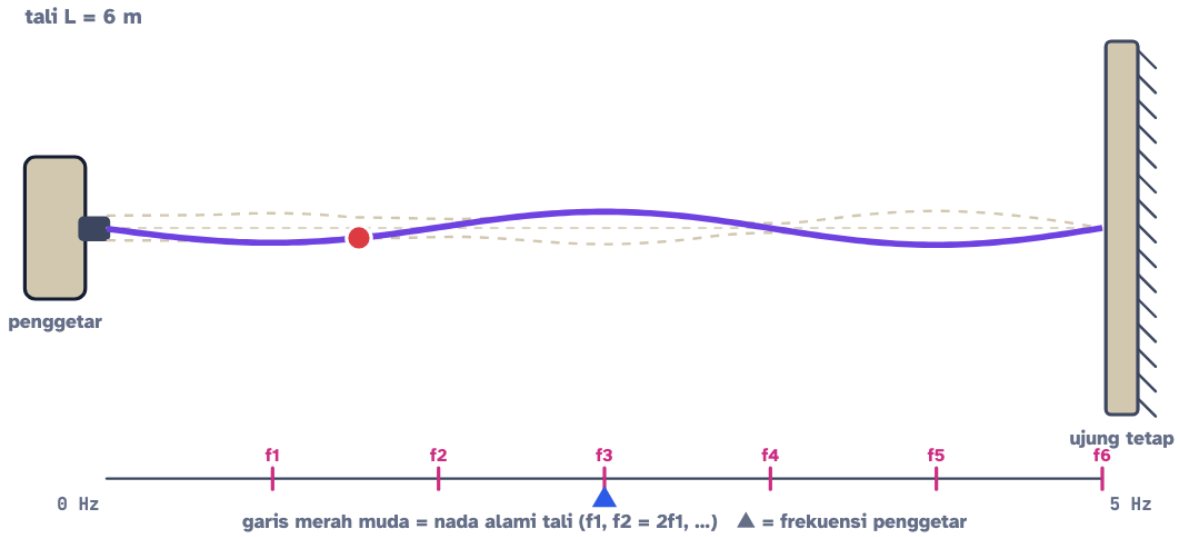
Kedua ujung dawai pasti simpul. Jadi panjang dawai harus memuat bilangan bulat kali setengah gelombang: $L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$. Dengan $v = \lambda f$, frekuensi yang "disukai" dawai adalah:

$$f_n = \frac{n\,v}{2L} = n f_1, \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Frekuensi f_1 disebut **nada dasar** (harmonik pertama), f_2 **harmonik kedua**, dan seterusnya. Jika tali digetarkan tepat pada salah satu frekuensi ini, simpangannya membesar dengan cepat. Peristiwa ini disebut **resonansi**.

LAB MINI **Tali bergetar: berjalan, memantul, berdiri**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-18



Cepat rambat v	Panjang gelombang λ	Nada dasar f_1 = v/2L	Keadaan
10 m/s	4 m	0,833 Hz	Resonansi! 3 perut

Pada mode **stasioner**, geser frekuensi perlahan dan perhatikan penanda nada alami $f_1, f_2, f_3, \ldots$ di bawah. Tepat di sana, tali bergoyang besar (resonansi) dan simpul tampak jelas. Pada mode **pulsa**, bandingkan pantulan dari ujung tetap dan ujung bebas. Ubah juga tegangan tali: apa yang terjadi pada nada alaminya?

LANJUT · IB & OLIMPIADE

RUMUS GELOMBANG STASIONER

Jumlahkan gelombang datang dan gelombang pantul yang terbalik: $y = A\sin(\omega t - kx) - A\sin(\omega t + kx) = -2A\cos(\omega t)\sin(kx)$. Faktor $2A\sin(kx)$ adalah amplitudo yang **bergantung posisi**: nol di $x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \ldots$ (simpul) dan maksimum $2A$ di $x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \ldots$ (perut). Faktor $\cos(\omega t)$ membuat semua titik bergetar serempak. Tidak ada lagi bentuk $(\omega t - kx)$, sehingga polanya memang tidak berjalan.

COBA SENDIRI **Tali tiga perut**

Seutas tali panjangnya 1,5 m dan massanya 30 g. Tali diikat di kedua ujung dan ditegangkan dengan gaya 50 N. Pada frekuensi berapa tali membentuk gelombang stasioner dengan 3 perut?

1. Massa per panjang: $\mu = \dfrac{0{,}030\ \text{kg}}{1{,}5\ \text{m}} = 0{,}02$ kg/m.
2. Cepat rambat: $v = \sqrt{F/\mu} = \sqrt{50/0{,}02} = \sqrt{2.500} = 50$ m/s.
3. Tiga perut berarti $n = 3$: $L = \frac{3}{2}\lambda$, jadi $\lambda = \frac{2\times 1{,}5}{3} = 1$ m.
4. $f_3 = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{50}{1} = 50$ Hz. Cek: $f_1 = \dfrac{v}{2L} = 16{,}7$ Hz, dan $3 \times 16{,}7 = 50$ Hz. ✓

Tali membentuk 3 perut pada 50 Hz. Nada alami lainnya: 16,7 Hz; 33,3 Hz; 66,7 Hz; dan seterusnya.

Selancar Mentawai

Ombak yang dinaiki peselancar membawa energi badai dari Samudra Hindia selatan, ribuan kilometer jauhnya.

Headphone peredam bising

Mikrofon kecil merekam bising mesin, lalu pengeras suara memutar gelombang kebalikannya. Interferensi destruktif membuat suasana hening.

Slinky di kelas

Satu mainan untuk dua jenis gelombang: digoyang ke samping menjadi transversal, didorong-tarik menjadi longitudinal.

Bono Sungai Kampar

Gelombang pasang merambat ke hulu sungai di Riau. Contoh nyata gelombang yang membawa energi jauh ke daratan.

Gitar dan sasando

Dawai yang dipetik membentuk gelombang stasioner. Menekan senar di fret memperpendek L, sehingga nadanya naik.

Seismograf BMKG

Gelombang P (longitudinal) tiba lebih dulu daripada gelombang S (transversal). Selisih waktunya dipakai untuk menghitung jarak pusat gempa.

Cek Cepat

Gelombang bunyi di udara termasuk gelombang...

- transversal, karena merambat lurus
- transversal, karena bisa memantul
- elektromagnetik, karena tidak terlihat
- longitudinal, karena partikel udara bergetar searah rambatannya

Gelombang dengan frekuensi 20 Hz merambat 340 m/s. Panjang gelombangnya...

- 6.800 m
- 17 m
- 0,059 m
- 360 m

Pada gelombang stasioner, jarak antara dua simpul yang berdekatan adalah...

- $\frac{1}{2}\lambda$
- $\frac{1}{4}\lambda$
- λ
- 2λ

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. B · 3. A

Tantangan Rumah: gelombang stasioner dari tali rafia

Bahan: tali rafia atau tali skipping sepanjang ±3 m, gagang pintu atau tiang, stopwatch di HP, seorang teman

1. Ikat satu ujung tali ke gagang pintu. Pegang ujung lainnya dan tarik sampai agak kencang.
2. Goyangkan tanganmu naik-turun dengan pelan dan teratur sampai tali membentuk **satu perut** besar. Minta temanmu menghitung banyak goyanganmu dalam 10 detik.
3. Goyangkan lebih cepat sampai terbentuk **dua perut**, lalu **tiga perut**. Hitung lagi frekuensinya.

Pertanyaan: Bagaimana perbandingan frekuensi untuk 1, 2, dan 3 perut? Apakah cocok dengan $f_n = nf_1$? Apa yang terjadi pada frekuensi yang dibutuhkan jika talinya ditarik lebih kencang? Pastikan tidak ada barang mudah pecah di sekitarmu.

RINGKASAN KILAT — Bab 18 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan bahwa gelombang memindahkan **energi**, bukan medium, serta membedakan gelombang **transversal** dan **longitudinal**
- memakai $v = \lambda f$ dan membaca panjang gelombang, amplitudo, periode, dan frekuensi dari gambar atau grafik
- membaca **persamaan gelombang berjalan** $y = A\sin(\omega t - kx)$ dan menghitung **beda fase**
- menghitung cepat rambat gelombang pada tali $v = \sqrt{F/\mu}$
- menjelaskan **superposisi**, **interferensi**, **pemantulan**, dan **gelombang stasioner** pada dawai

Istilah kunci

Gelombang · medium · Transversal · Longitudinal · fase · prinsip superposisi · sumber koheren · gelombang stasioner · simpul · perut · resonansi

Rumus penting

$$v = \lambda f$$

Cepat rambat gelombang. Cepat rambat = panjang satu gelombang × banyak gelombang per detik.

$$y = A\sin\left(2\pi\left(f\,t - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

Simpangan gelombang berjalan. Masukkan posisi dan waktu, keluarlah simpangan titik itu. Sudut sinus dalam radian.

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Cepat rambat gelombang pada tali. Tali yang kencang dan ringan → gelombang ngebut. Tali yang kendur dan berat → gelombang lambat.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Jangan campur aduk cepat rambat gelombang $v = \lambda f$ (seberapa cepat pola bergeser) dengan kecepatan partikel $v_y = \dfrac{\partial y}{\partial t} = A\omega \cos(\omega t - kx)$ (seberapa cepat...

⛰️ 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=18

🧩 Teka-teki untuk Bab 19

Pemain sasando dari Pulau Rote menyetel setiap dawai dengan memutar pasaknya. Makin kencang dawai, makin tinggi nadanya. Tapi bagaimana getaran dawai yang tipis itu bisa sampai ke telingamu, dan kenapa sasando, angklung, dan gamelan terdengar berbeda walaupun memainkan nada yang sama?

▼ **Intip petunjuk**

Dawai yang bergetar mendorong-tarik udara di sekitarnya, menghasilkan gelombang **longitudinal** di udara. Itulah **bunyi**. Perbedaan "rasa" bunyi berasal dari campuran harmonik $f_1, 2f_1, 3f_1, \ldots$ yang kamu pelajari di bab ini. Lanjut di Bab 19: Bunyi.

BAB 19 · GELOMBANG & CAHAYA

19 Bunyi: Gelombang yang Bisa Kamu Dengar

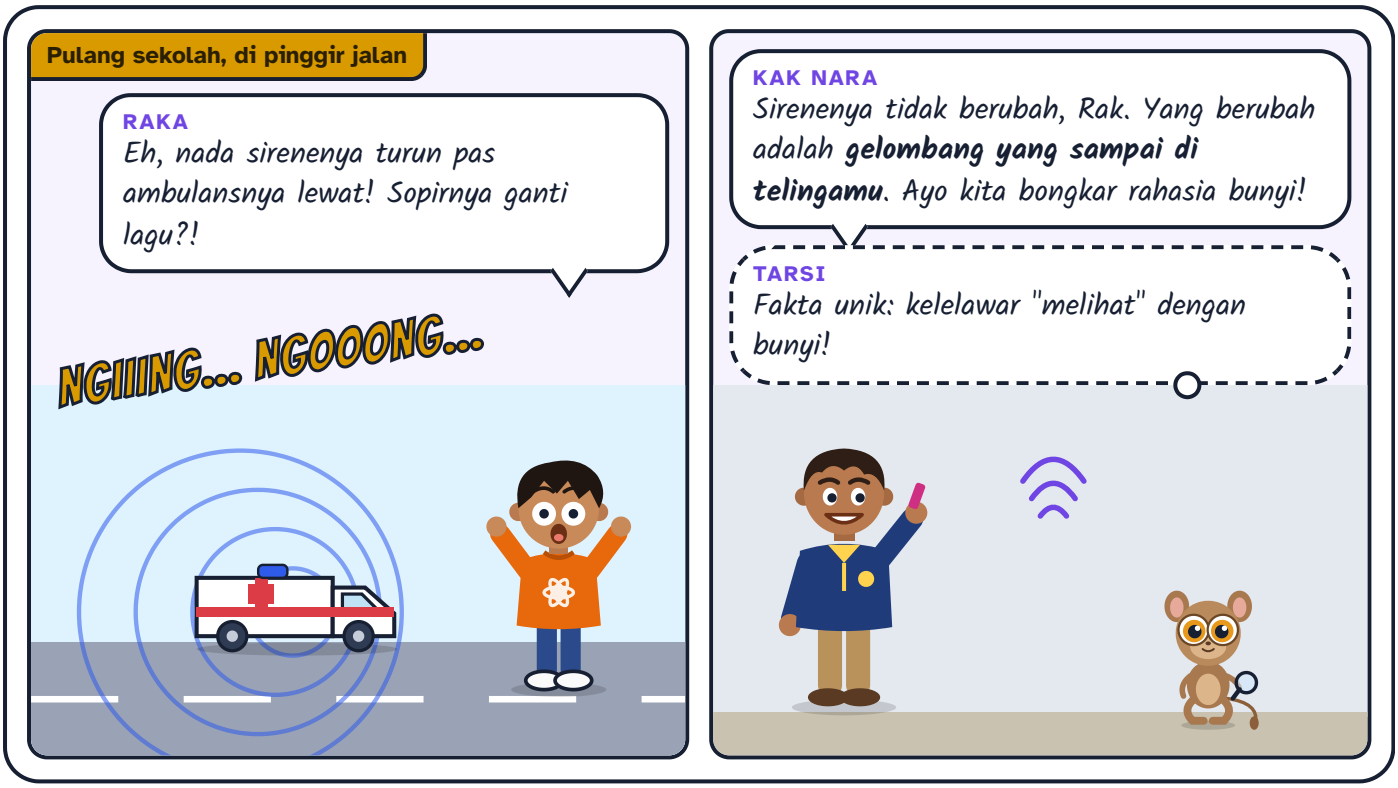
Angklung dan saron bisa memainkan nada yang sama, tetapi telingamu langsung tahu bedanya. Sirene ambulans berubah nada saat lewat, dan kelelawar "melihat" dengan telinganya. Semuanya cerita tentang udara yang dirapatkan dan direnggangkan.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan bunyi sebagai **gelombang longitudinal** berupa rapatan dan renggangan, lalu menghitung jarak petir dan gema;
- membedakan **tinggi nada**, **kenyaringan**, dan **warna bunyi**, serta menghitung taraf intensitas dalam **desibel**;
- menghitung frekuensi nada pada **dawai**, **pipa organa terbuka**, dan **pipa organa tertutup**;
- menjelaskan **resonansi**, **layangan**, dan **efek Doppler** dengan contoh nyata;
- menerapkan gelombang **ultrasonik** pada USG, SONAR nelayan, dan kelelawar.

ANGKLUNG, SARON, DAN AMBULANS

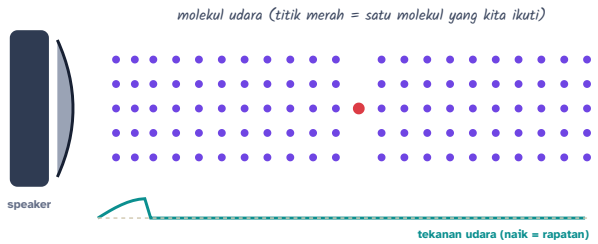
KOMIK · 4 PANEL



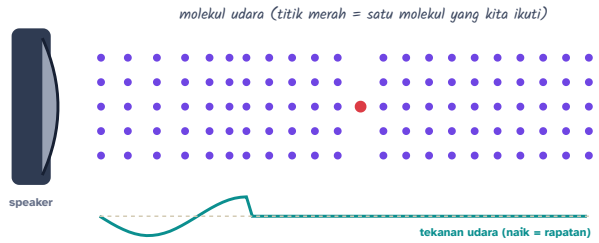
19.1 Bunyi: rapatan dan renggangan yang merambat

Semua bunyi berasal dari benda yang **bergetar**: dawai sasando, bilah saron, kulit bedug, membran speaker, atau pita suaramu. Benda bergetar itu mendorong udara di depannya sehingga molekul udara berdesakan (**rapatan**), lalu menarik diri sehingga molekul udara merenggang (**renggangan**). Pola rapatan-renggangan ini merambat menjauhi sumber sebagai **gelombang longitudinal**.

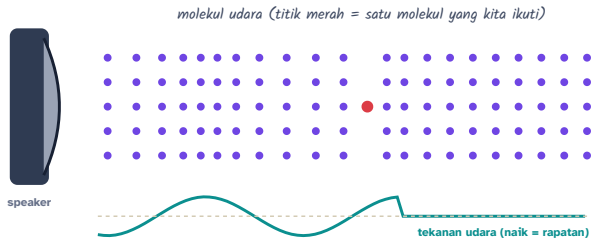
Langkah 1. Membran speaker diam. Molekul udara tersebar merata dan tekanannya sama di mana-mana.



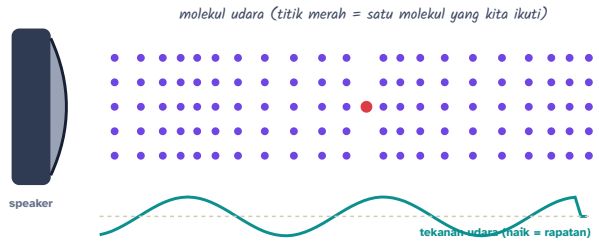
Langkah 2. Membran bergerak ke kanan dan mendorong molekul di depannya. Molekul berdesakan: terbentuk **rapatan**, tekanannya sedikit lebih tinggi.



Langkah 3. Membran bergerak ke kiri. Di depannya molekul merenggang: terbentuk **renggangan**, tekanannya sedikit lebih rendah. Rapatan pertama sudah merambat ke kanan.



Langkah 4. Membran terus bergetar, sehingga rapatan dan renggangan bergantian merambat menjauhi speaker dengan kecepatan sekitar 343 m/s.



Langkah 5. Perhatikan titik merah: molekul itu hanya maju-mundur sedikit di sekitar tempatnya. Yang sampai ke telingamu adalah **pola tekanan**, lalu gendang telingamu ikut bergetar.

Bahasa sederhana · Gampangnya: bunyi itu seperti dorongan berantai di barisan antre. Orang paling depan didorong, ia mendorong orang di depannya, dan seterusnya. Dorongannya sampai ke ujung, tetapi tiap orang hanya bergeser sedikit.

Telinga manusia bisa mendengar frekuensi sekitar **20 Hz sampai 20.000 Hz** (batas atasnya menurun seiring usia). Bunyi di bawah 20 Hz disebut **infrasonik**, misalnya gemuruh gunung api dan "obrolan" gajah. Bunyi di atas 20.000 Hz disebut **ultrasonik**, misalnya cicitan kelelawar dan gelombang alat USG.

Tebak Dulu!

Dua astronot berdiri berdekatan di permukaan Bulan tanpa radio. Astronot A berteriak sekeras-kerasnya. Apa yang didengar astronot B?

- Teriakan yang lebih jelas, karena di Bulan tidak ada angin atau bising.
- Teriakan yang lebih pelan, karena gravitasi Bulan lemah.
- Tidak ada sama sekali, karena tidak ada udara untuk merambatkan bunyi.
- Teriakan yang terlambat beberapa detik.

Jawabannya: tidak terdengar. Bunyi adalah gelombang mekanik, jadi butuh medium. Bulan hampir tidak punya atmosfer. Fakta unik: jika kedua astronot menempelkan helmnya, B bisa mendengar sedikit, karena bunyi merambat melalui padatan helm!

TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1660, ilmuwan Inggris **Robert Boyle** menaruh jam yang berdetak di dalam tabung kaca, lalu memompa udaranya keluar. Makin sedikit udara di dalam tabung, makin lirih detaknya, sampai hampir tidak terdengar, padahal jarumnya terus bergerak. Ini bukti bahwa bunyi membutuhkan udara (atau medium lain) untuk merambat.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

GELOMBANG SIMPANGAN VS GELOMBANG TEKANAN

Bunyi bisa digambarkan dengan simpangan molekul $s(x,t) = s_0 \sin(\omega t - kx)$ atau dengan perubahan tekanan $\Delta p = -B\,\dfrac{\partial s}{\partial x}$, dengan B modulus curah udara. Hasilnya Δp berbentuk kosinus: berbeda fase 90° dengan simpangan. Di titik dengan simpangan terbesar, tekanannya normal. Di titik yang simpangannya nol tetapi tetangganya mendesak dari dua sisi, tekanannya paling besar. Ini penting saat membahas pipa organa: **simpul simpangan = perut tekanan**.

19.2 Cepat rambat bunyi: petir, gema, dan bedug

Medium	Cepat rambat bunyi (kira-kira)
Udara 0 °C	331 m/s
Udara 20 °C	343 m/s

Udara 30 °C (siang hari di kota tropis)	349 m/s
Air laut	±1.500 m/s
Kayu (searah serat)	±3.500–4.500 m/s
Baja atau besi rel	±5.000–5.900 m/s

Bunyi merambat lebih cepat di zat padat dan zat cair daripada di udara, karena partikelnya terikat lebih kaku sehingga "dorongan" diteruskan lebih cepat. Di udara, makin hangat makin cepat: kira-kira $v \approx 331 + 0{,}6\,T$ m/s dengan T dalam °C.

Kilat dan guruh terjadi pada saat yang sama, tetapi cahaya tiba hampir seketika, sedangkan bunyi guruh butuh sekitar 3 detik untuk menempuh 1 km. Dari selisih waktunya, kamu bisa menghitung jarak petir: $s = v\,t$.

RUMUS HIDUP **Jarak petir dari selisih waktu**

$$s = v\,t, \qquad v \approx 331 + 0{,}6\,T$$

Hitung detik dari kilat sampai guruh, kalikan dengan cepat rambat bunyi.

t Selisih waktu kilat–guruh s

T Suhu udara °C

s Jarak petir m

JARAK PETIR

2.083

m

Guruh terdengar **6** s setelah kilat, pada udara **27** °C: petirnya sekitar **2.083** m darimu. Jika kurang dari ±30 detik, segera berlindung di dalam bangunan!

Satuan Nusantara: ≈ 43% dari tinggi Puncak Jaya · ≈ 39% dari panjang Jembatan Suramadu · ≈ 16 × tinggi Monas

Cek satuan: $\mathrm{m/s} \times \mathrm{s} = \mathrm{m}$

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

TRIK KAK NARA: ATURAN "BAGI TIGA"

Hitung detik antara kilat dan guruh, lalu **bagi tiga**. Hasilnya kira-kira jarak petir dalam kilometer. Guruh 6 detik setelah kilat berarti petir sekitar 2 km darimu. Untuk **gema**, ingat bahwa bunyi pergi dan pulang: jarak dinding = $\frac{1}{2}vt$.

CONTOH **Guruh di sore hari**

Raka melihat kilat, lalu mendengar guruh 6 detik kemudian. Suhu udara 27 °C. Berapa jarak petir itu?

1. Cepat rambat bunyi: $v \approx 331 + 0{,}6 \times 27 \approx 347$ m/s.
2. Jarak: $s = v\,t = 347 \times 6 \approx 2.080$ m.

Petir sekitar 2,1 km dari Raka. Aturan "bagi tiga" memberi 6 ÷ 3 = 2 km, cukup dekat!

FISIKA INDONESIA

Sebelum ada pengeras suara, **bedug** dan **kentongan** adalah "alat komunikasi jarak jauh" di desa-desa Indonesia. Bedug yang besar menghasilkan bunyi bernada rendah yang tidak mudah melemah dan bisa terdengar hingga jauh. Karena bunyi butuh waktu, warga yang tinggal 1 km dari masjid mendengar pukulan bedug sekitar 3 detik setelah dipukul. Kentongan di pos ronda dipukul dengan irama tertentu, dan setiap irama punya arti: ada maling, kebakaran, atau banjir.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KESALAHAN NEWTON DAN KOREKSI LAPLACE

Isaac Newton menghitung cepat rambat bunyi dengan anggapan suhu udara tetap saat dirapatkan (isotermal): $v = \sqrt{P/\rho} \approx 280$ m/s, sekitar 15% terlalu kecil. Lebih dari seabad kemudian, Pierre-Simon Laplace menyadari bahwa rapatan dan renggangan terjadi terlalu cepat sehingga kalor tidak sempat berpindah: prosesnya **adiabatik** (ingat Bab 17!). Rumus yang benar:

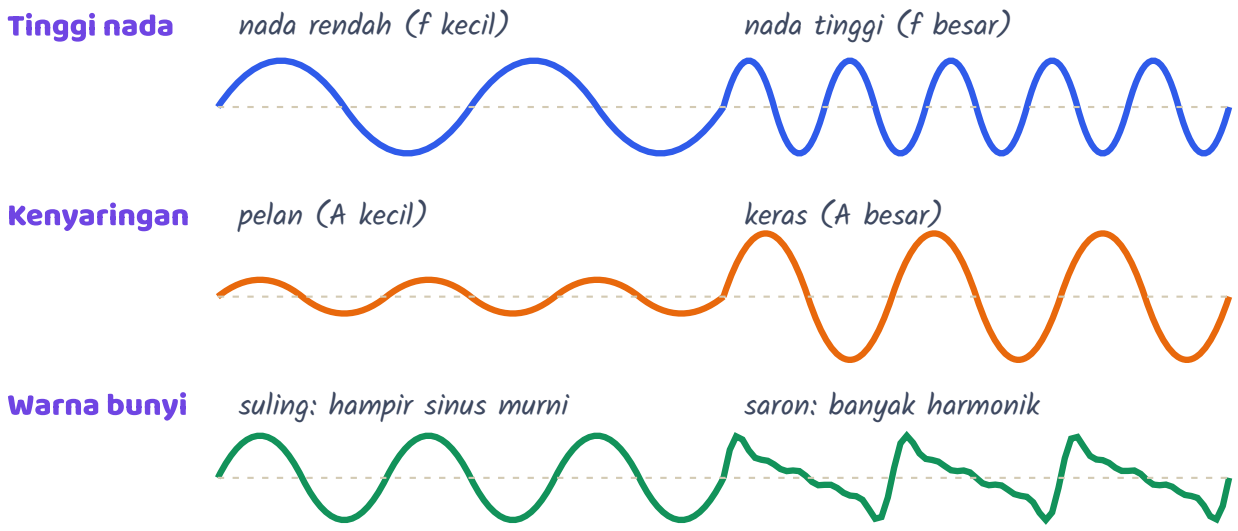
$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}.$$

Untuk udara ($\gamma = 1{,}4$, $M = 0{,}029$ kg/mol) pada 293 K, hasilnya ±343 m/s. Perhatikan: $v \propto \sqrt{T}$, tidak bergantung pada tekanan.

19.3 Tinggi nada, kenyaringan, dan warna bunyi

Tiga hal membuat setiap bunyi berbeda:

- **Tinggi nada** (*pitch*) ditentukan oleh **frekuensi**. Frekuensi tinggi terdengar melengking, frekuensi rendah terdengar berat seperti gong.
- **Kenyaringan** (*loudness*) ditentukan oleh **amplitudo** (dan intensitas). Pukulan keras membuat simpangan besar, dan bunyinya keras.
- **Warna bunyi** (*timbre*) ditentukan oleh **bentuk gelombang**, yaitu campuran nada dasar dengan harmonik-harmoniknya. Inilah sebabnya Sari bisa membedakan angklung dan saron walaupun nadanya sama.



Baris bawah: periodenya sama (nadanya sama), tetapi bentuk gelombangnya berbeda, sehingga warna bunyinya berbeda.

FISIKA INDONESIA

Gamelan (Warisan Budaya Takbenda UNESCO, 2021) punya warna bunyi yang khas karena bilah logam dan gong bergetar dengan nada-nada atas yang *tidak* tepat kelipatan nada dasarnya. Gamelan juga tidak memakai tangga nada do-re-mi, melainkan **slendro** dan **pelog**. Uniknya, setiap perangkat gamelan disetel sedikit berbeda (disebut *embat*), sehingga setiap perangkat punya "suara khas" sendiri. Sementara itu, **angklung** dari Jawa Barat (UNESCO, 2010) terdiri atas tabung-tabung bambu yang disetel berselisih satu oktaf. Pada tahun 1938, Daeng Soetigna mengembangkan angklung bertangga nada diatonis, sehingga angklung bisa memainkan lagu-lagu dunia.

19.4 Intensitas dan desibel: bahaya knalpot brong

Intensitas bunyi adalah daya bunyi yang menembus setiap meter persegi: $I = \frac{P}{A}$. Dari sumber titik, bunyi menyebar ke permukaan bola, sehingga $I = \frac{P}{4\pi r^2}$. Jarak dua kali lipat, intensitas tinggal seperempat.

Telinga manusia luar biasa peka: bisa mendengar bunyi dengan intensitas hanya $I_0 = 10^{-12}$ W/m², dan tahan sampai kira-kira 1 W/m² (sejuta-juta kali lipat!). Karena rentangnya sangat lebar, dipakai skala logaritma bernama **taraf intensitas** dalam desibel (dB):

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}, \qquad I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Sumber bunyi	Taraf intensitas (kira-kira)	Catatan
Ambang pendengaran	0 dB	$I = 10^{-12}$ W/m²
Bisikan, desa di malam hari	20–30 dB	
Percakapan biasa	±60 dB	
Lalu lintas padat kota besar	±80 dB	
Batas aman kerja 8 jam sehari	85 dB	tiap +3 dB, waktu aman tinggal separuh
Knalpot brong dari dekat	bisa di atas 100 dB	merusak telinga dalam waktu singkat
Konser rok di dekat speaker	±110 dB	
Ambang nyeri	±120–130 dB	$I \approx 1$–10 W/m²

⚠️ **AWAS JEBAKAN: DESIBEL TIDAK DIJUMLAH BIASA**

Dua motor yang masing-masing 90 dB **tidak** menghasilkan 180 dB. Intensitasnya yang dijumlah: dua kali intensitas berarti $+10 \log 2 \approx +3$ dB, jadi totalnya ±93 dB. Sepuluh motor: $+10 \log 10 = +10$ dB, jadi 100 dB. Rumusnya: $\beta_n = \beta_1 + 10 \log n$.

RUMUS HIDUP

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.

- β_1 Satu sumber, diukur dari 5 m dB
- n Banyaknya sumber buah
- r Jarak pendengar m
- β Taraf intensitas dB

TARAF INTENSITAS

105

dB

10 sumber yang masing-masing **95** dB (pada 5 m), didengar dari jarak **5** m: total **105** dB. Di atas 85 dB, telinga bisa rusak jika terlalu lama.

Cek satuan: desibel tak bersatuan (perbandingan intensitas). Tiap +10 dB = intensitas 10 kali, terdengar kira-kira 2 kali lebih keras.

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

KERJAKAN BERSAMA

Konvoi knalpot brong

Satu motor berknalpot brong menghasilkan 95 dB pada jarak 5 m. Berapa taraf intensitas jika 10 motor serupa lewat bersamaan, diukur dari jarak yang sama? Berapa jika kamu menjauh hingga 50 m?

1. Sepuluh sumber: $\beta = 95 + 10 \log 10 = 95 + 10 = 105$ dB.
2. Dari 5 m ke 50 m, jarak 10 kali, intensitas $\frac{1}{100}$ kali: $\beta = 105 - 20 \log 10 = 105 - 20 = 85$ dB.

105 dB dari dekat sudah termasuk berbahaya. Bahkan dari jarak 50 m, bunyinya masih 85 dB, sama dengan batas aman untuk 8 jam. Itulah sebabnya knalpot brong dilarang.

FISIKA INDONESIA

Peraturan baku mutu kebisingan kendaraan di Indonesia membatasi bunyi motor baru sekitar **77–83 dB**, tergantung kapasitas mesinnya. Knalpot brong bisa melampaui 100 dB, artinya intensitasnya ratusan kali lipat dari batas itu. Selain mengganggu tetangga dan pasien rumah sakit, bising di atas 85 dB yang terlalu lama bisa merusak sel-sel rambut halus di telinga dalam secara permanen.

19.5 Dawai dan pipa organa: sasando, suling, angklung

Alat musik menghasilkan nada tertentu karena di dalamnya terbentuk **gelombang stasioner** (ingat Bab 18). Ada dua keluarga besar:

Dawai: sasando, kecapi, gitar

Kedua ujung dawai terikat, jadi keduanya simpul. Frekuensi alaminya: $f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$, dengan $n = 1, 2, 3, \ldots$. Semua harmonik bisa muncul.

RUMUS HIDUP **Frekuensi nada dawai**

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Dawai pendek, kencang, dan ringan → nada tinggi. n = 1 adalah nada dasar.

- n Harmonik ke-
- L Panjang dawai m
- F Tegangan dawai N
- μ Massa per panjang g/m
- f_n Frekuensi Hz

FREKUENSI
110,4
Hz

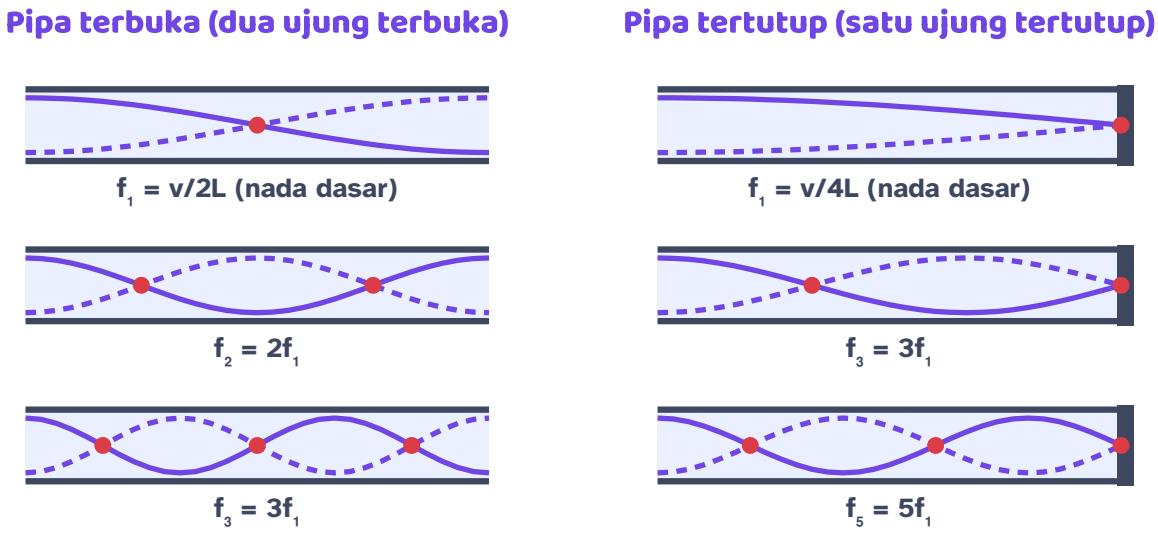
Dawai **0,65** m bertegangan **70** N dengan massa **3,4** g/m, harmonik ke-**1**: frekuensinya **110,4** Hz. Nilai awal ini ±110 Hz, nada "la" rendah pada gitar.

Cek satuan: $\frac{1}{\mathrm{m}}\sqrt{\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg/m}}} = \frac{1}{\mathrm{m}} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \mathrm{Hz}$

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

Pipa organa: suling dan tabung angklung

Di dalam pipa, yang bergetar adalah **kolom udara**. Di ujung terbuka, udara bebas bergerak, jadi terbentuk **perut simpangan**. Di ujung tertutup, udara tidak bisa bergerak, jadi terbentuk **simpul simpangan**.



Garis ungu menunjukkan besar simpangan udara. Ujung terbuka = perut, ujung tertutup = simpul. Pipa tertutup hanya memiliki harmonik ganjil.

Jenis	Frekuensi alami	Perbandingan	Contoh
Dawai (dua ujung terikat)	$f_n = n\frac{v}{2L}$	1 : 2 : 3 : ...	sasando, kecapi, gitar
Pipa organa terbuka	$f_n = n\frac{v}{2L}$	1 : 2 : 3 : ...	suling bambu (kira-kira), pipa organ
Pipa organa tertutup	$f = (2n - 1)\frac{v}{4L}$	1 : 3 : 5 : ...	tabung angklung, tabung resonator gender, botol yang ditiup

TRIK KAK NARA: DUA CARA MEMBERI NAMA

Banyak buku Indonesia menyebut nada terendah sebagai **nada dasar** f_0, lalu **nada atas pertama** f_1, **nada atas kedua** f_2, dan seterusnya. Jadi "nada atas pertama pipa tertutup" = harmonik ke-3 = $3f_0$. Cara mengingat: **"tertutup itu pelit, cuma mau angka ganjil"**: 1, 3, 5, ...

Tebak Dulu!

Kamu meniup mulut botol kosong sampai berbunyi "huuu". Lalu botol diisi air sedikit demi sedikit dan ditiup lagi. Nadanya akan...

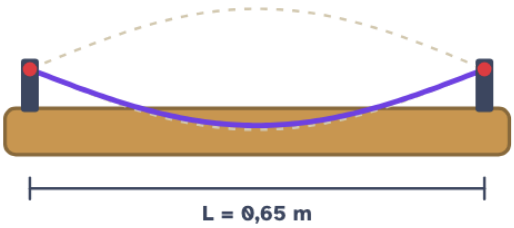
- makin rendah, karena botolnya makin berat.
- makin tinggi, karena kolom udaranya makin pendek.
- tetap, karena botolnya sama.
- makin rendah, karena air meredam bunyi.

Jawabannya: makin tinggi. Saat ditiup, yang bergetar adalah kolom udara di atas air, yang bekerja seperti pipa organa tertutup: $f = v/4L$. Air membuat L makin pendek, jadi f makin besar. Kejutan: jika botol itu **dipukul** dengan sendok, yang bergetar adalah kaca dan airnya, dan nadanya justru **turun** saat air bertambah, karena benda yang bergetar makin berat.

LAB MINI Penyintesis dawai & pipa organa (bisa didengar!)

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-19

Dawai: kedua ujung terikat (simpul)



● merah = simpul simpangan · gerak diperlambat

Nada terdekat

A2 · la

110,4 Hz

pas! ✓

Cepat rambat v	Panjang gelombang λ	Frekuensi f	Nada terdekat
143,5 m/s	1,3 m	110,4 Hz	A2 · la

Harmonik
1 (nada dasar)

Tekan **Suara** lalu **Jalankan**, kemudian geser panjang L dan dengarkan nadanya berubah. Bandingkan warna bunyi dawai, pipa terbuka, dan pipa tertutup. Coba **Tantangan nada**: setel sampai jarum tepat di tengah! (Volume dibuat pelan. Suara berhenti saat dijeda.)

FISIKA INDONESIA

Sasando dari Pulau Rote, Nusa Tenggara Timur, adalah alat musik dawai yang unik. Dawai-dawainya direntangkan mengelilingi tabung bambu, dan setiap dawai ditopang ganjal kecil dengan posisi berbeda sehingga panjang bagian yang bergetar berbeda-beda. Daun lontar yang dianyam seperti kipas setengah lingkaran berfungsi sebagai **ruang resonansi** yang memperkeras bunyi. Pemain menyetel nada dengan memutar pasak untuk mengubah tegangan dawai, persis seperti rumus $f \propto \sqrt{F}$.

KERJAKAN BERSAMA **Pipa tertutup dan pipa terbuka**

Sebuah tabung bambu tertutup di bagian bawah panjangnya 34 cm. Cepat rambat bunyi 340 m/s. Berapa frekuensi nada dasar dan nada atas pertamanya? Bagaimana jika tabung itu terbuka di kedua ujung?

1. Pipa tertutup, nada dasar: $L = \frac{1}{4}\lambda$, jadi $f = \dfrac{v}{4L} = \dfrac{340}{4 \times 0{,}34} = 250$ Hz.
2. Nada atas pertama pipa tertutup = harmonik ke-3: $3 \times 250 = 750$ Hz.
3. Pipa terbuka, nada dasar: $L = \frac{1}{2}\lambda$, jadi $f = \dfrac{v}{2L} = 500$ Hz. Nada atas pertamanya $2 \times 500 = 1.000$ Hz.

Tertutup: 250 Hz dan 750 Hz. Terbuka: 500 Hz dan 1.000 Hz. Menutup satu ujung pipa menurunkan nada dasarnya satu oktaf (setengah frekuensi)!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KOREKSI UJUNG DAN TABUNG RESONANSI

Perut simpangan di ujung terbuka sebenarnya sedikit di luar pipa, sekitar $0{,}6r$ dari ujungnya (r jari-jari pipa). Jadi panjang efektif pipa tertutup adalah $L + 0{,}6r$. Di laboratorium sekolah, koreksi ini "dihilangkan" dengan trik: garpu tala digetarkan di atas tabung berisi air yang tinggi airnya bisa diatur. Resonansi pertama terdengar pada panjang kolom L_1 dan resonansi kedua pada L_2. Karena $L_2 - L_1 = \frac{1}{2}\lambda$ (koreksi ujungnya saling meniadakan), cepat rambat bunyi dapat dihitung dengan teliti: $v = 2f(L_2 - L_1)$.

19.6 Resonansi dan layangan

Setiap benda punya frekuensi getaran alami. Ada tiga jenis getaran:

- **Getaran bebas**: benda bergetar sendiri pada frekuensi alaminya setelah diusik, misalnya garpu tala yang dipukul.
- **Getaran teredam**: amplitudonya makin kecil karena energinya hilang ke udara dan gesekan. Bunyi gong lama-lama menghilang.
- **Getaran paksa**: benda dipaksa bergetar mengikuti frekuensi sumber luar, misalnya meja yang ikut bergetar saat ponsel bergetar di atasnya.

Jika frekuensi pemaksa **sama** dengan frekuensi alami benda, amplitudonya membesar drastis. Inilah **resonansi**. Tabung bambu di bawah bilah gender dan slenthem pada gamelan Jawa adalah resonator: panjang kolom udaranya disetel agar beresonansi dengan nada bilahnya, sehingga bunyinya lebih keras dan panjang. Resonansi juga bisa merusak. Penyanyi bersuara kuat konon bisa memecahkan gelas tipis jika nadanya tepat sama dengan frekuensi alami gelas.

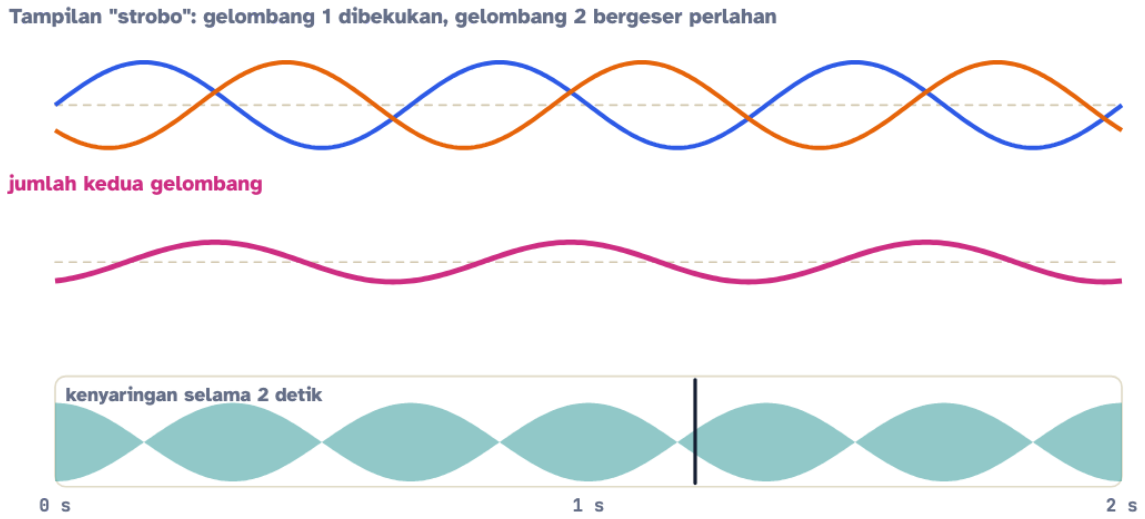
Layangan: bunyi yang berdenyut

Jika dua sumber bunyi dengan frekuensi yang **hampir sama** berbunyi bersamaan, keduanya bergantian sefase (saling menguatkan) dan berlawanan fase (saling melemahkan). Kenyaringannya naik-turun berirama: "uwung... uwung... uwung...". Ini disebut **layangan** (*beats*), dan banyaknya denyut tiap detik adalah:

$$f_L = |f_1 - f_2|$$

LAB MINI **Dua garpu tala: dengar layangannya**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-19



Layangan $\lvert f_1 - f_2 \rvert$	Nada terdengar (rata-rata)	f_2	Keadaan
3 Hz	441,5 Hz	443 Hz	Berdenyut 3× per detik

Nyalakan **Suara**, tekan **Jalankan**, dan dengarkan bunyi yang "berdenyut". Ubah f_2 mendekati f_1: denyutnya makin lambat. Lalu tekan **Garpu tala misterius** dan setel f_1 sampai layangannya hilang, persis seperti menyetel angklung atau gitar.

FISIKA INDONESIA

Gamelan Bali memakai layangan dengan sengaja! Instrumennya dibuat **berpasangan**: yang satu disetel sedikit lebih rendah (*pengumbang*) dan pasangannya sedikit lebih tinggi (*pengisep*). Saat dimainkan bersama, muncul denyut beberapa kali per detik yang disebut **ombak**. Efek berkilauan inilah yang membuat gamelan Bali terdengar hidup dan bergetar. Penyetel gamelan mengatur kecepatan "ombak" ini dengan teliti.

KERJAKAN BERSAMA **Menyetel angklung**

Sebuah angklung yang seharusnya bernada 440 Hz dibunyikan bersama garpu tala 440 Hz. Terdengar 3 layangan tiap detik. Setelah tabungnya dikikis sedikit (supaya nadanya naik), layangannya menjadi 5 tiap detik. Berapa frekuensi angklung sebelum dikikis?

1. Mula-mula $|f - 440| = 3$, jadi $f = 437$ Hz atau $f = 443$ Hz.
2. Mengikis menaikkan nada. Jika $f = 437$ Hz, nada naik akan mendekati 440 Hz sehingga layangan berkurang. Jika $f = 443$ Hz, nada naik akan menjauhi 440 Hz sehingga layangan bertambah.
3. Layangannya bertambah (3 → 5), jadi mula-mula $f = 443$ Hz.

Frekuensi awal angklung 443 Hz. Penyetel salah arah, jadi seharusnya nadanya diturunkan, bukan dinaikkan.

19.7 Efek Doppler: sirene yang "berubah lagu"

Saat ambulans mendekat, setiap rapatan dipancarkan dari posisi yang sedikit lebih dekat denganmu daripada rapatan sebelumnya. Rapatan-rapatan itu tiba lebih rapat, jadi frekuensi yang kamu dengar **lebih tinggi**. Saat ambulans menjauh, rapatan tiba lebih renggang dan frekuensinya **lebih rendah**. Perubahan frekuensi karena gerak sumber atau pendengar ini disebut **efek Doppler**.

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \mp v_s} f_s$$

f_s frekuensi sumber, f_p frekuensi yang didengar, v cepat rambat bunyi, v_s kecepatan sumber, dan v_p kecepatan pendengar. Untuk setiap kecepatan, pilih tanda atas jika benda itu bergerak **mendekati** yang lain dan tanda bawah jika bergerak **menjauhi**.

RUMUS HIDUP **Efek Doppler**

$$f_p = \frac{v + v_p}{v - v_s} f_s$$

Kecepatan positif berarti bergerak MENDEKATI yang lain; negatif berarti menjauh.

- f_s Frekuensi sirene Hz
- v_s Kecepatan sumber (+ mendekat) m/s
- v_p Kecepatan pendengar (+ mendekat) m/s
- f_p Frekuensi terdengar Hz

FREKUENSI TERDENGAR

755,6

Hz

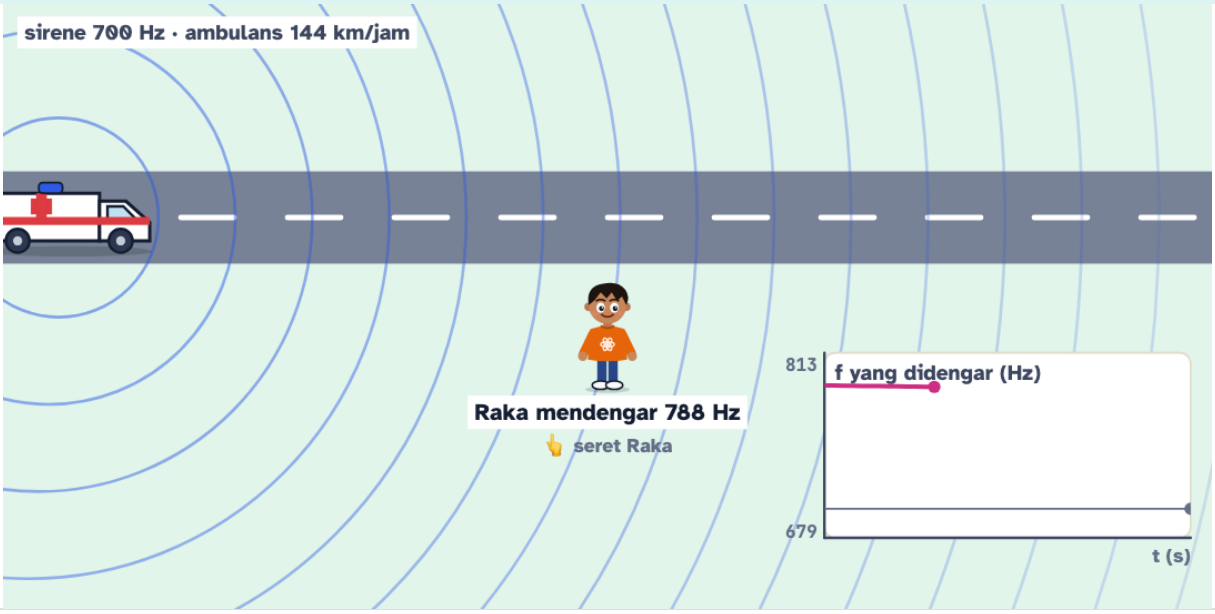
Sirene **700** Hz, sumber **25** m/s dan pendengar **0** m/s (positif = mendekat): terdengar **755,6** Hz. Ubah tanda vs untuk mendengar "lagu" ambulans yang menjauh.

Cek satuan: $\frac{\mathrm{m/s}}{\mathrm{m/s}} \times \mathrm{Hz} = \mathrm{Hz}$, dengan cepat rambat bunyi v = 340 m/s.

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

LAB MINI Ambulans lewat: lihat dan dengar efek Doppler

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-19



Didengar Raka	Sumber	Kecepatan
788 Hz	mendekat ↑ nada tinggi	144 km/jam

Bilangan Mach (v sumber / v bunyi)
0,12

Tekan **Suara** lalu **Jalankan**. **Seret Raka** lebih dekat atau lebih jauh dari jalan, lalu perhatikan grafik frekuensi: kapan nadanya turun mendadak, kapan turunnya landai? Naikkan kecepatan melebihi kecepatan bunyi untuk melihat **kerucut Mach** dan dentuman sonik.

TAMU DARI MASA LALU

Fisikawan Austria **Christian Doppler** meramalkan efek ini pada tahun 1842. Tiga tahun kemudian, ilmuwan Belanda **Buys Ballot** mengujinya dengan cara yang lucu: ia menaruh sekelompok pemain terompet di atas gerbong kereta yang melaju, sementara para pemusik bertelinga tajam di pinggir rel mencatat nada yang mereka dengar. Nadanya memang lebih tinggi saat kereta mendekat dan lebih rendah saat menjauh.

MITOS

"Makin dekat ambulans, makin tinggi nada sirenenya."

FAKTA

Selama ambulans mendekat dengan kecepatan tetap, nadanya tinggi dan **hampir tetap**. Yang bertambah adalah **kenyaringannya**. Nada turun saat ambulans lewat di depanmu.

MITOS

"Kelelawar itu buta, makanya memakai bunyi."

FAKTA

Kelelawar tidak buta. Banyak kelelawar buah bahkan punya penglihatan bagus. Kelelawar pemakan serangga memakai **ekolokasi** ultrasonik karena serangga kecil sulit dilihat di malam hari.

MITOS

"Bunyi paling cepat di udara karena udara paling ringan."

FAKTA

Justru sebaliknya: bunyi merambat sekitar 4 kali lebih cepat di air dan sekitar 15 kali lebih cepat di baja. Partikel yang terikat kaku meneruskan dorongan lebih cepat.

KERJAKAN BERSAMA **Ambulans di jalan raya**

Ambulans melaju 25 m/s dengan sirene 700 Hz. Raka berdiri diam di pinggir jalan. Cepat rambat bunyi 340 m/s. Berapa frekuensi yang didengar Raka saat ambulans mendekat dan saat menjauh?

1. Mendekat (sumber mendekati pendengar, pakai tanda atas: penyebutnya $v - v_s$): $f_p = \frac{340}{340 - 25} \times 700 = \frac{340}{315} \times 700 \approx 756$ Hz.
2. Menjauh: $f_p = \frac{340}{340 + 25} \times 700 = \frac{340}{365} \times 700 \approx 652$ Hz.

Nada turun dari ±756 Hz ke ±652 Hz, selisih ±104 Hz (lebih lebar daripada jarak nada do ke re). Itulah "lagu" ambulans: NGIIING... NGOOONG...

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KERUCUT MACH DAN DOPPLER DUA KALI

Jika sumber lebih cepat daripada bunyi ($v_s > v$), muka-muka gelombangnya bertumpuk membentuk kerucut dengan setengah sudut puncak $\sin\theta = v/v_s$. Saat kerucut ini menyapu pendengar, terdengar **dentuman sonik**. Efek Doppler juga dipakai alat pengukur kecepatan dan USG Doppler untuk aliran darah: gelombang dipantulkan oleh benda yang bergerak, jadi pergeseran terjadi **dua kali** (benda sebagai pendengar, lalu sebagai sumber). Untuk $u \ll v$, pergeserannya $\Delta f \approx \dfrac{2u}{v} f$.

19.8 Ultrasonik dan infrasonik: mendengar yang tak terdengar

Gelombang ultrasonik punya panjang gelombang pendek, sehingga bisa memantul dari benda-benda kecil dan menghasilkan "gambar" yang detail. Prinsip dasarnya selalu sama dengan gema: kirim pulsa, tunggu pantulannya, lalu hitung $s = \frac{1}{2}vt$.

- **USG** (ultrasonografi) di rumah sakit memakai frekuensi sekitar 2–15 MHz untuk melihat janin, jantung, dan organ dalam tanpa radiasi pengion.
- **SONAR** (*sound navigation and ranging*) di kapal memancarkan pulsa ke dasar laut. Nelayan memakai *fish finder* untuk menemukan gerombolan ikan dan mengukur kedalaman.
- **Kelelawar** pemakan serangga memancarkan cicitan ultrasonik dan mendengarkan gemanya untuk menemukan nyamuk di kegelapan. Lumba-lumba melakukan hal yang sama di laut.

COBA SENDIRI **SONAR kapal nelayan**

SONAR kapal nelayan di Laut Banda memancarkan pulsa ke bawah. Gema dari gerombolan ikan diterima 0,12 s kemudian, dan gema dari dasar laut 0,40 s kemudian. Cepat rambat bunyi di air laut 1.500 m/s. Berapa kedalaman gerombolan ikan dan kedalaman laut? Mengapa SONAR memakai ultrasonik, bukan bunyi biasa?

1. Bunyi pergi-pulang, jadi kedalaman = $\frac{1}{2}vt$.
2. Ikan: $\frac{1}{2} \times 1.500 \times 0{,}12 = 90$ m. Dasar laut: $\frac{1}{2} \times 1.500 \times 0{,}40 = 300$ m.
3. Ultrasonik (misalnya 200 kHz) di air punya panjang gelombang $\lambda = 1.500/200.000 = 7{,}5$ mm. Gelombang sependek ini bisa dipantulkan oleh benda kecil seperti ikan dan bisa diarahkan menjadi berkas sempit.

Gerombolan ikan di kedalaman 90 m, dasar laut di kedalaman 300 m. Ultrasonik dipakai karena panjang gelombangnya pendek, sehingga detailnya tajam dan berkasnya terarah.

FISIKA INDONESIA

Indonesia memiliki kapal riset seperti **Baruna Jaya** yang dilengkapi SONAR multiberkas (*multibeam echosounder*) untuk memetakan dasar laut Nusantara, mencari jalur kabel bawah laut, dan membantu pencarian benda yang tenggelam. Di sisi lain spektrum, letusan **Krakatau** tahun 1883 menghasilkan gelombang tekanan yang terekam barometer di seluruh dunia dan mengelilingi Bumi beberapa kali. Bunyinya konon terdengar hingga Pulau Rodrigues di Samudra Hindia, hampir 4.800 km jauhnya!

Bedug masjid

Kulit bedug yang lebar menggetarkan banyak udara sekaligus. Nadanya rendah dan terdengar jauh.

Knalpot brong

Bisa melampaui 100 dB. Bising di atas 85 dB yang terlalu lama merusak telinga secara permanen.

USG ibu hamil

Pantulan ultrasonik dari jaringan tubuh disusun komputer menjadi gambar janin, tanpa radiasi pengion.

Fish finder nelayan

Gema dari gerombolan ikan dan dasar laut ditampilkan di layar, jadi nelayan tahu di mana dan sedalam apa harus menebar jaring.

Kelelawar di gua

Ribuan kelelawar terbang keluar gua di senja hari tanpa bertabrakan, berkat ekolokasi ultrasonik.

Mengetuk semangka

Pedagang buah mengetuk semangka dan mendengarkan bunyinya. Bunyi "dug" yang dalam menandakan buah yang padat berisi air.

Cek Cepat

Gema terdengar 2 detik setelah Raka berteriak ke arah tebing. Jika cepat rambat bunyi 340 m/s, jarak tebing adalah...

- 680 m
- 170 m
- 340 m
- 1.360 m

Pipa organa tertutup memiliki nada dasar 200 Hz. Frekuensi nada atas pertamanya adalah...

- 600 Hz
- 400 Hz
- 300 Hz
- 800 Hz

Dua garpu tala 512 Hz dan 516 Hz dibunyikan bersamaan. Yang terdengar adalah...

- dua nada terpisah dengan jelas
- nada 1.028 Hz
- nada 4 Hz
- nada ±514 Hz yang kenyaringannya berdenyut 4 kali per detik

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: gamelan botol

Bahan: 5–8 botol kaca yang sama, air, sendok logam, aplikasi penala (tuner) di HP jika ada

1. Isi botol dengan air setinggi berbeda-beda, dari hampir kosong sampai hampir penuh. Jajarkan.
2. **Tiup** mulut setiap botol. Urutkan dari nada terendah ke tertinggi.
3. Sekarang **ketuk** setiap botol dengan sendok. Urutkan lagi dari nada terendah ke tertinggi.
4. Atur tinggi air sampai kamu bisa memainkan "do-re-mi" atau lagu daerah sederhana. Pakai aplikasi penala untuk mengecek frekuensinya.

Pertanyaan: Mengapa urutan nada saat ditiup terbalik dengan urutan saat diketuk? Bagian apa yang bergetar di setiap cara? Hati-hati dengan botol kaca: ketuk pelan saja.

⚡ RINGKASAN KILAT **Bab 19 dalam 3 menit**

✅ **Kamu sekarang bisa...**

- menjelaskan bunyi sebagai **gelombang longitudinal** berupa rapatan dan renggangan, lalu menghitung jarak petir dan gema
- membedakan **tinggi nada**, **kenyaringan**, dan **warna bunyi**, serta menghitung taraf intensitas dalam **desibel**
- menghitung frekuensi nada pada **dawai**, **pipa organa terbuka**, dan **pipa organa tertutup**
- menjelaskan **resonansi**, **layangan**, dan **efek Doppler** dengan contoh nyata
- menerapkan gelombang **ultrasonik** pada USG, SONAR nelayan, dan kelelawar

Istilah kunci

rapatan · renggangan · infrasonik · ultrasonik · Tinggi nada · Kenyaringan · Warna bunyi · Intensitas · taraf intensitas · resonansi · layangan · efek Doppler

Rumus penting

$$s = v\,t, \qquad v \approx 331 + 0{,}6\,T$$

Jarak petir dari selisih waktu. Hitung detik dari kilat sampai guruh, kalikan dengan cepat rambat bunyi.

$$\beta = \beta_1 + 10\log n - 20\log\frac{r}{r_1}$$

Taraf intensitas: banyak sumber dan jarak. Gandakan jumlah sumber: +3 dB. Gandakan jarak: −6 dB.

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Frekuensi nada dawai. Dawai pendek, kencang, dan ringan → nada tinggi. n = 1 adalah nada dasar.

$$f_p = \frac{v + v_p}{v - v_s}\,f_s$$

Efek Doppler. Kecepatan positif berarti bergerak MENDEKATI yang lain; negatif berarti menjauh.

Jangan sampai terjebak

- Dua motor yang masing-masing 90 dB tidak menghasilkan 180 dB.

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=19

Teka-teki untuk Bab 20

Kelelawar "melihat" dengan gema bunyi yang memantul. Kita melihat dengan cahaya yang memantul. Sekarang ambil sendok makan yang mengilap dan bercerminlah. Di satu sisi, bayanganmu terbalik. Di sisi lain, bayanganmu tegak tetapi mengecil. Sendoknya sama, kenapa hasilnya berbeda?

▼ Intip petunjuk

Satu sisi sendok melengkung ke dalam (cekung), sisi lainnya melengkung ke luar (cembung). Cara cahaya memantul dari permukaan lengkung menentukan bayangan yang terbentuk. Jawabannya ada di Bab 20: Cermin, Lensa & Alat Optik.

BAB 20 · GELOMBANG & CAHAYA

20 Cermin & Lensa: Cahaya yang Pandai Memantul dan Membelok

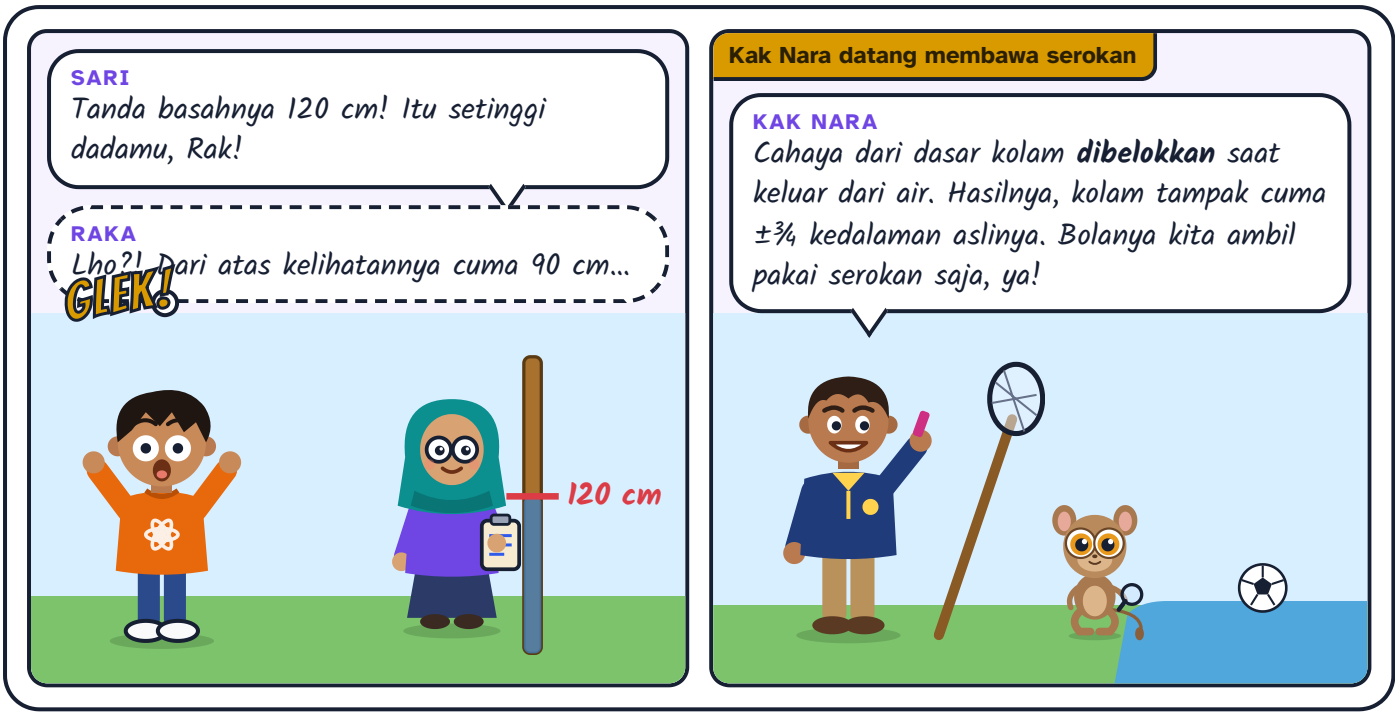
Kenapa pensil di gelas air tampak patah? Kenapa kolam selalu tampak lebih dangkal daripada aslinya? Dua aturan sederhana, yaitu memantul dan membelok, menjelaskan spion motor, kacamata minusmu, sampai internet yang merayap di dasar laut.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **hukum pemantulan** dan melukis bayangan pada cermin datar, cekung, dan cembung;
- memakai **hukum Snell**, menghitung **kedalaman semu**, dan menjelaskan **pemantulan internal total** pada serat optik;
- menjelaskan **dispersi** cahaya pada prisma dan terbentuknya pelangi;
- melukis bayangan lensa dengan sinar istimewa, lalu menghitung dengan $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$ dan perbesaran M;
- menjelaskan cacat mata, menghitung **daya kacamata** (dioptri), dan cara kerja lup, mikroskop, serta teleskop.

KOLAM YANG MENIPU

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Kamu melihat seekor ikan di kolam yang jernih. Di mana ikan itu sebenarnya berada?

- Tepat di tempat yang terlihat, karena cahaya selalu merambat lurus.
- Lebih dekat ke permukaan daripada yang terlihat.
- Lebih dalam daripada yang terlihat.
- Tidak bisa ditentukan, karena air memantulkan semua cahaya.

Jawabannya: lebih dalam. Cahaya dari ikan dibelokkan menjauhi garis normal saat keluar dari air ke udara. Otakmu tidak tahu soal belokan itu. Ia menelusuri sinar secara lurus ke belakang, sehingga "menemukan" ikan di tempat yang lebih dangkal. Karena itu, pemanah ikan tradisional membidik sedikit *di bawah* ikan yang terlihat. Karena itu pula, jangan pernah menebak dalamnya kolam atau sungai hanya dengan melihat!

20.1 Pemantulan dan cermin datar

Kita bisa melihat buku, wajah teman, atau bulan karena cahaya **memantul** dari benda-benda itu lalu masuk ke mata. Untuk menggambar perjalanan cahaya, fisikawan memakai **sinar**: garis lurus berpanah yang menunjukkan arah rambat cahaya.

Hukum pemantulan. (1) Sinar datang, garis normal, dan sinar pantul terletak pada satu bidang datar. (2) Sudut datang sama dengan sudut pantul: $i = r$.

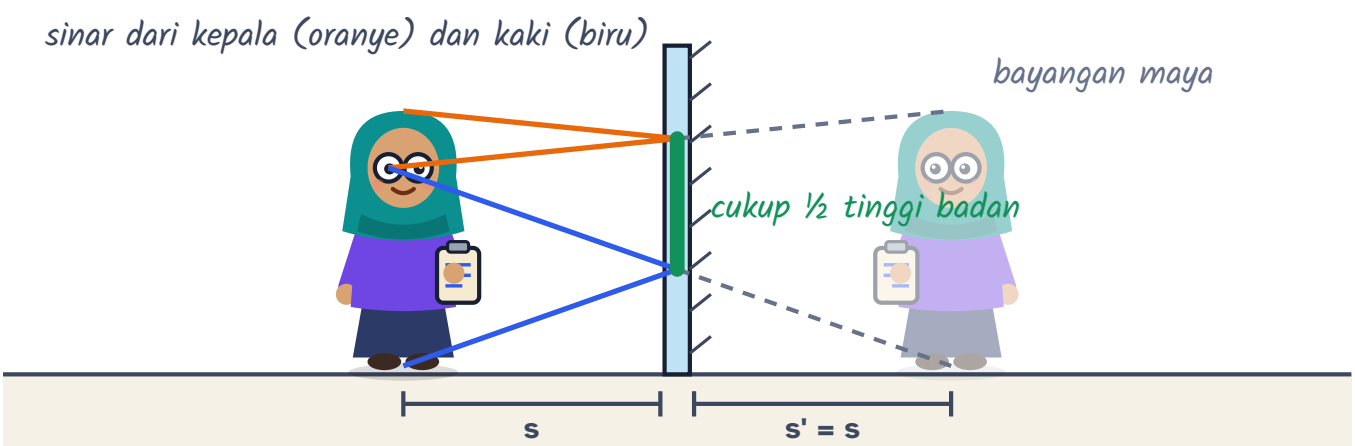
Kedua sudut diukur dari **garis normal**, yaitu garis khayal yang tegak lurus permukaan, bukan dari permukaannya. Ini jebakan favorit soal ujian!

Permukaan licin seperti cermin atau genangan air yang tenang memantulkan sinar sejajar tetap sejajar. Inilah **pemantulan teratur**, yang menghasilkan bayangan dan rasa silau. Permukaan kasar seperti kertas, tembok, atau kain menghamburkan sinar ke segala arah. Inilah **pemantulan baur**. Berkat pemantulan baur, kamu bisa membaca buku ini dari sudut mana pun.

Bahasa sederhana · Gampangnya: cahaya memantul seperti bola bekel yang dipantulkan ke lantai. Bola datang miring dari kiri, lalu memantul miring ke kanan dengan kemiringan yang sama.

Bayangan di cermin datar

Bayangan di cermin datar bersifat **maya** (sinar-sinarnya tidak benar-benar berkumpul di belakang cermin), **tegak**, **sama besar**, dan **sama jauh** di belakang cermin seperti jarak benda di depan cermin. Bayangan juga tampak **tertukar kiri-kanan**. Karena itu, tulisan "AMBULANCE" di kap depan ambulans sengaja dicetak terbalik, supaya pengemudi di depannya bisa membacanya dengan benar lewat spion.



Sinar dari ujung kepala dan ujung kaki memantul tepat di titik tengah antara mata dan bayangannya. Bagian cermin yang terpakai (hijau) hanya setengah tinggi badan, berapa pun jarakmu dari cermin.

Tebak Dulu!

Tinggi Raka 150 cm. Berapa tinggi cermin datar minimal agar Raka bisa melihat seluruh tubuhnya?

150 cm, harus setinggi badan.

75 cm, cukup setengah tinggi badan.

Tergantung jarak: makin jauh, cermin boleh makin pendek.

300 cm, karena bayangannya dua kali lebih jauh.

Cukup 75 cm. Lihat gambar di atas: sinar dari kepala memantul di titik tengah antara mata dan puncak kepala, dan sinar dari kaki memantul di titik tengah antara mata dan kaki. Jarak dua titik itu selalu setengah tinggi badan, *tidak bergantung* jarak ke cermin. Syaratnya, cermin dipasang di ketinggian yang pas.

Dua cermin bersudut: pabrik bayangan

Dua cermin datar yang membentuk sudut α menghasilkan banyak bayangan, karena bayangan di cermin satu dipantulkan lagi oleh cermin lainnya. Jika $360^\circ/\alpha$ bilangan bulat genap, jumlah bayangannya

$$n = \frac{360^\circ}{\alpha} - 1.$$

Kaleidoskop memakai prinsip ini. Di tukang cukur, dua cermin dipasang berhadapan sejajar ($\alpha \to 0$) sehingga bayangannya berderet "tak hingga" banyaknya, makin jauh makin redup.

CONTOH **Kaleidoskop buatan sendiri**

Sari menempelkan dua cermin kecil membentuk sudut 60°, lalu meletakkan manik-manik di antaranya. Berapa banyak bayangan manik-manik yang terlihat?

1. $360^\circ/60^\circ = 6$, bilangan bulat genap, jadi rumusnya berlaku.
2. $n = 6 - 1 = 5$ bayangan.

Ada 5 bayangan. Bersama manik-manik aslinya, terlihat 6 manik-manik yang tersusun melingkar seperti kelopak bunga.

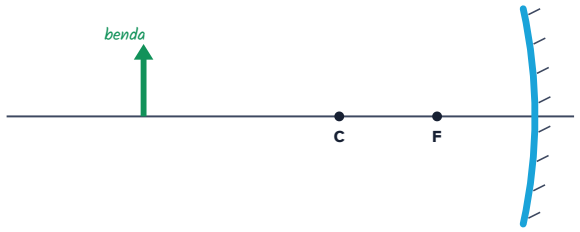
20.2 Cermin cekung dan cermin cembung

Bayangkan bola pingpong raksasa yang dibuat dari kaca cermin, lalu dipotong sebagian. Jika yang memantulkan adalah bagian **dalam**, kita mendapat **cermin cekung** (cermin konkaf). Jika yang memantulkan bagian **luar**, kita mendapat **cermin cembung** (cermin konveks). Bagian sendok yang mengilap adalah contoh sehari-hari: sisi dalamnya cermin cekung, sisi punggungnya cermin cembung.

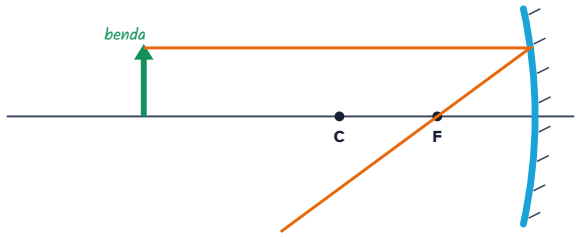
Istilah	Arti
Pusat kelengkungan C	pusat bola asal cermin; jari-jarinya R (di banyak buku ditulis titik M)
Sumbu utama	garis yang melalui C dan titik tengah cermin
Titik fokus F	titik tempat sinar-sinar sejajar sumbu utama berkumpul (cermin cekung) atau seolah-olah berasal (cermin cembung)
Jarak fokus f	jarak F ke cermin: $f = \frac{1}{2}R$

Untuk melukis bayangan, cukup pakai dua dari tiga **sinar istimewa** cermin cekung:

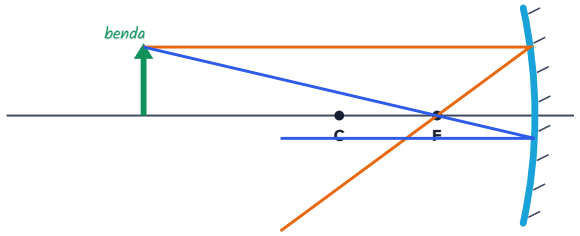
1. sinar datang **sejajar sumbu utama** dipantulkan **melalui F**;
2. sinar datang **melalui F** dipantulkan **sejajar sumbu utama**;
3. sinar datang **melalui C** dipantulkan **kembali ke jalannya semula**.



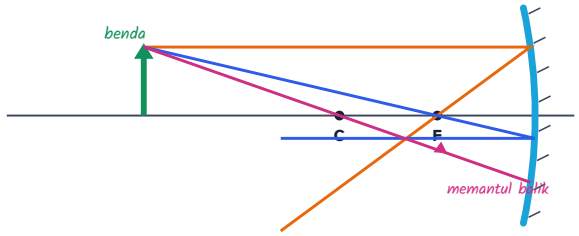
Langkah 1. Cermin cekung dengan titik fokus F dan pusat kelengkungan C. Benda berdiri lebih jauh dari C.



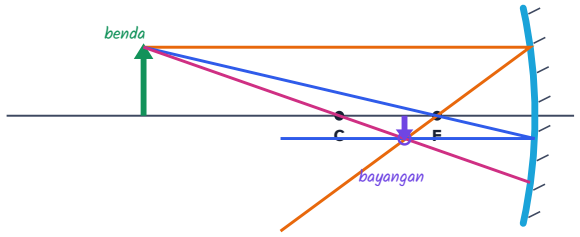
Langkah 2. Sinar 1 datang **sejajar sumbu utama**, lalu dipantulkan **melalui F**.



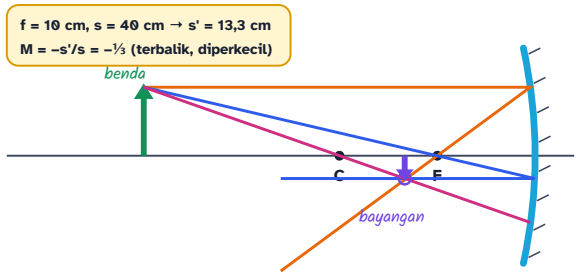
Langkah 3. Sinar 2 datang **melalui F**, lalu dipantulkan **sejajar sumbu utama**.



Langkah 4. Sinar 3 datang **melalui C**. Sinar ini menumbuk cermin tegak lurus, jadi memantul kembali ke jalannya semula.



Langkah 5. Ketiga sinar pantul berpotongan di satu titik: itulah ujung bayangan. Bayangannya **nyata, terbalik, diperkecil**, terletak di antara F dan C.



Langkah 6. Hitungannya cocok dengan lukisan (skala gambar: 1 cm ↔ 10 piksel). Tanda minus pada M berarti bayangan terbalik.

Rumus cermin lengkung

Lukisan sinar enak untuk membayangkan, tetapi rumus lebih cepat dan teliti. Untuk cermin lengkung (dan nanti juga lensa tipis):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

$$M = -\frac{s'}{s} = \frac{h'}{h}$$

Rumus ini bercerita: jarak benda s dan jarak bayangan s' saling "tawar-menawar". Jika benda didekatkan ke fokus, bayangan berlari menjauh. h dan h' adalah tinggi benda dan tinggi bayangan.

PERJANJIAN TANDA YANG DIPAKAI DI BUKU INI

Kita memakai perjanjian yang lazim di sekolah Indonesia, yaitu **"nyata itu positif"**:

- s positif untuk benda nyata (di depan cermin atau lensa);
- s' **positif** untuk bayangan **nyata** (bisa ditangkap layar) dan **negatif** untuk bayangan **maya**;
- f positif untuk cermin cekung dan lensa cembung, serta negatif untuk cermin cembung dan lensa cekung;
- M negatif berarti bayangan terbalik, dan M positif berarti bayangan tegak. $|M| > 1$ berarti diperbesar.

RUMUS HIDUP **Rumus cermin lengkung & lensa tipis**

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \implies s' = \frac{s\,f}{s - f}$$

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.

s Jarak benda cm | f Jarak fokus cm | s' Jarak bayangan cm

JARAK BAYANGAN

15

cm

cermin cekung / lensa cembung | **nyata** | **terbalik** | **diperkecil**

Benda **30** cm di depan alat optik dengan fokus **10** cm → bayangan di s' = **15** cm. Positif: nyata (bisa ditangkap layar). Negatif: maya. Jika muncul '—', benda tepat di titik fokus dan bayangannya di tak hingga.

Cek satuan: semua jarak memakai satuan yang sama (cm), jadi hasilnya juga dalam cm.

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

TRIK KAK NARA: RUANG BENDA + RUANG BAYANGAN = 5

Bagi daerah di sekitar cermin cekung menjadi empat **ruang**: ruang I antara cermin dan F, ruang II antara F dan C, ruang III di luar C, dan ruang IV di belakang cermin. Ajaibnya, **nomor ruang benda + nomor ruang bayangan = 5**. Benda di ruang III? Bayangan di ruang II (diperkecil). Benda di ruang I? Bayangan di ruang IV (maya). Aturan tambahannya: jika nomor ruang bayangan lebih besar daripada nomor ruang benda, bayangan **diperbesar**. Trik yang sama berlaku untuk lensa cembung.

Letak benda (cermin cekung)	Letak bayangan	Sifat bayangan	Contoh pemakaian
di luar C (ruang III)	antara F dan C	nyata, terbalik, diperkecil	teleskop pemantul
tepat di C	di C	nyata, terbalik, sama besar	(kasus batas)
antara F dan C (ruang II)	di luar C	nyata, terbalik, diperbesar	proyektor zaman dulu
tepat di F	di tak hingga	tidak terbentuk (sinar pantul sejajar)	lampu senter, lampu motor
antara cermin dan F (ruang I)	di belakang cermin	maya, tegak, diperbesar	cermin rias, cermin dokter gigi
di mana saja (cermin **cembung**)	di belakang cermin, antara cermin dan F	maya, tegak, diperkecil	spion, cermin tikungan

KERJAKAN BERSAMA **Cermin rias Kak Nara**

Cermin cekung berjari-jari 40 cm dipakai untuk bercukur. Wajah Kak Nara berada 15 cm di depan cermin. Di mana bayangannya, dan berapa kali perbesarannya?

1. Jarak fokus: $f = \frac{1}{2}R = 20$ cm (positif, cermin cekung).
2. $\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} = \frac{1}{20} - \frac{1}{15} = \frac{3-4}{60} = -\frac{1}{60}$, jadi $s' = -60$ cm.
3. Tanda negatif: bayangan maya, 60 cm di **belakang** cermin.
4. $M = -\frac{s'}{s} = -\frac{-60}{15} = +4.$

Bayangan maya, tegak, dan diperbesar 4 kali. Itulah sebabnya cermin rias cekung membuat pori-pori wajah tampak jelas. Syaratnya, wajah harus berada di dalam jarak fokus.

KERJAKAN BERSAMA **Spion motor**

Spion motor berupa cermin cembung dengan jarak fokus 20 cm. Sebuah mobil berada 3 m di belakang motor. Di mana bayangannya, dan berapa perbesarannya?

1. Cermin cembung: $f = -20$ cm. Jarak benda $s = 300$ cm.
2. $\frac{1}{s'} = \frac{1}{-20} - \frac{1}{300} = \frac{-15-1}{300} = -\frac{16}{300}$, jadi $s' = -18{,}75$ cm.
3. $M = -\frac{-18{,}75}{300} = +0{,}0625.$

Bayangan maya, tegak, dan hanya 1/16 ukuran aslinya. Cermin cembung menampilkan daerah yang luas dalam bayangan kecil. Akibatnya, mobil di spion tampak lebih jauh daripada aslinya. Hati-hati saat berpindah lajur!

⚠ **AWAS JEBAKAN**

"Maya" **tidak** berarti tidak bisa dilihat. Bayangan maya bisa kamu lihat dengan jelas (contohnya bayanganmu di cermin). Hanya saja, bayangan maya tidak bisa ditangkap layar, karena sinar-sinarnya tidak benar-benar bertemu di sana. Sinar-sinar itu hanya *tampak* berasal dari situ.

20.3 Pembiasan dan hukum Snell

Cahaya merambat paling cepat di ruang hampa, yaitu $c \approx 3 \times 10^8$ m/s. Di dalam air, kaca, atau intan, cahaya melambat. Perbandingannya disebut **indeks bias**:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Saat cahaya masuk miring ke medium lain dan lajunya berubah, arahnya ikut **membelok**. Peristiwa ini disebut **pembiasan** (refraksi).

Bayangkan barisan Paskibra yang berbaris miring dari lapangan aspal ke lapangan berumput tebal. Anggota barisan yang lebih dulu menginjak rumput melangkah lebih pendek, sementara temannya masih melaju di aspal. Akibatnya, seluruh barisan berbelok. Ke mana? Ke arah **mendekati garis normal**. Begitulah cahaya saat masuk ke medium yang lebih "lambat".

Medium	Indeks bias n (±)	Laju cahaya
ruang hampa / udara	1,00	300.000 km/s
es	1,31	229.000 km/s
air	1,33 (≈ 4/3)	225.000 km/s
kaca biasa	1,50	200.000 km/s
intan	2,42	124.000 km/s

Hukum Snell. Saat cahaya merambat dari medium 1 ke medium 2: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. Sudut θ_1 dan θ_2 diukur dari garis normal.

- Dari medium kurang rapat ke lebih rapat (udara → air): sinar **mendekati** normal.
- Dari medium lebih rapat ke kurang rapat (air → udara): sinar **menjauhi** normal.
- Sinar yang datang tegak lurus ($\theta_1 = 0$) tidak berbelok, walaupun lajunya tetap berubah.

RUMUS HIDUP **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.

n_1 Indeks bias asal | θ_1 Sudut datang ° | n_2 Indeks bias tujuan | θ_2 Sudut bias °

SUDUT BIAS

32,1

°

sinar mendekati normal

Dari medium n = **1** ke n = **1,33** dengan sudut datang **45°** → sudut bias **32,1°**. Jika muncul '—', tidak ada sinar bias sama sekali: semua cahaya dipantulkan (pemantulan internal total, lihat 20.4)!

Cek satuan: indeks bias tidak bersatuan, karena merupakan perbandingan dua laju: $n = c/v$.

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

Saat masuk ke medium lain, **frekuensi** cahaya tidak berubah (warnanya tetap), tetapi lajunya berubah. Karena $v = \lambda f$, panjang gelombangnya ikut memendek: $\lambda_{\text{medium}} = \lambda_{\text{udara}}/n$. Ingat ini untuk Bab 21!

Kedalaman semu: kenapa kolam menipu

Sinar dari dasar kolam dibelokkan menjauhi normal saat keluar dari air. Mata menelusuri sinar itu lurus ke belakang, sehingga dasar kolam tampak terangkat. Untuk pengamatan hampir tegak lurus dari atas:

$$h' = h\,\frac{n_{\text{pengamat}}}{n_{\text{benda}}},$$

sehingga jika dilihat dari udara, $h' = h/n_{\text{air}}$.

RUMUS HIDUP **Kedalaman semu**

$$h' = \frac{h}{n}$$

Dilihat dari udara, benda di dalam air tampak lebih dangkal: kedalamannya seolah dibagi indeks bias.

- h Kedalaman sebenarnya m
- n Indeks bias zat cair
- h' Kedalaman semu (yang terlihat) m

KEDALAMAN SEMU (YANG TERLIHAT)

0,9

m

Kolam sedalam **1,2** m tampak hanya **0,9** m dari atas. Itu sebabnya Raka mengira kolamnya cetek!

Cek satuan: h' memakai satuan yang sama dengan h; n tidak bersatuan.

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

CONTOH **Kolam renang sekolah**

Dasar kolam renang sedalam 2,0 m dilihat tegak dari atas. Indeks bias air 4/3. Berapa kedalaman yang terlihat?

1. $h' = \frac{h}{n} = \frac{2{,}0}{4/3} = 2{,}0 \times \frac{3}{4}.$
2. $h' = 1{,}5$ m.

Kolam tampak 1,5 m, padahal dalamnya 2,0 m. Selisih 50 cm itu bisa berbahaya bagi yang belum pandai berenang. Selalu baca papan penanda kedalaman!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KACA PLAN-PARALEL: SINAR BERGESER, TIDAK BERBELOK

Sinar yang menembus kaca jendela setebal t keluar **sejajar** sinar datang, karena pembiasan di permukaan pertama "dibatalkan" oleh permukaan kedua. Sinar hanya bergeser ke samping sejauh

$$d = \frac{t\,\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos\theta_2}.$$

Pada sudut datang kecil, $d \approx t\,\theta_1\left(1 - \frac{1}{n}\right)$ (sudut dalam radian). Benda di balik balok kaca setebal t juga tampak lebih dekat sejauh $t\left(1 - \frac{1}{n}\right)$. Ini cara cepat mengukur indeks bias balok kaca di laboratorium.

TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1021, ilmuwan Basra-Kairo **Ibnu al-Haitham** (Alhazen) menulis *Kitab al-Manazir* (Kitab Optika). Dengan eksperimen kamar gelap, ia membuktikan bahwa kita melihat karena cahaya **masuk** ke mata, bukan karena mata memancarkan "sinar penglihatan" seperti dugaan banyak orang sebelumnya. Enam abad kemudian, **Willebrord Snellius** dari Belanda (1621) menemukan hubungan sinus yang kini kita sebut hukum Snell.

20.4 Pemantulan internal total dan serat optik

Saat cahaya keluar dari medium rapat ke medium renggang (misalnya dari air ke udara), sinar bias menjauhi normal. Jika sudut datang diperbesar, sinar bias makin miring. Pada satu sudut tertentu, sinar bias tepat menyusur permukaan ($\theta_2 = 90°$). Sudut ini disebut **sudut kritis** θ_c:

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (n_1 > n_2).$$

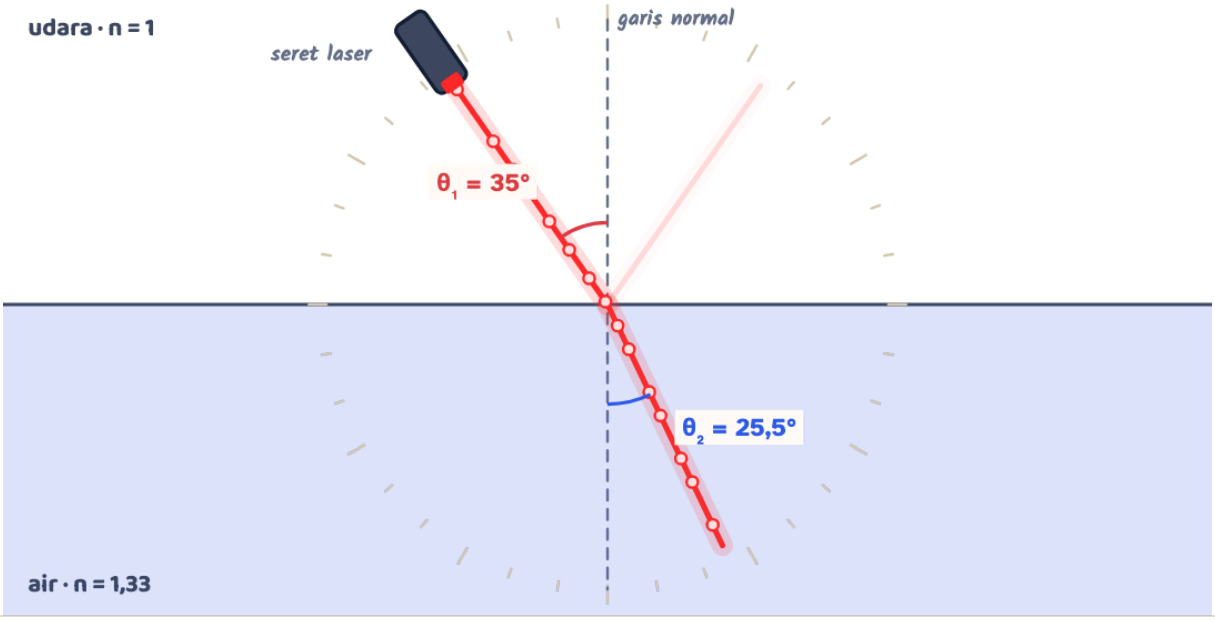
Jika sudut datang **melebihi** θ_c, tidak ada lagi cahaya yang keluar. Semuanya dipantulkan kembali ke dalam, seperti cermin sempurna. Peristiwa ini disebut **pemantulan internal total** (*total internal reflection*).

Batas medium	Sudut kritis (±)
air → udara	49°
kaca → udara	42°
intan → udara	24°

Sudut kritis intan sangat kecil, sehingga cahaya yang masuk ke intan berasah terjebak, terpantul berkali-kali, lalu keluar dari bagian atas. Itulah rahasia kilau intan.

LAB MINI **Laser, kolam, dan sudut kritis**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-20

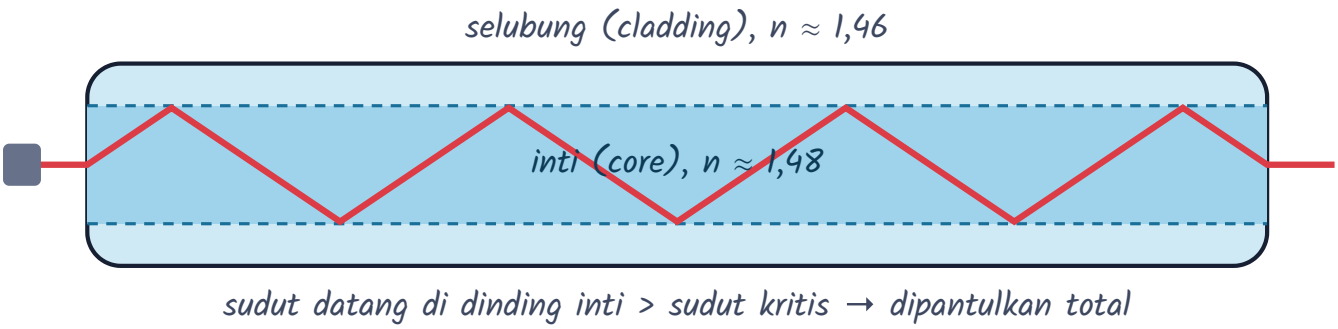


Sudut datang	Sudut bias	Sudut kritis	Dipantulkan
35 °	25,5°	tidak ada ($n_1 \leq n_2$)	2 %

Seret **laser** mengelilingi titik tengah, atau geser slider sudutnya. Pindahkan laser ke **bawah** (di dalam air atau kaca), lalu perbesar sudutnya pelan-pelan. Pada sudut berapa sinar bias menghilang? Bandingkan sudut kritis air, kaca, dan intan. Titik-titik bercahaya menunjukkan laju cahaya: perhatikan bahwa titik itu melambat di medium yang lebih rapat!

Serat optik: pipa cahaya

Serat optik adalah benang kaca setipis rambut. Intinya (*core*) berindeks bias sedikit lebih besar daripada selubungnya (*cladding*). Cahaya laser yang masuk dengan sudut landai terus-menerus mengalami pemantulan internal total, sehingga terpandu sampai ratusan kilometer, bahkan melalui tikungan.



Cahaya terpantul total berkali-kali di dalam inti serat optik. (Pantulan digambar jauh lebih curam dan lebih jarang daripada aslinya agar mudah dilihat.)

FISIKA INDONESIA

Palapa Ring adalah "tol langit" Indonesia: jaringan kabel serat optik nasional sepanjang sekitar 12.000 km, yang sebagian besar digelar di dasar laut, menghubungkan pulau-pulau dari Sumatra sampai Papua. Proyek ini rampung pada 2019. Saat kamu menonton video belajar di Sorong atau di Natuna, datanya kemungkinan besar meluncur sebagai kedipan cahaya yang terpantul total miliaran kali di dalam serat kaca!

Fatamorgana di jalan tol

Siang terik di jalan tol, aspal di kejauhan tampak "basah berkilau" seperti genangan. Udara tepat di atas aspal panas lebih renggang, sehingga indeks biasnya sedikit lebih kecil. Cahaya dari langit yang turun landai terus dibelokkan menjauhi normal, lapis demi lapis, sampai akhirnya berbelok naik ke matamu. Yang kamu lihat sebenarnya adalah **bayangan langit**. Inilah **fatamorgana**: saudara pemantulan internal total, tetapi terjadi secara bertahap.

MITOS

"Genangan air di jalan tol yang panas itu nyata, hanya cepat kering."

MITOS

"Cahaya selalu merambat lurus, jadi kabel internet harus lurus juga."

FAKTA

Itu fatamorgana: bayangan langit akibat cahaya yang dibelokkan lapisan udara panas di atas aspal. "Genangan" itu selalu menjauh saat kamu mendekat, dan bisa difoto, karena cahayanya memang nyata, hanya arahnya yang menipu.

FAKTA

Di dalam serat optik, cahaya dipandu oleh pemantulan internal total, sehingga ia ikut membelok di tikungan kabel, asalkan tikungannya tidak terlalu tajam. Kabel Palapa Ring meliuk mengikuti dasar laut.

20.5 Prisma, dispersi, dan pelangi

Saat cahaya melewati **prisma** kaca, cahaya dibiaskan dua kali: saat masuk dan saat keluar. Sinar akhirnya dibelokkan menjauhi puncak prisma sebesar **sudut deviasi** D. Untuk prisma dengan sudut puncak β, sudut deviasi paling kecil (*deviasi minimum*) terjadi ketika sinar melintas simetris di dalam prisma:

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\beta + D_{\min})}{\sin \frac{1}{2}\beta}$$

Untuk prisma tipis (sudut puncak kecil), rumusnya menyederhana menjadi $D_{\min} \approx (n-1)\beta$.

Yang menakjubkan: indeks bias kaca sedikit berbeda untuk tiap warna. Cahaya ungu "lebih lambat" di kaca daripada cahaya merah, sehingga ungu dibelokkan paling kuat. Cahaya putih pun terurai menjadi spektrum. Peristiwa ini disebut **dispersi**.

TRIK KAK NARA: MEJIKUHIBINIU

Urutan warna pelangi dari yang paling sedikit dibelokkan: **Me**rah, **Ji**ngga, **Ku**ning, **Hi**jau, **Bi**ru, **Ni**la, **U**ngu. Merah memiliki panjang gelombang terpanjang dan dibelokkan paling sedikit. Ungu memiliki panjang gelombang terpendek dan dibelokkan paling banyak.

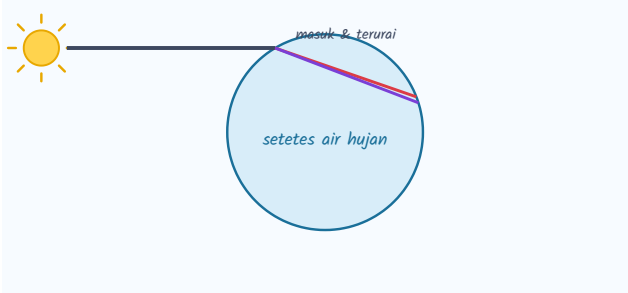
KERJAKAN BERSAMA **Prisma sama sisi**

Prisma kaca sama sisi ($\beta = 60°$) memiliki indeks bias 1,50. Berapa sudut deviasi minimumnya?

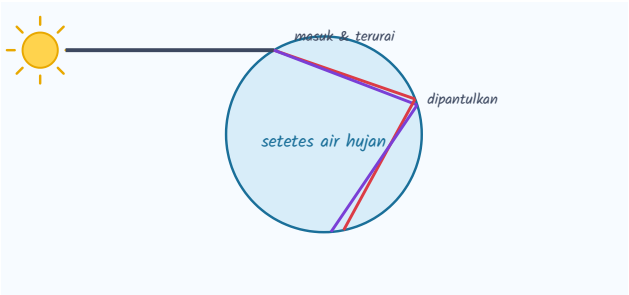
1. $\sin \frac{1}{2}(60° + D_{\min}) = n \sin 30°$, yaitu $1{,}50 \times 0{,}5 = 0{,}75$.
2. $\frac{1}{2}(60° + D_{\min}) = \arcsin 0{,}75 \approx 48{,}6°$.
3. $D_{\min} = 2 \times 48{,}6° - 60° \approx 37{,}2°$.

Sinar dibelokkan sekitar 37°. Rumus prisma tipis $(n-1)\beta = 30°$ meleset cukup jauh, karena 60° jelas bukan sudut "tipis".

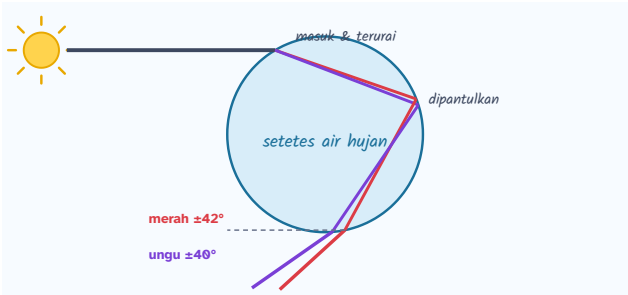
Langkah 1. Sinar Matahari (putih) menuju setetes air hujan yang bulat.



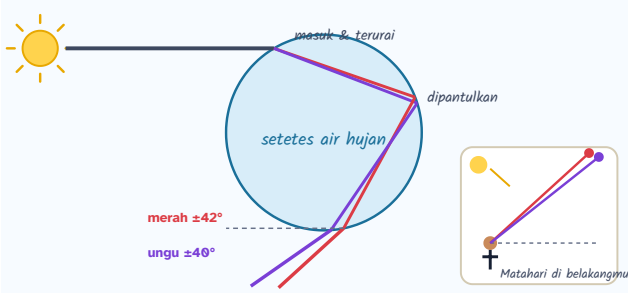
Langkah 2. Saat masuk, cahaya dibiaskan. Ungu dibelokkan sedikit lebih kuat daripada merah, sehingga warna mulai terurai (pemisahan di gambar dilebihkan agar terlihat).



Langkah 3. Di sisi belakang tetes, cahaya dipantulkan kembali ke dalam.



Langkah 4. Saat keluar, cahaya dibiaskan lagi. Cahaya merah keluar membentuk sudut sekitar 42° terhadap arah sinar Matahari, sedangkan ungu sekitar 40°.



Langkah 5. Jutaan tetes bekerja sama. Matamu menerima merah dari tetes yang lebih tinggi dan ungu dari tetes yang lebih rendah. Karena itu, merah selalu berada di busur **luar** pelangi, dan pelangi hanya terlihat saat Matahari di belakangmu.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1666, Isaac Newton yang berusia 23 tahun menggelapkan kamarnya, membuat lubang kecil di jendela, lalu menaruh prisma di jalan sinar Matahari. Muncullah pita pelangi di dinding. Ia lalu menaruh prisma kedua untuk menyatukan kembali warna-warna itu menjadi putih. Kesimpulannya mengejutkan zamannya: cahaya putih **bukan** cahaya "murni", melainkan campuran semua warna.

Bahasa sederhana · Pelangi muncul setelah hujan saat Matahari bersinar di belakangmu. Setiap tetes air bekerja seperti prisma mini yang memecah cahaya putih menjadi tujuh warna.

20.6 Lensa cembung dan lensa cekung

Lensa adalah benda bening yang dibatasi permukaan lengkung. **Lensa cembung** (konveks) lebih tebal di tengah dan **mengumpulkan** sinar sejajar ke satu titik fokus, sehingga disebut lensa positif. **Lensa cekung** (konkaf) lebih tipis di tengah dan **menyebarkan** sinar seolah-olah berasal dari satu titik fokus, sehingga disebut lensa negatif. Lensa punya dua titik fokus, F_1 di depan dan F_2 di belakang.

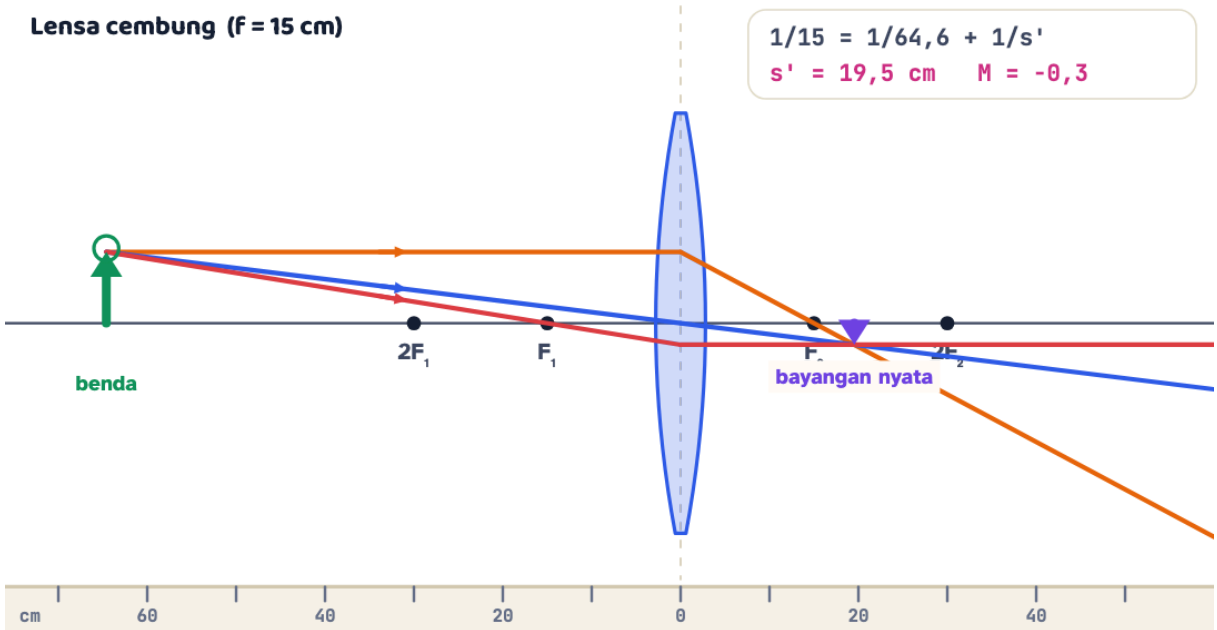
Tiga sinar istimewa lensa:

1. sinar **sejajar sumbu utama** dibiaskan **melalui** F_2 (lensa cembung) atau seolah-olah **berasal dari** F_1 (lensa cekung);
2. sinar **melalui pusat optik** lensa diteruskan **tanpa dibelokkan**;
3. sinar yang **melalui** F_1 (lensa cembung) atau yang arahnya **menuju** F_2 (lensa cekung) dibiaskan **sejajar sumbu utama**.

Kabar baiknya, rumus $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$ dan $M = -s'/s$ **sama persis** dengan rumus cermin, termasuk perjanjian tandanya. Bedanya hanya satu: bayangan nyata lensa berada di **belakang** lensa (di seberang benda), sedangkan bayangan nyata cermin berada di **depan** cermin.

LAB MINI **Meja optik: seret benda, kejar bayangannya**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-20



Jarak benda s	Jarak bayangan s'	Perbesaran M	Sifat bayangan
64,6 cm	19,5 cm	-0,3	nyata, terbalik, diperkecil

Pilih alat optik, lalu **seret panah hijau** (benda) maju-mundur atau naik-turun. Tekan **Jalankan** agar benda berjalan sendiri dari jauh mendekati alat optik. Garis tebal adalah sinar sungguhan, garis putus-putus adalah perpanjangan sinar ke belakang (pembentuk bayangan maya). Coba buat bayangan nyata yang **sama besar** dengan bendanya. Di mana bendanya harus diletakkan?

Tebak Dulu!

Lensa cembung membentuk bayangan lilin yang tajam di layar. Lalu separuh atas lensa ditutup kertas hitam. Apa yang terjadi pada bayangan di layar?

- Hanya separuh bawah bayangan lilin yang tersisa.
- Hanya separuh atas bayangan lilin yang tersisa.
- Bayangan tetap utuh, tetapi lebih redup.
- Bayangan hilang sama sekali.

Bayangan tetap utuh, hanya lebih redup! Setiap titik pada lilin memancarkan cahaya ke *seluruh* permukaan lensa. Setiap bagian lensa, termasuk separuh bawahnya, mampu membentuk bayangan seluruh lilin. Menutup separuh lensa hanya mengurangi jumlah cahaya yang terkumpul. Coba sendiri di rumah dengan lup!

Daya lensa: satuan di resep kacamata

Ahli optik tidak memakai jarak fokus, melainkan **daya lensa** P dalam satuan **dioptri** (D):

$$P = \frac{1}{f\ (\text{meter})} = \frac{100}{f\ (\text{cm})}.$$

Lensa cembung berdaya positif ("plus"), dan lensa cekung berdaya negatif ("minus"). Dua lensa tipis yang ditempelkan rapat (berimpit) dayanya tinggal dijumlahkan: $P_{\text{gabungan}} = P_1 + P_2$.

COBA SENDIRI **Proyektor kelas**

Raka ingin membuat proyektor sederhana. Gambar (benda) harus diperbesar 50 kali di dinding yang berjarak 4 m dari lensa. Berapa jarak gambar ke lensa, dan berapa jarak fokus lensa yang dibutuhkan?

1. Bayangan nyata di dinding: $s' = 400$ cm. Bayangan proyektor terbalik, jadi $M = -50$ (itu sebabnya film dipasang terbalik).
2. $M = -s'/s \Rightarrow s = s'/50 = 400/50 = 8$ cm.
3. $\frac{1}{f} = \frac{1}{8} + \frac{1}{400} = \frac{50+1}{400} = \frac{51}{400}$, jadi $f = 400/51 \approx 7{,}84$ cm.

Gambar diletakkan 8 cm dari lensa cembung berfokus ±7,8 cm, yaitu sedikit di luar titik fokus (ruang II). Bayangannya jatuh jauh di ruang III. Ingat trik ruang: 2 + 3 = 5.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

RUMUS PEMBUAT LENSA

Jarak fokus lensa ditentukan oleh bahan dan kelengkungannya:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_{\text{lensa}}}{n_{\text{medium}}} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right),$$

dengan R positif untuk permukaan yang cembung ke arah datangnya cahaya. Akibat menariknya: lensa kaca ($n = 1{,}5$) yang dicelupkan ke air ($n = 4/3$) faktor pertamanya turun dari 0,5 menjadi 0,125, sehingga jarak fokusnya menjadi **empat kali** lebih panjang. Itulah sebabnya mata kita kabur di dalam air: kornea kehilangan sebagian besar daya biasnya. Kacamata renang mengembalikan lapisan udara di depan kornea.

20.7 Mata, kacamata, lup, mikroskop, dan teleskop

Mata adalah kamera paling canggih yang kamu miliki. Kornea dan **lensa mata** membiaskan cahaya sehingga bayangan jatuh di **retina**. Bayangan itu nyata dan terbalik, lalu otak "membaliknya" kembali. Jarak lensa ke retina tetap, jadi bagaimana mata bisa memfokuskan benda dekat dan jauh? Otot siliar mengubah kecembungan lensa mata. Lensa dibuat tipis untuk melihat jauh dan lebih cembung untuk melihat dekat. Kemampuan ini disebut **daya akomodasi**.

- **Titik dekat** (*punctum proximum*, PP): jarak terdekat yang masih terlihat tajam. Untuk mata normal, PP = 25 cm.
- **Titik jauh** (*punctum remotum*, PR): jarak terjauh yang masih terlihat tajam. Untuk mata normal, PR = tak hingga.

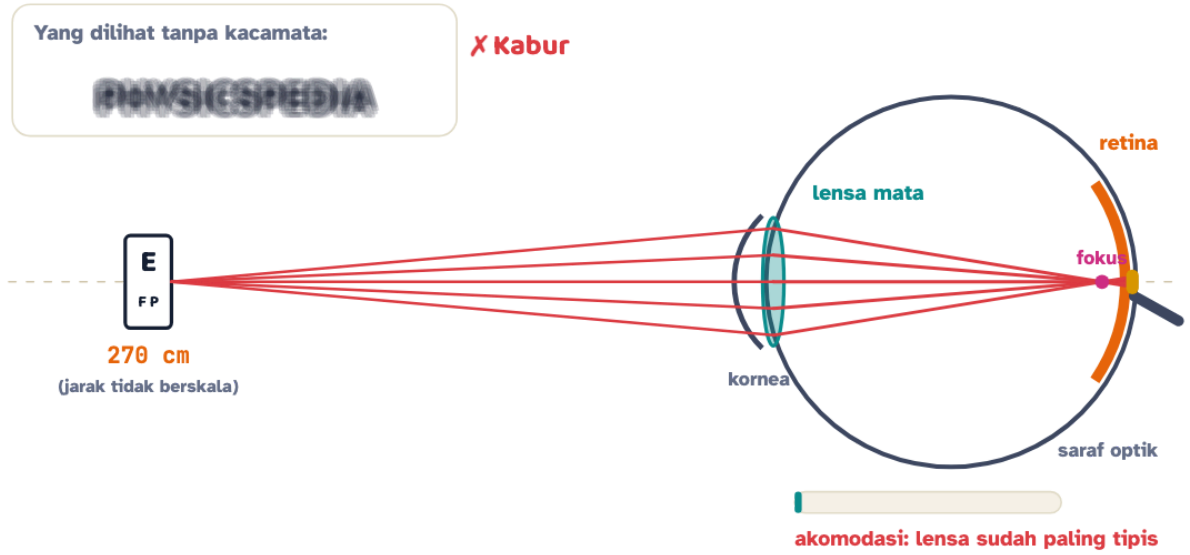
Cacat mata	Gejala	Bayangan jatuh	Kacamata	Daya lensa

Miopi (rabun jauh, "mata minus")	PR terbatas, papan tulis kabur	di depan retina	lensa cekung (–)	$P = -\frac{100}{\text{PR (cm)}}$
Hipermetropi (rabun dekat, "mata plus")	PP > 25 cm, buku kabur	di belakang retina	lensa cembung (+)	$P = 4 - \frac{100}{\text{PP (cm)}}$
Presbiopi (mata tua)	daya akomodasi melemah karena usia	di belakang retina untuk benda dekat	kacamata baca (+) atau lensa bifokal	seperti hipermetropi
Astigmatisme (silinder)	garis pada arah tertentu kabur	tidak di satu titik	lensa silinder	(di luar bab ini)

Angka 4 pada rumus hipermetropi berasal dari $100/25$: kacamata baca harus membuat buku yang dipegang di jarak baca normal (25 cm) tampak seolah berada di titik dekat mata itu.

LAB MINI **Klinik mata Tarsi: periksa, lalu pasangkan kacamata**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-20



Titik dekat	Titik jauh	Bayangan jatuh	Resep disarankan
17 cm	50 cm	di depan retina (kabur)	-2 D (cekung)

Pilih kondisi mata, lalu geser jarak benda. Perhatikan lensa mata yang menebal saat melihat dekat (akomodasi). Untuk mata miopi, cari jarak saat sinar mulai berkumpul **di depan** retina. Lalu geser **daya kacamata** sampai penglihatan tajam kembali. Apakah hasilnya cocok dengan resep yang disarankan?

RUMUS HIDUP

Kacamata untuk mata minus (miopi)

$$P = -\frac{100}{\mathrm{PR}}$$

Makin dekat titik jauh matamu, makin besar minus kacamatanya.

PR Titik jauh mata cm

P Daya kacamata dioptri

DAYA KACAMATA

-2

dioptri

Titik jauh **50** cm → kacamata **-2** dioptri (lensa cekung, jarak fokus **–50** cm). Kacamata ini membuat benda yang sangat jauh tampak berada di titik jauh matamu.

Cek satuan: $1\,\mathrm{D} = 1\,\mathrm{m}^{-1}$. Angka 100 muncul karena PR ditulis dalam cm.

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

KERJAKAN BERSAMA

Resep kacamata Raka

Raka hanya bisa melihat tajam sampai jarak 2 m. Berapa daya kacamata yang ia butuhkan?

1. Mata miopi dengan PR = 200 cm.
2. $P = -\frac{100}{200} = -0{,}5$ dioptri.

Raka butuh kacamata minus setengah (–0,50 D), yaitu lensa cekung dengan $f = -2$ m.

COBA SENDIRI **Kacamata baca Nenek**

Titik dekat mata Nenek 100 cm. Berapa daya kacamata agar Nenek bisa membaca koran pada jarak 25 cm?

1. Kacamata harus membentuk bayangan maya koran di titik dekat Nenek: $s = 25$ cm, $s' = -100$ cm.
2. $\frac{1}{f} = \frac{1}{25} + \frac{1}{-100} = \frac{4-1}{100} = \frac{3}{100}$, jadi $f = 33{,}3$ cm.
3. $P = 100/33{,}3 = +3$ dioptri. Hasilnya sama dengan rumus cepat $P = 4 - 100/\mathrm{PP}$, yaitu $4 - 1 = 3$.

Nenek butuh kacamata plus 3 (lensa cembung).

MITOS

"Memakai kacamata minus membuat minusnya makin parah."

MITOS

"Banyak makan wortel bisa menyembuhkan mata minus."

FAKTA

Kacamata yang sesuai resep tidak memperparah miopi. Minus pada anak umumnya bertambah karena bola mata masih tumbuh memanjang. Kebiasaan melihat dekat terlalu lama dan kurang bermain di luar ruangan ikut berperan. Periksakan matamu rutin!

FAKTA

Vitamin A dalam wortel penting untuk kesehatan retina, terutama penglihatan malam. Namun, miopi adalah soal **ukuran dan bentuk** bola mata. Masalah optik itu tidak bisa diubah oleh makanan.

Lup: kaca pembesar Tarsi

Lup adalah satu lensa cembung. Benda diletakkan di dalam jarak fokus (ruang I), sehingga terbentuk bayangan maya, tegak, dan diperbesar. Perbesaran sudutnya:

$$M_{\text{santai}} = \frac{25}{f}, \qquad M_{\text{maks}} = \frac{25}{f} + 1,$$

dengan f dalam cm. M_{santai} berlaku untuk mata santai (tanpa akomodasi), sedangkan M_{maks} berlaku saat mata berakomodasi maksimum. Lup berfokus 5 cm memperbesar 5 kali untuk mata santai. Tukang reparasi jam dan penjual batu akik memakainya setiap hari.

Mikroskop dan teleskop: dua lensa bekerja sama

Mikroskop memakai lensa **objektif** berfokus sangat pendek untuk membuat bayangan nyata yang sudah diperbesar. Bayangan itu lalu diperbesar lagi oleh lensa **okuler** yang berfungsi sebagai lup. Perbesaran totalnya

adalah hasil kali keduanya. Untuk mata santai:

$$M = M_{\text{ob}} \times M_{\text{ok}} = \frac{s'_{\text{ob}}}{s_{\text{ob}}} \times \frac{25}{f_{\text{ok}}}.$$

Teleskop bintang (teropong) memakai objektif berfokus **panjang** untuk mengumpulkan cahaya benda jauh. Untuk mata santai, panjang teropong $d = f_{\text{ob}} + f_{\text{ok}}$ dan perbesarannya $M = f_{\text{ob}}/f_{\text{ok}}$.

COBA SENDIRI **Teropong buatan kelas**

Teropong sederhana memakai objektif $f_{\text{ob}} = 100$ cm dan okuler $f_{\text{ok}} = 5$ cm. Berapa perbesaran dan panjang teropong untuk mata santai?

1. $M = \dfrac{f_{\text{ob}}}{f_{\text{ok}}} = \dfrac{100}{5} = 20$ kali.
2. $d = f_{\text{ob}} + f_{\text{ok}} = 100 + 5 = 105$ cm.

Bulan tampak 20 kali lebih besar. Kawah-kawahnya pun terlihat. Bayangannya terbalik, tetapi untuk mengamati bintang itu tidak masalah.

FISIKA INDONESIA

Sejak 1928, **Observatorium Bosscha** di Lembang, Jawa Barat, memakai teleskop Refraktor Ganda Zeiss dengan lensa objektif berdiameter 60 cm dan panjang fokus sekitar 10,7 m. Di Gunung Timau, Nusa Tenggara Timur, Indonesia membangun **Observatorium Nasional** dengan teleskop pemantul yang memakai **cermin cekung** raksasa berdiameter sekitar 3,8 m. Langit NTT yang kering dan gelap sangat cocok untuk mengintip galaksi jauh.

Spion & cermin tikungan

Cermin cembung di spion motor dan di tikungan tajam jalan pegunungan memperlihatkan daerah luas dalam bayangan kecil.

Senter & lampu motor

Bola lampu diletakkan di titik fokus cermin cekung, sehingga cahaya dipantulkan menjadi berkas sejajar yang menembus jauh.

Internet serat optik

Kabel Palapa Ring memandu kedipan cahaya laser lewat pemantulan internal total dari pulau ke pulau.

Kacamata pelajar

Lensa cekung (minus) menolong mata miopi. Lensa cembung (plus) menolong hipermetropi dan presbiopi.

Lup penjual batu akik

Lensa cembung dengan benda di dalam jarak fokus memberi bayangan maya yang diperbesar, cukup untuk memeriksa urat batu.

Pelangi sore tropis

Hujan sore dengan Matahari yang rendah di barat sering menghadirkan pelangi di langit timur.

Cek Cepat

Spion motor memakai cermin cembung karena…

- bayangannya diperbesar
- bayangannya nyata
- bayangannya terbalik
- bidang pandangnya luas

Cahaya merambat dari udara ke air dengan sudut datang 40°. Sinar biasnya…

- mendekati garis normal, sudut bias kurang dari 40°
- menjauhi garis normal, sudut bias lebih dari 40°
- lurus tanpa berbelok
- dipantulkan total

Titik jauh mata Sari 50 cm. Kacamata yang tepat untuknya adalah…

- lensa cembung +2 D
- lensa cekung −0,5 D
- lensa cekung −2 D
- lensa cembung +0,5 D

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. A · 3. C

Tantangan Rumah: panah yang berbalik arah dan koin yang muncul

Bahan: gelas bening berbentuk tabung, kertas, spidol, mangkuk tidak tembus pandang, koin Rp500, air

1. Gambar panah mendatar yang menunjuk ke **kanan** di kertas. Berdirikan kertas itu di belakang gelas kosong.
2. Lihat panah melalui gelas sambil menuang air pelan-pelan. Amati panah saat permukaan air melewatinya. Coba juga geser kertas mendekat dan menjauh.
3. Letakkan koin di dasar mangkuk. Mundurkan kepalamu sampai koin **tepat** tersembunyi di balik tepi mangkuk.
4. Tanpa menggerakkan kepala, minta temanmu menuang air pelan-pelan ke mangkuk.

Pertanyaan: Kenapa panah tiba-tiba menunjuk ke kiri? (Petunjuk: gelas berisi air bekerja seperti lensa cembung, dan kertasnya berada di luar titik fokus.) Kenapa koin yang tadinya tersembunyi bisa "muncul"? Gambarlah jalannya sinar dari koin ke matamu.

RINGKASAN KILAT — Bab 20 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **hukum pemantulan** dan melukis bayangan pada cermin datar, cekung, dan cembung
- memakai **hukum Snell**, menghitung **kedalaman semu**, dan menjelaskan **pemantulan internal total** pada serat optik
- menjelaskan **dispersi** cahaya pada prisma dan terbentuknya pelangi
- melukis bayangan lensa dengan sinar istimewa, lalu menghitung dengan $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$ dan perbesaran M
- menjelaskan cacat mata, menghitung **daya kacamata** (dioptri), dan cara kerja lup, mikroskop, serta teleskop

Istilah kunci

sinar · garis normal · pemantulan teratur · pemantulan baur · cermin cekung · cermin cembung · sinar istimewa · indeks bias · pembiasan · sudut kritis · pemantulan internal total · Serat optik · fatamorgana · prisma · sudut deviasi · dispersi

Rumus penting

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \implies s' = \frac{s\,f}{s - f}$$

Rumus cermin lengkung & lensa tipis. 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.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

Hukum Snell. Masuk ke medium yang lebih 'lambat', sinar menunduk mendekati normal. Keluar ke medium yang lebih 'cepat', sinar menjauhi normal.

$$h' = \frac{h}{n}$$

Kedalaman semu. Dilihat dari udara, benda di dalam air tampak lebih dangkal: kedalamannya seolah dibagi indeks bias.

$$P = -\frac{100}{\mathrm{PR}}$$

Kacamata untuk mata minus (miopi). Makin dekat titik jauh matamu, makin besar minus kacamatanya.

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- "Maya" tidak berarti tidak bisa dilihat.

⛰️ 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=20

🧩 Teka-teki untuk Bab 21

Di bab ini cahaya kita anggap sebagai "sinar" yang merambat lurus, memantul, dan membelok. Namun, coba perhatikan gelembung sabun. Air sabunnya bening tanpa pewarna, tetapi gelembungnya berwarna-warni, dan warnanya berubah-ubah saat gelembung menipis. Prisma tidak ada di sana. Dari mana datangnya warna itu?

▼ **Intip petunjuk**

Model sinar tidak bisa menjawabnya. Cahaya ternyata adalah **gelombang**. Dua gelombang cahaya yang dipantulkan dua sisi lapisan sabun bisa saling menguatkan atau saling meniadakan, tergantung ketebalannya. Bab 21: Cahaya sebagai Gelombang.

BAB 21 · GELOMBANG & CAHAYA

21 Cahaya Itu Gelombang: Pelangi Tanpa Prisma

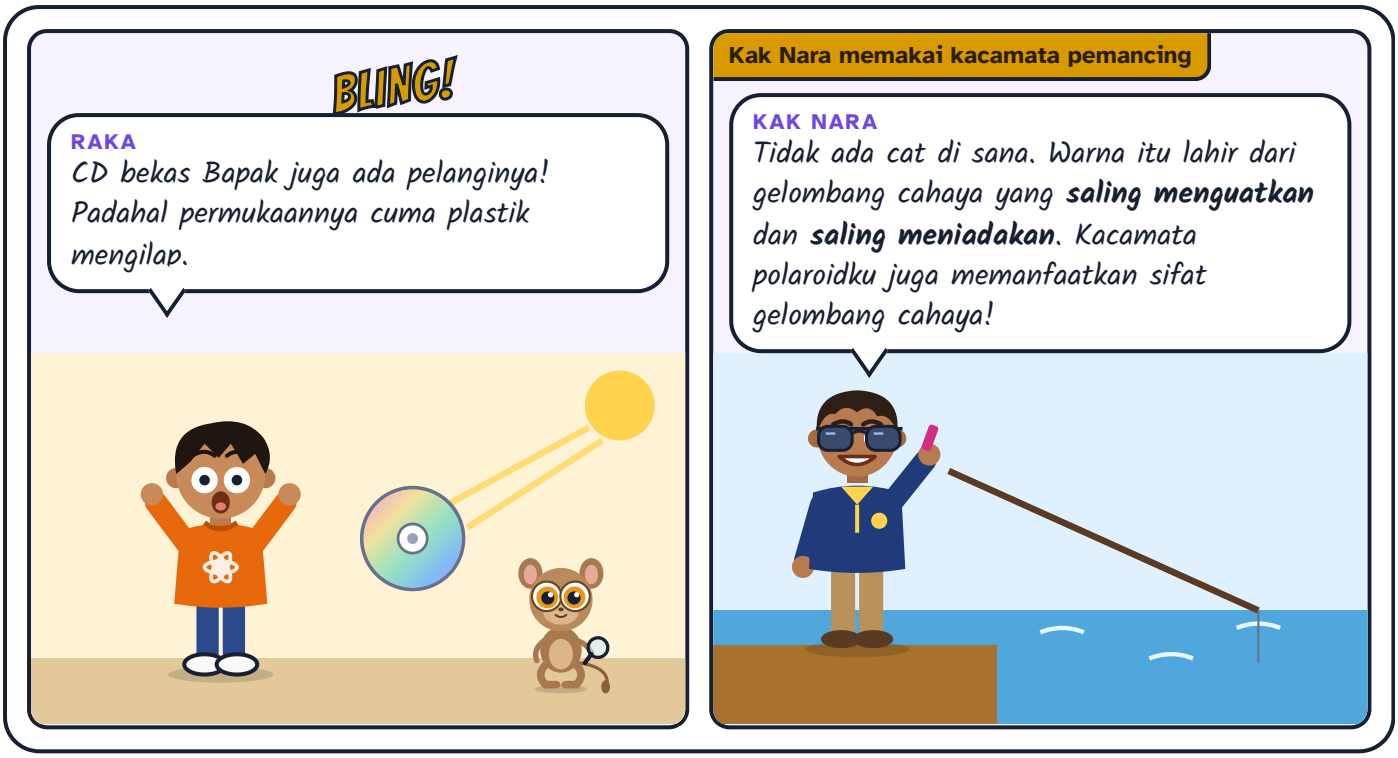
Gelembung sabun yang bening bisa berwarna-warni. Kepingan CD bekas memantulkan pelangi. Kacamata pemancing bisa "menghapus" silau di permukaan air. Semua keajaiban itu terjadi karena cahaya adalah gelombang: ia bisa saling menguatkan, saling meniadakan, menyelinap di balik celah, dan bergetar ke arah tertentu.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menceritakan bukti bahwa cahaya adalah **gelombang elektromagnetik** dan memakai **prinsip Huygens**;
- menghitung pola **interferensi celah ganda Young** dengan $d \sin\theta = m\lambda$ dan $\Delta y = \lambda L/d$;
- menjelaskan warna **lapisan tipis** seperti gelembung sabun dan minyak di aspal basah;
- menganalisis **difraksi** celah tunggal, **kisi difraksi**, dan **daya urai** alat optik;
- menjelaskan **polarisasi** dan memakai hukum Malus $I = I_0 \cos^2\theta$.

PELANGI TANPA PRISMA

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Sinar laser merah ditembakkan ke selembar kertas timah yang punya dua celah sangat sempit berdekatan. Apa yang tampak di dinding di belakangnya?

- Dua garis merah, seperti "bayangan" kedua celah.
- Satu titik merah yang dua kali lebih terang.
- Banyak garis merah yang berselang-seling dengan garis gelap.
- Dinding terang merata, karena cahayanya menyebar.

Jawabannya: banyak garis terang-gelap berselang-seling! Jika cahaya hanya berupa butiran yang melesat lurus, kita akan melihat dua garis saja. Kenyataannya, gelombang dari kedua celah saling bertumpuk. Di beberapa tempat puncak bertemu puncak (terang), dan di tempat lain puncak bertemu lembah (gelap). Pola inilah yang membuat Thomas Young yakin bahwa cahaya adalah gelombang.

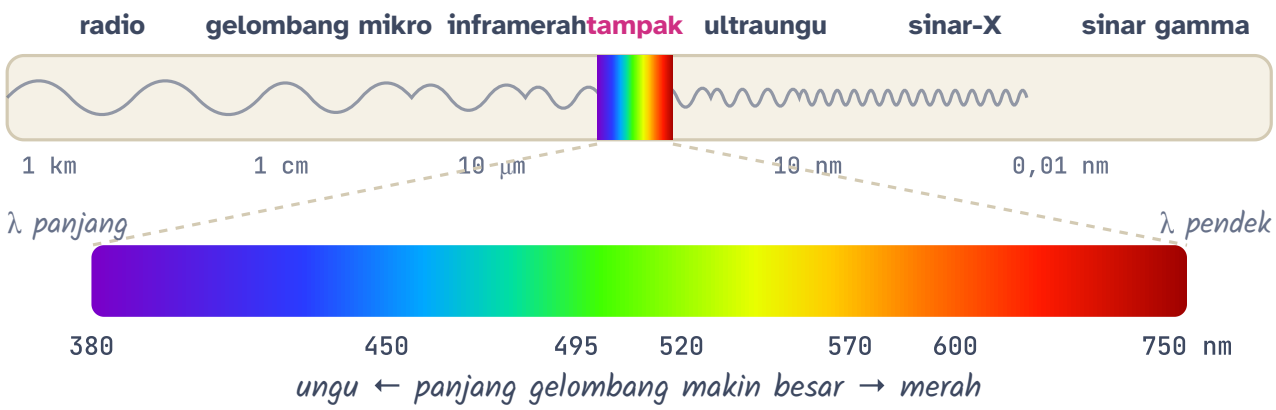
21.1 Cahaya: butiran atau gelombang?

Pada akhir abad ke-17, dua raksasa sains berbeda pendapat. **Isaac Newton** berpendapat cahaya adalah aliran butiran sangat kecil (teori *korpuskular*). Butiran melesat lurus, memantul seperti bola, dan cocok menjelaskan bayangan yang tajam. **Christiaan Huygens** dari Belanda (1678) berpendapat cahaya adalah **gelombang**, seperti riak di kolam. Karena nama besar Newton, teori butiran menang selama lebih dari seratus tahun.

Lalu, pada awal 1800-an, **Thomas Young** melewatkan cahaya melalui dua celah sempit dan melihat pola terang-gelap. Butiran tidak mungkin saling meniadakan, tetapi gelombang bisa. Pada 1860-an, **James Clerk Maxwell** membuktikan secara matematis bahwa cahaya adalah **gelombang elektromagnetik**: getaran medan listrik dan medan magnet yang merambat dengan laju $c \approx 3 \times 10^8$ m/s, bahkan tanpa medium.

TAMU DARI MASA LALU: BINTIK YANG MUSTAHIL

Pada 1818, Augustin Fresnel mengikuti lomba ilmiah di Paris dengan teori gelombang cahaya. Salah satu juri, Siméon Poisson, pendukung teori butiran, menghitung bahwa jika teori Fresnel benar, maka di tengah bayangan sebuah piringan bulat harus muncul **bintik terang**. "Konyol!" pikirnya. Juri lain, François Arago, langsung mencobanya, dan bintik terang itu memang ada! Bintik itu kini dijuluki *bintik Arago* atau *bintik Poisson*, dan Fresnel memenangkan lomba.



Spektrum gelombang elektromagnetik. Cahaya yang bisa dilihat mata hanyalah "jendela" sempit dengan panjang gelombang sekitar 380–750 nanometer (1 nm = 10^{-9} m).

Bahasa sederhana · Gampangnya: cahaya itu mirip riak air, tetapi riaknya sangat kecil. Jarak dari satu puncak ke puncak berikutnya kurang dari seperseribu milimeter. Warna cahaya ditentukan oleh panjang riak itu: merah paling panjang, ungu paling pendek.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

AKHIR CERITA YANG MENGEJUTKAN

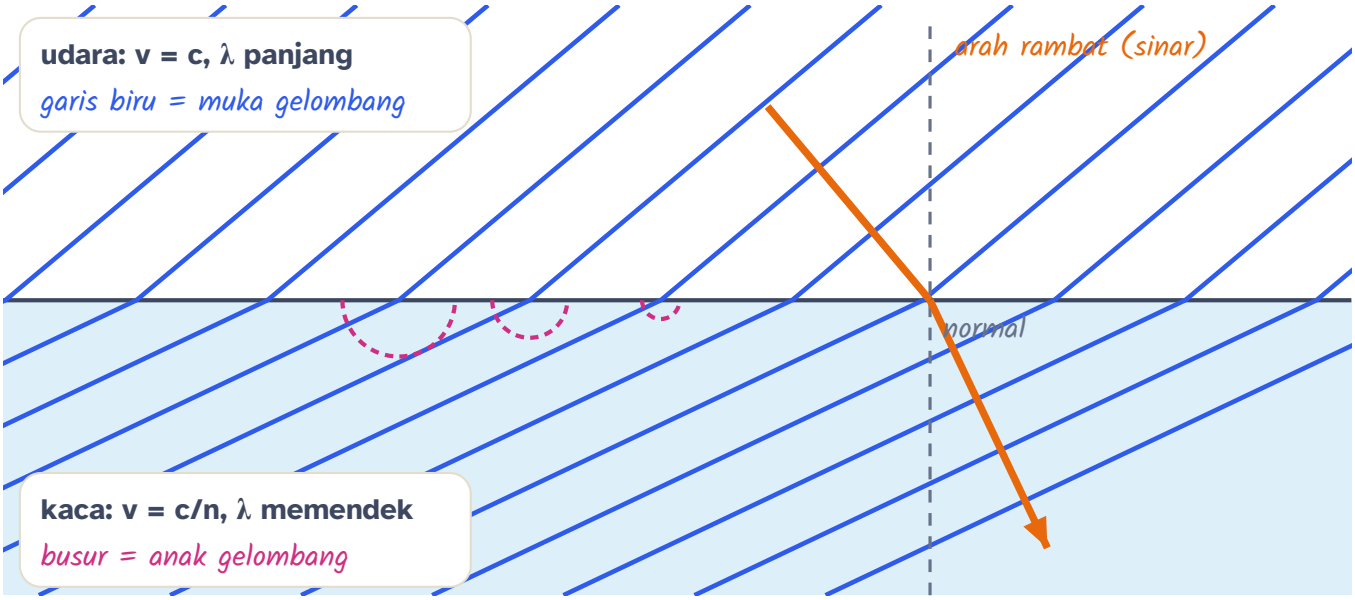
Teori gelombang menang telak pada abad ke-19, tetapi pada 1905 Einstein menunjukkan bahwa cahaya juga datang dalam paket energi $E = hf$ yang disebut **foton** (efek fotolistrik). Jadi, cahaya memiliki **dualisme gelombang-partikel**: ia merambat dan berinterferensi seperti gelombang, tetapi diserap dan dipancarkan dalam paket-paket. Jika celah ganda Young disinari foton satu per satu, setiap foton mendarat di satu titik, tetapi ribuan titik itu perlahan menyusun pola terang-gelap yang sama!

21.2 Prinsip Huygens: setiap titik adalah sumber baru

Lempar batu ke kolam, lalu amati riaknya. Garis-garis puncak riak disebut **muka gelombang**. Huygens mengajukan aturan yang sangat sederhana:

Prinsip Huygens. Setiap titik pada muka gelombang berperilaku sebagai sumber gelombang kecil baru (*anak gelombang*). Muka gelombang berikutnya adalah garis singgung semua anak gelombang itu.

Aturan ini langsung menjelaskan pembiasan. Saat muka gelombang menumbuk kaca secara miring, ujung yang lebih dulu masuk menjadi lebih lambat (laju cahaya di kaca $v = c/n$). Ujung lainnya masih melaju di udara. Akibatnya, muka gelombang "terlipat" dan arahnya membelok, persis seperti barisan Paskibra di Bab 20.



Muka gelombang (biru) "terlipat" di batas udara-kaca, karena bagian yang sudah masuk kaca bergerak lebih lambat. Anak gelombang (busur putus-putus) di kaca lebih kecil. Sinar (oranye) yang tegak lurus muka gelombang ikut membelok mendekati normal.

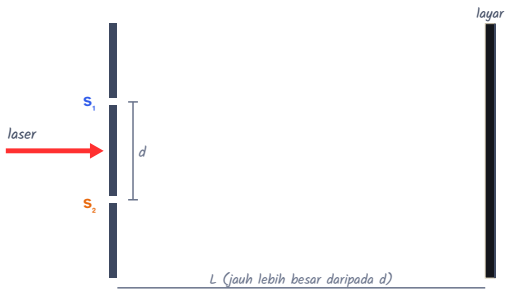
Dari gambar itu dapat diturunkan $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$, yaitu hukum Snell! Perhatikan juga bahwa muka gelombang di kaca lebih rapat: **panjang gelombang memendek** menjadi λ/n, sedangkan **frekuensinya tetap**.

Prinsip Huygens juga meramalkan bahwa gelombang yang melewati celah akan **menyebar** ke balik tepi celah. Peristiwa ini disebut **difraksi**. Penyebarannya paling jelas jika lebar celah kira-kira sebesar panjang gelombangnya. Bunyi ($\lambda \approx 1$ m) mudah berbelok di balik pintu, sehingga kamu bisa mendengar teman yang memanggil dari ruang sebelah. Cahaya ($\lambda \approx 0{,}0005$ mm) hanya berbelok jelas di celah yang sangat sempit. Itulah sebabnya Newton mengira cahaya selalu merambat lurus.

21.3 Interferensi celah ganda Young

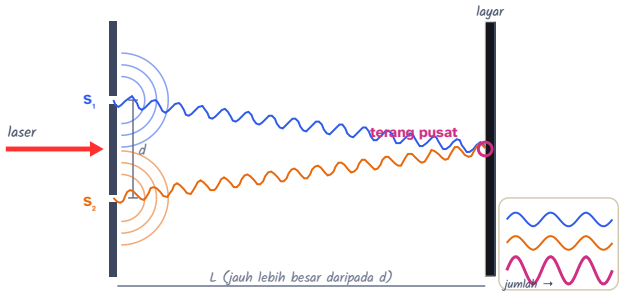
Dua gelombang yang bertemu akan dijumlahkan (prinsip superposisi dari Bab 18). Jika puncak bertemu puncak, hasilnya **saling menguatkan** (interferensi konstruktif, terang). Jika puncak bertemu lembah, hasilnya **saling meniadakan** (interferensi destruktif, gelap).

Syaratnya, kedua sumber harus **koheren**: frekuensinya sama dan beda fasenya tetap. Dua senter biasa tidak koheren, karena cahayanya terdiri atas jutaan "paket" gelombang yang fasenya berubah acak triliunan kali per detik, sehingga polanya berganti terlalu cepat untuk dilihat. Akal Young: ambil **satu** sumber cahaya, lalu belah menjadi dua dengan dua celah. Kedua celah lalu bergetar serempak.

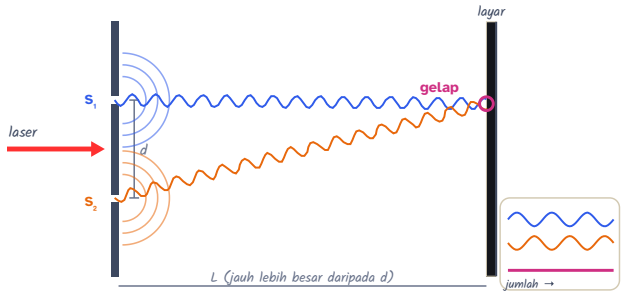


Langkah 1. Laser menyinari penghalang yang memiliki dua celah sempit S_1 dan S_2 berjarak d. Layar diletakkan sejauh L.

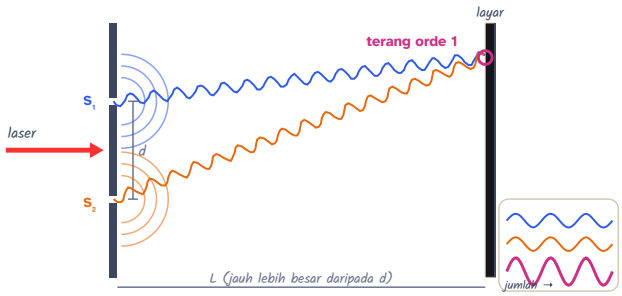
Langkah 2. Menurut Huygens, tiap celah menjadi sumber gelombang baru. Karena berasal dari laser yang sama, keduanya bergetar serempak (koheren).



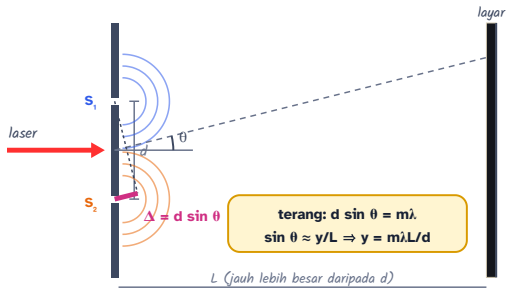
Langkah 3. Titik tengah layar berjarak **sama** dari kedua celah. Puncak bertemu puncak, sehingga terbentuk terang pusat. Kotak kecil menunjukkan gelombang biru + oranye = gelombang ungu yang besar.



Langkah 4. Sedikit ke atas, lintasan dari S_2 lebih panjang **setengah panjang gelombang**. Puncak bertemu lembah, sehingga keduanya saling meniadakan: pita gelap.



Langkah 5. Lebih ke atas lagi, beda lintasannya **tepat satu panjang gelombang**. Puncak bertemu puncak lagi: terang orde 1.



Langkah 6. Karena $L \gg d$, kedua sinar hampir sejajar dan beda lintasannya $\Delta = d\sin\theta$. Terang terjadi saat $\Delta = m\lambda$. (Gambar tidak berskala: pada percobaan sungguhan, λ jauh lebih kecil daripada d.)

Untuk celah berjarak d, titik di layar yang membentuk sudut θ menerima dua gelombang dengan beda lintasan $\Delta = d\sin\theta$.

Pita	Syarat	Letak di layar (sudut kecil)
terang ke-m	$d\sin\theta = m\lambda$	$y_m = \dfrac{m\lambda L}{d}$, dengan $m = 0, 1, 2, \ldots$
gelap ke-m	$d\sin\theta = (m - \frac{1}{2})\lambda$	$y = \dfrac{(m - \frac{1}{2})\lambda L}{d}$, dengan $m = 1, 2, \ldots$

Jarak antara dua pita terang yang berdekatan (atau dua pita gelap yang berdekatan) disebut **lebar pita** Δy:

RUMUS HIDUP

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.

- λ Panjang gelombang nm
- L Jarak celah–layar m
- d Jarak antarcelah mm
- Δy Lebar pita mm

LEBAR PITA

3

mm

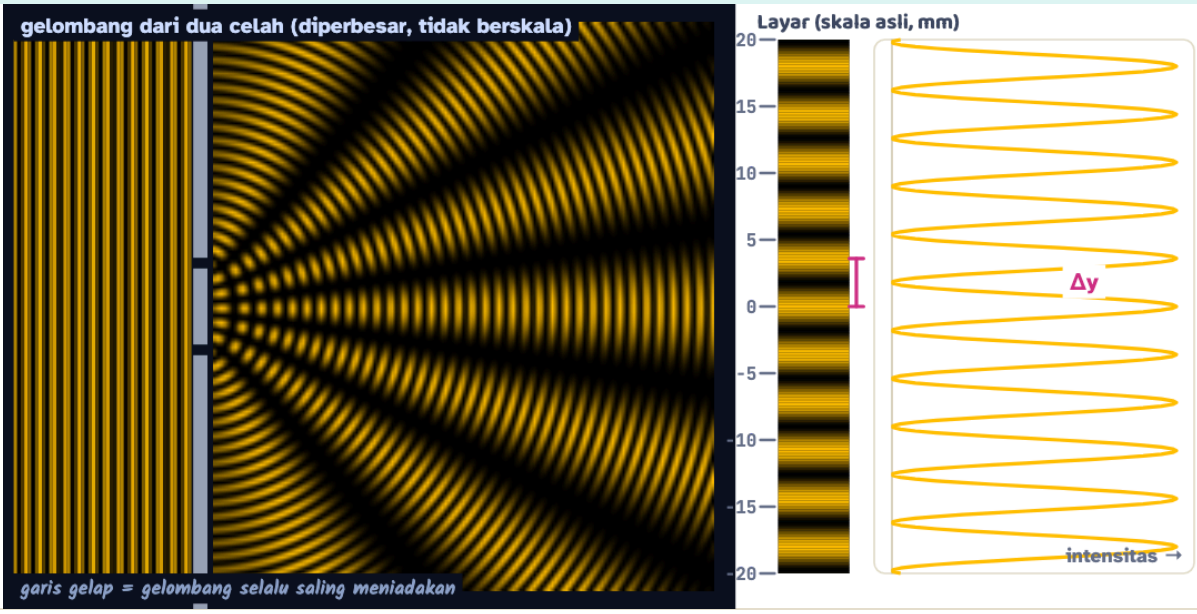
Cahaya **600** nm, layar **1,5** m, celah berjarak **0,3** mm → pita terang berulang setiap **3** mm.

Cek satuan: $\frac{\mathrm{m} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{m}} = \mathrm{m}$. Hati-hati: ubah nm dan mm ke meter dulu!

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

LAB MINI Celah ganda Young di ruang gelap

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-21



Lebar pita Δy	Warna	Di titik yang diklik
3,6 mm	jingga (600 nm)	klik layar di kanan

Di kiri, kamu melihat gelombang yang keluar dari dua celah (diperbesar). Garis-garis gelap yang memancar adalah tempat gelombang selalu saling meniadakan. Di kanan, kamu melihat layar dengan skala milimeter asli. Ubah warna, jarak celah, dan jarak layar. **Klik layar** untuk mengukur beda lintasan di titik itu. Kapan beda lintasannya bilangan bulat kali λ?

CONTOH Laser merah di laboratorium

Cahaya laser 600 nm melewati celah ganda yang berjarak 0,30 mm. Layar diletakkan 1,5 m dari celah. Berapa jarak antara dua pita terang yang berdekatan?

1. Ubah ke meter: $\lambda = 600 \times 10^{-9}$ m dan $d = 0{,}30 \times 10^{-3}$ m.
2. $\Delta y = \dfrac{\lambda L}{d} = \dfrac{(600 \times 10^{-9})(1{,}5)}{0{,}30 \times 10^{-3}}.$
3. $\Delta y = 3{,}0 \times 10^{-3}$ m.

Pita terang berulang setiap 3,0 mm, cukup lebar untuk diukur dengan penggaris biasa.

KERJAKAN BERSAMA **Mengukur panjang gelombang**

Sari mengukur jarak dari pita terang pusat ke pita terang keempat: 10,0 mm. Jarak celah 0,25 mm dan jarak layar 1,20 m. Berapa panjang gelombang cahayanya?

1. Pita terang keempat: $y_4 = \dfrac{4\lambda L}{d}$.
2. $\lambda = \dfrac{y_4\, d}{4L} = \dfrac{(10{,}0 \times 10^{-3})(0{,}25 \times 10^{-3})}{4 \times 1{,}20}$.
3. $\lambda \approx 5{,}2 \times 10^{-7}$ m $= 520$ nm.

Panjang gelombangnya sekitar 520 nm, yaitu cahaya hijau. Mengukur beberapa pita sekaligus lalu membaginya membuat hasil lebih teliti daripada mengukur satu pita saja.

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Pita gelap **tidak** berarti energi cahaya "musnah". Energi itu hanya dipindahkan: cahaya yang "hilang" di pita gelap muncul sebagai tambahan terang di pita terang. Total energinya tetap sama. Puncak pita terang celah ganda bahkan **empat kali** lebih terang daripada cahaya dari satu celah saja, bukan dua kali.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

INTENSITAS DAN KEPING KACA DI DEPAN CELAH

Jika tiap celah sendirian memberi intensitas I_0, pola celah ganda adalah

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right).$$

Jika satu celah ditutup keping bening tipis setebal t dengan indeks bias n, lintasan optik di celah itu bertambah $(n-1)t$. Seluruh pola bergeser ke arah celah yang ditutup sejauh $\dfrac{(n-1)tL}{d}$. Dengan menghitung banyaknya pita yang bergeser, kamu dapat mengukur ketebalan selaput yang sangat tipis.

21.4 Lapisan tipis: rahasia gelembung sabun

Dinding gelembung sabun hanya setebal ratusan nanometer, seukuran panjang gelombang cahaya. Cahaya dipantulkan dua kali: oleh permukaan **luar** dan oleh permukaan **dalam** lapisan. Kedua pantulan itu lalu berinterferensi di matamu.

- Pantulan kedua menempuh jarak tambahan bolak-balik di dalam lapisan, yaitu $2nt$ untuk cahaya yang datang tegak lurus (t = tebal lapisan, n = indeks bias).

- Pantulan dari medium yang **lebih rapat** membalik gelombang (bergeser setengah panjang gelombang), seperti pantulan gelombang tali di ujung tetap (Bab 18). Pada gelembung sabun, hanya pantulan luar yang terbalik.

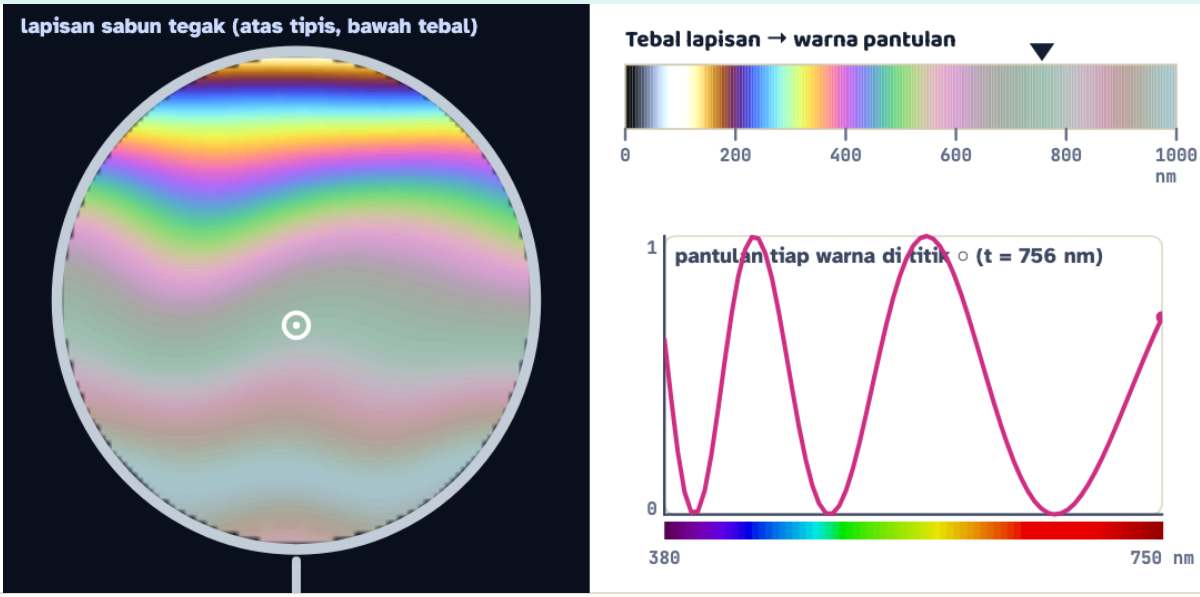
Hasilnya, untuk lapisan sabun atau minyak di udara:

$$\text{terang (diperkuat):} \quad 2nt = \left(m + \tfrac{1}{2}\right)\lambda, \qquad m = 0, 1, 2, \ldots$$

Setiap ketebalan "memilih" warna yang diperkuat. Karena tebal dinding gelembung berbeda-beda dan terus berubah saat air sabun mengalir turun, warnanya berputar-putar seperti pusaran pelangi. Menjelang pecah, bagian atas gelembung menjadi sangat tipis dan tampak **hitam**: kedua pantulan saling meniadakan untuk semua warna.

LAB MINI **Gelembung sabun dan minyak di aspal basah**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-21



Tebal di titik
756 nm

Warna yang diperkuat
575 nm (kuning), 447 nm (nila)

Keadaan
air sabun mengalir turun, lapisan menipis

Tonton lapisan sabun yang perlahan menipis karena airnya mengalir ke bawah. **Klik atau seret** di lapisan untuk membaca ketebalan dan warna yang diperkuat di titik itu. Bagian mana yang menjadi hitam lebih dulu? Coba juga mode minyak di aspal basah.

KERJAKAN BERSAMA **Gelembung yang paling tipis berwarna hijau**

Sebagian dinding gelembung sabun ($n = 1{,}33$) tampak hijau terang karena cahaya 532 nm diperkuat. Berapa tebal minimum dinding di bagian itu?

1. Tebal minimum berarti $m = 0$: $2nt = \frac{1}{2}\lambda$.
2. $t = \dfrac{\lambda}{4n} = \dfrac{532}{4 \times 1{,}33}$ nm.
3. $t = 100$ nm.

Tebal dindingnya hanya sekitar 100 nm, kira-kira seperseribu tebal rambutmu!

TRIK KAK NARA: HITUNG PEMBALIKANNYA DULU

Sebelum memakai rumus lapisan tipis, hitung berapa pantulan yang terbalik (pantulan dari medium yang lebih rapat). **Satu** pembalikan (gelembung sabun, minyak di atas air): terang saat $2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$. **Nol atau dua** pembalikan (lapisan antipantul $\mathrm{MgF_2}$ di atas kaca): syaratnya tertukar, sehingga terang saat $2nt = m\lambda$ dan gelap saat $2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$.

Lapisan antipantul pada kacamata dan lensa kamera memakai prinsip ini secara terbalik. Lapisan bening setebal $\lambda/(4n)$ membuat kedua pantulan saling meniadakan, sehingga lebih banyak cahaya yang menembus lensa dan pantulan yang menyilaukan berkurang. Karena tebalnya disetel untuk cahaya hijau-kuning, sisa pantulannya tampak keunguan.

FISIKA INDONESIA

Sulawesi, rumah Tarsi, adalah habitat **kupu-kupu merak Sulawesi** (*Papilio blumei*). Sayapnya berkilau hijau-biru, tetapi warna itu bukan pigmen! Sisik sayapnya tersusun dari lapisan-lapisan tipis berpola yang memperkuat panjang gelombang tertentu lewat interferensi. Ini disebut **warna struktural**. Sehabis hujan, kamu juga bisa melihat "pelangi" pada genangan berminyak di jalan beraspal: lapisan oli setipis ratusan nanometer yang mengapung di atas air.

21.5 Difraksi celah tunggal dan kisi difraksi

Cahaya yang melewati **satu** celah sempit selebar a juga membentuk pola: pita terang pusat yang lebar, diapit pita-pita redup. Bayangkan celah dibagi dua bagian, atas dan bawah. Pada sudut tertentu, setiap anak gelombang di bagian atas berpasangan dengan anak gelombang di bagian bawah yang berbeda lintasan $\lambda/2$, sehingga semuanya saling meniadakan. Pita gelap celah tunggal terjadi pada

$$a \sin\theta = m\lambda, \qquad m = 1, 2, 3, \ldots$$

Makin sempit celahnya, makin lebar penyebaran cahayanya. Coba intip lampu dari celah sempit di antara dua jarimu. Garis-garis tipis yang tampak di celah itu adalah pola difraksi!

Tebak Dulu!

Celah tunggal disinari laser. Jika celahnya dibuat lebih sempit, pita terang di tengah layar menjadi...

- lebih sempit, karena lubangnya lebih kecil.
- lebih lebar (tetapi lebih redup).
- tetap sama lebarnya, hanya lebih redup.
- terpecah menjadi dua pita terang.

Lebih lebar! Dari $a \sin\theta = \lambda$, celah yang lebih sempit (a kecil) membuat sudut pita gelap pertama makin besar. Inilah keanehan gelombang: makin kamu "mengurung" cahaya, makin ia menyebar. Cahayanya juga lebih redup karena celah sempit meloloskan lebih sedikit cahaya.

Kisi difraksi: ribuan celah sekaligus

Kisi difraksi adalah lempeng yang memiliki ratusan sampai ribuan celah sejajar per milimeter. Jika ada N celah per satuan panjang, jarak antarcelahnya $d = 1/N$. Pita terangnya memenuhi rumus yang sama dengan celah ganda:

$$d \sin\theta = m\lambda.$$

Bedanya, karena celahnya sangat banyak, pita terang kisi menjadi **sangat tajam dan terang**, sedangkan bagian di antaranya hampir gelap. Setiap warna dibelokkan ke sudut yang berbeda, sehingga cahaya putih terurai menjadi spektrum yang jauh lebih lebar daripada spektrum prisma. Alur rekaman pada CD berjarak sekitar 1,6 µm, sehingga CD bekerja seperti kisi berkerapatan ±625 garis/mm. Itulah pelangi di CD bekas Raka!

RUMUS HIDUP

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.

- N Kerapatan kisi `garis/mm`
- λ Panjang gelombang `nm`
- m Orde
- θ Sudut pita terang °

SUDUT PITA TERANG

17,5

°

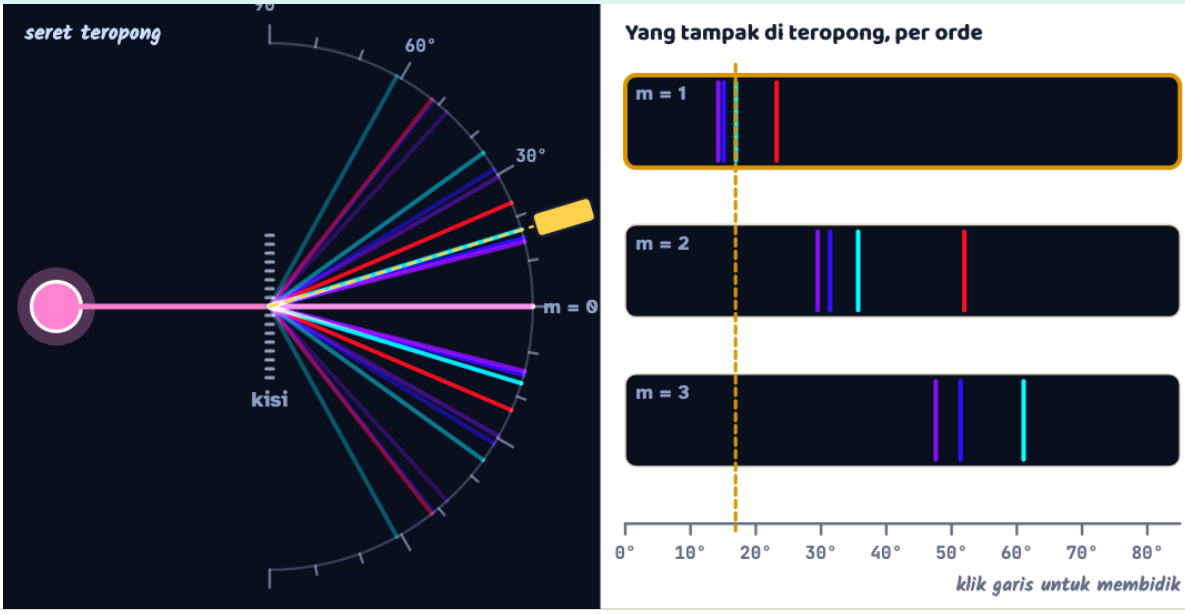
Kisi **500** garis/mm, cahaya **600** nm, orde **1** → pita terang pada sudut **17,5**°. Jika muncul '—', berarti sin θ akan lebih dari 1: orde itu tidak ada!

Cek satuan: N dalam garis/mm diubah menjadi garis/m (×1000), dan λ dalam meter, sehingga $m\lambda N$ tidak bersatuan.

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

LAB MINI Spektrometer kisi: detektif lampu misterius

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-21



Jarak celah d	λ = d sin θ / m	Di teropong
1,667 µm	484,5 nm	✓ tepat di sebuah garis terang!

Pilih lampu, lalu **seret teropong** (garis kuning) atau klik sebuah garis di panel spektrum agar teropong mengarah ke sana. Spektrometer langsung menghitung $\lambda = d \sin\theta / m$. Misi detektif: pilih **Lampu misterius**, ukur panjang gelombang setiap garisnya, lalu cocokkan dengan tabel di bawah. Unsur apakah gas di dalamnya?

Unsur	Garis spektrum terang (nm)
Hidrogen	410, 434, 486, 656
Helium	447, 471, 492, 502, 588, 668, 707
Natrium	589,0 dan 589,6 (kembar kuning)
Raksa (merkuri)	405, 436, 546, 577, 579

TAMU DARI MASA LALU: UNSUR DARI MATAHARI

Saat gerhana Matahari total 18 Agustus 1868, astronom Pierre Janssen yang mengamati dari India melihat garis kuning terang pada spektrum Matahari di dekat 588 nm. Garis itu tidak cocok dengan unsur apa pun yang dikenal di Bumi. Norman Lockyer menamainya **helium**, dari *helios* (Matahari). Helium baru ditemukan di Bumi 27 tahun kemudian. Spektroskopi memungkinkan kita mengetahui bahan penyusun bintang tanpa pernah ke sana!

COBA SENDIRI **CD sebagai kisi**

CD bekerja seperti kisi 625 garis/mm. Laser merah 650 nm disorotkan tegak lurus ke CD. Pada sudut berapa saja pita terang muncul?

1. $d = \frac{1}{625}$ mm $= 1{,}6$ µm $= 1600$ nm.
2. Orde 1: $\sin\theta_1 = \frac{650}{1600} = 0{,}406$, jadi $\theta_1 \approx 24^\circ$.
3. Orde 2: $\sin\theta_2 = \frac{1300}{1600} = 0{,}8125$, jadi $\theta_2 \approx 54^\circ$.
4. Orde 3: $\sin\theta_3 = \frac{1950}{1600} > 1$. Tidak ada!

Hanya ada pita pusat dan dua orde di tiap sisi, yaitu 5 titik merah di dinding. DVD yang alurnya lebih rapat (0,74 µm) membelokkan cahaya jauh lebih kuat.

21.6 Daya urai: kenapa dua lampu jauh tampak menyatu

Pada malam hari, mobil yang mendekat dari kejauhan tampak hanya punya **satu** lampu, walaupun sebenarnya ada dua lampu yang berjarak lebih dari satu meter. Penyebabnya bukan mata yang "kurang tajam", melainkan difraksi! Cahaya yang masuk melalui lubang bundar (pupil mata atau lensa teleskop) menyebar menjadi bercak kecil, bukan titik. Jika dua bercak terlalu berdekatan, keduanya melebur.

Menurut **kriteria Rayleigh**, dua sumber cahaya tepat dapat dibedakan jika jarak sudutnya minimal

$$\theta_{\min} = 1{,}22\,\frac{\lambda}{D},$$

dengan D diameter bukaan (pupil atau lensa), dan θ dalam radian. Untuk benda berjarak L yang terpisah sejauh x, $\theta \approx x/L$.

RUMUS HIDUP **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.

- x Jarak antarlampu m
- D Diameter bukaan mm
- λ Panjang gelombang nm
- L_{maks} Jarak maksimum km

JARAK MAKSIMUM

6,3

km

Dua lampu berjarak **1,4** m, bukaan **3** mm, cahaya **550** nm → masih tampak terpisah sampai sejauh **6,3** km (batas teoretis). Lebih jauh dari itu, keduanya melebur menjadi satu.

Cek satuan: $\frac{\text{m}\cdot\text{m}}{\text{m}} = \text{m}$, lalu dibagi 1000 menjadi km. Mata sungguhan sedikit kurang tajam daripada batas ini.

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

KERJAKAN BERSAMA **Lampu mobil di jalan lurus**

Pupil Raka di malam hari berdiameter 5 mm. Dua lampu sebuah mobil berjarak 1,5 m. Untuk cahaya 550 nm, dari jarak berapa kedua lampu mulai tampak menyatu?

1. $\theta_{\min} = 1{,}22 \times \dfrac{550 \times 10^{-9}}{5 \times 10^{-3}} \approx 1{,}34 \times 10^{-4}$ rad.

2. $L = \dfrac{x}{\theta_{\min}} = \dfrac{1{,}5}{1{,}34 \times 10^{-4}} \approx 11.000$ m.

Secara teori, sekitar 11 km. Kenyataannya, kedua lampu sudah menyatu pada jarak yang lebih dekat, karena lensa mata tidak sempurna dan udara malam berkilauan. Teleskop besar seperti di Bosscha atau Timau mampu memisahkan bintang kembar yang sangat rapat karena D-nya ratusan kali lebih besar daripada pupil.

21.7 Polarisasi: cahaya yang bergetar ke satu arah

Ikat tali ke tiang, lalu goyangkan ujungnya ke atas-bawah dan ke kiri-kanan secara acak. Sekarang lewatkan tali itu melalui celah pagar yang tegak. Hanya getaran atas-bawah yang lolos! Cahaya adalah gelombang **transversal**: medan listriknya bergetar tegak lurus arah rambat. Cahaya Matahari dan lampu bersifat **tak terpolarisasi**, artinya getarannya bergonta-ganti ke segala arah.

Polaroid (polarisator) adalah lembaran berisi molekul panjang yang tersusun sejajar. Lembaran ini hanya meloloskan getaran yang searah dengan **sumbu transmisinya**. Cahaya tak terpolarisasi yang melewati polaroid berkurang intensitasnya menjadi **setengah** dan keluar sebagai cahaya **terpolarisasi linear**.

Tebak Dulu!

Dua lensa kacamata polaroid ditumpuk, lalu salah satunya diputar perlahan sampai 90°. Apa yang terjadi pada cahaya yang tembus?

Makin terang, karena dua lensa lebih kuat menyaring silau.

Tidak berubah, karena lensanya bening dan simetris.

Makin redup, lalu hampir gelap total pada 90°.

Berubah warna menjadi biru.

Hampir gelap total! Polaroid pertama hanya meloloskan getaran searah sumbunya. Jika polaroid kedua diputar 90°, sumbunya tegak lurus getaran itu, sehingga hampir tidak ada yang lolos. Ini bukti kuat bahwa cahaya adalah gelombang transversal. Gelombang bunyi yang longitudinal tidak bisa dipolarisasi seperti ini.

Hukum Malus. Jika cahaya terpolarisasi berintensitas I_0 melewati polarisator yang sumbunya membentuk sudut θ dengan arah polarisasi cahaya, intensitas yang lolos adalah $I = I_0 \cos^2 \theta$.

RUMUS HIDUP **Hukum Malus**

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Searah (0°): lolos semua. Miring 45°: lolos setengahnya. Tegak lurus (90°): padam.

I_0 Intensitas cahaya terpolarisasi W/m²

θ Sudut antarsumbu °

I Intensitas yang lolos W/m²

INTENSITAS YANG LOLOS

100

W/m²

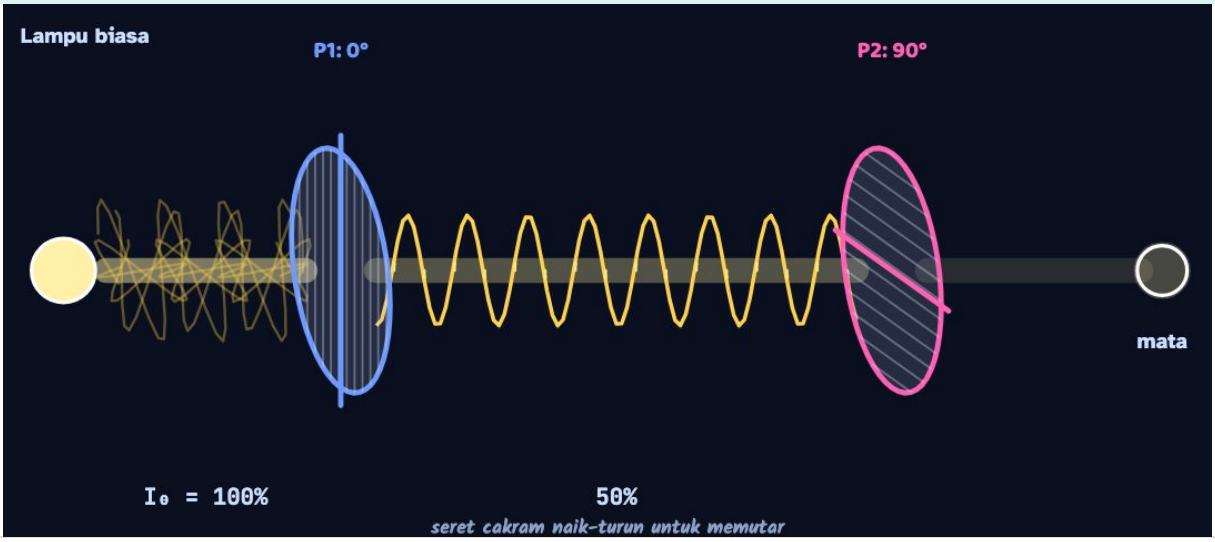
Cahaya **400** W/m² menembus analisator yang miring **60°** → tersisa **100** W/m².

Cek satuan: $\cos^2 \theta$ tidak bersatuan, jadi I bersatuan sama dengan I_0.

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

LAB MINI **Dua (atau tiga) polarisator**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-21



Setelah polarisator 1	Setelah tengah	Sampai ke mata
50 %	— (tidak dipasang)	0 %

Putar polarisator dengan slider, atau **seret naik-turun** pada cakramnya. Panah-panah yang bergoyang menunjukkan arah getaran medan listrik. Buat dua polarisator bersilang (beda 90°) sampai cahayanya padam. Lalu nyalakan **polarisator tengah** dan putar ke 45°. Cahaya muncul lagi! Bagaimana mungkin menambah penghalang justru membuat lebih terang?

Polarisasi karena pantulan: musuh pemancing

Cahaya yang dipantulkan permukaan air, kaca, atau aspal basah sebagian besar terpolarisasi **mendatar**. Pada satu sudut khusus, yaitu **sudut Brewster** θ_B, cahaya pantulannya terpolarisasi sempurna:

$$\tan\theta_B = \frac{n_2}{n_1}.$$

Untuk air, $\theta_B \approx 53^\circ$. Kacamata polaroid memiliki sumbu transmisi **tegak**, sehingga silau mendatar dari permukaan sungai atau laut terblokir. Pemancing dan nelayan pun bisa melihat ikan di bawah permukaan air.

MITOS

"Semua kacamata hitam pasti kacamata polaroid."

FAKTA

Kacamata hitam biasa hanya meredupkan semua cahaya secara merata. Kacamata polaroid secara khusus memblokir cahaya yang terpolarisasi mendatar. Cara mengujinya: lihat layar HP melalui kacamata itu, lalu miringkan kepalamu 90°. Jika layar menggelap, kacamatanya polaroid.

MITOS

"Menambah polarisator di antara dua polarisator bersilang pasti tetap gelap."

FAKTA

Justru menjadi terang lagi! Polarisator tengah bersudut 45° "memutar" arah getaran sedikit demi sedikit:
$\frac{1}{2}I_0 \cdot \cos^2 45^\circ \cdot \cos^2 45^\circ = \frac{1}{8}I_0$
. Polarisator tidak hanya menyaring, tetapi juga menentukan arah getaran baru.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MEMUTAR POLARISASI HAMPIR TANPA KEHILANGAN

Gunakan N polarisator yang sumbunya berturut-turut diputar $90^\circ/N$. Cahaya terpolarisasi yang melewatinya keluar dengan arah getaran yang berputar 90° dan intensitas $I = I_0\left[\cos^2(\frac{\pi}{2N})\right]^N$. Untuk N besar, $\cos^2 x \approx 1 - x^2$, sehingga $I \approx I_0\left(1 - \frac{\pi^2}{4N}\right) \to I_0$. Polarisasi bisa diputar 90° hampir tanpa kehilangan cahaya! Kristal cair di layar LCD melakukan hal serupa dengan memilin arah getaran secara bertahap.

Kacamata nelayan

Lensa polaroid bersumbu tegak memblokir silau mendatar dari permukaan laut, sehingga ikan dan karang di bawah air tampak jelas.

Layar LCD

Kristal cair diapit dua polarisator. Tegangan listrik mengatur seberapa jauh arah getaran cahaya dipelintir, sehingga tiap piksel bisa terang atau gelap.

Lapisan antipantul

Lapisan setebal ±100 nm pada kacamata membuat dua pantulan saling meniadakan, sehingga pantulan yang mengganggu berkurang.

CD dan DVD

Alur rekaman yang rapat berfungsi sebagai kisi difraksi dan memecah cahaya lampu menjadi pelangi.

Spektroskop observatorium

Kisi difraksi pada teleskop memecah cahaya bintang menjadi garis-garis spektrum, yang menjadi "sidik jari" unsur penyusun bintang.

Tinta pengaman uang

Beberapa pecahan uang rupiah memakai tinta yang berubah warna saat dimiringkan. Tinta itu berisi serpihan berlapis tipis yang memanfaatkan interferensi.

Cek Cepat

Pada percobaan celah ganda, cahaya biru diganti cahaya merah tanpa mengubah susunan alat. Lebar pita terangnya...

- menyempit
- melebar
- tetap
- menjadi gelap semua

Menjelang pecah, bagian atas gelembung sabun tampak hitam karena...

- sabunnya mengering dan menjadi gelap
- cahaya terserap oleh sabun
- gelembung sudah pecah di bagian itu
- lapisannya sangat tipis sehingga kedua pantulan saling meniadakan

Gejala polarisasi membuktikan bahwa cahaya adalah gelombang...

- transversal
- longitudinal
- mekanik
- stasioner

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: spektroskop dari CD bekas

Bahan: CD atau DVD bekas, kardus kecil (misalnya kotak pasta gigi), selotip hitam, cutter (minta bantuan orang dewasa)

1. Buat celah sempit (±1 mm) di satu ujung kotak. Di ujung lainnya, tempelkan potongan CD dengan sisi mengilap menghadap ke dalam, sedikit miring.
2. Buat lubang intip di dekat potongan CD, lalu arahkan celah ke berbagai lampu: lampu pijar, lampu LED putih, lampu neon atau CFL, lampu jalan kuning, dan layar HP.
3. Gambar spektrum yang kamu lihat untuk tiap lampu. Mana yang berupa pita pelangi utuh, dan mana yang berupa garis-garis terpisah?

Pertanyaan: Kenapa spektrum lampu neon tampak bergaris, sedangkan lampu pijar tampak utuh? **Jangan pernah** mengarahkan spektroskop ke Matahari!

RINGKASAN KILAT **Bab 21 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menceritakan bukti bahwa cahaya adalah **gelombang elektromagnetik** dan memakai **prinsip Huygens**
- menghitung pola **interferensi celah ganda Young** dengan $d \sin\theta = m\lambda$ dan $\Delta y = \lambda L/d$
- menjelaskan warna **lapisan tipis** seperti gelembung sabun dan minyak di aspal basah
- menganalisis **difraksi** celah tunggal, **kisi difraksi**, dan **daya urai** alat optik
- menjelaskan **polarisasi** dan memakai hukum Malus $I = I_0 \cos^2\theta$

Istilah kunci

gelombang elektromagnetik · muka gelombang · difraksi · koheren · lebar pita · Kisi difraksi · kriteria Rayleigh · tak terpolarisasi · Polaroid · terpolarisasi linear

sudut Brewster

Rumus penting

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d}$$

Lebar pita interferensi celah ganda. Cahaya merah (λ panjang) dan layar jauh membuat pita melebar. Celah yang makin rapat juga membuat pita melebar.

$$\sin\theta = m\lambda N$$

Sudut terang pada kisi difraksi. Kisi yang makin rapat dan cahaya yang makin merah dibelokkan makin jauh. Orde yang lebih tinggi dibelokkan lebih jauh lagi.

$$L_{\text{maks}} = \frac{x D}{1{,}22\,\lambda}$$

Jarak terjauh dua lampu masih tampak terpisah. Lubang yang lebih lebar (D besar) dan cahaya yang lebih biru (λ kecil) mampu memisahkan benda yang lebih jauh.

$$I = I_0 \cos^2\theta$$

Hukum Malus. Searah (0°): lolos semua. Miring 45°: lolos setengahnya. Tegak lurus (90°): padam.

Jangan sampai terjebak

- Pita gelap tidak berarti energi cahaya "musnah".

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=21

Teka-teki untuk Bab 22

Kita sudah tahu bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik, dan polarisator memilih arah getaran **medan listrik**-nya. Namun, apa sebenarnya "medan listrik" itu? Kenapa penggaris plastik yang digosokkan ke rambut bisa menarik sobekan kertas tanpa menyentuhnya, seolah ada tangan tak terlihat?

▼ Intip petunjuk

Setiap muatan listrik dikelilingi "wilayah pengaruh" yang menarik atau menolak muatan lain. Wilayah itulah medan listrik. Saat muatan bergetar, medannya ikut bergetar, lalu riaknya merambat sebagai cahaya! Bab 22: Listrik Statis & Kapasitor.

BAB 22 · LISTRIK & MAGNET

22 Listrik Statis: Rambut Landak, Gagang Pintu, dan Petir

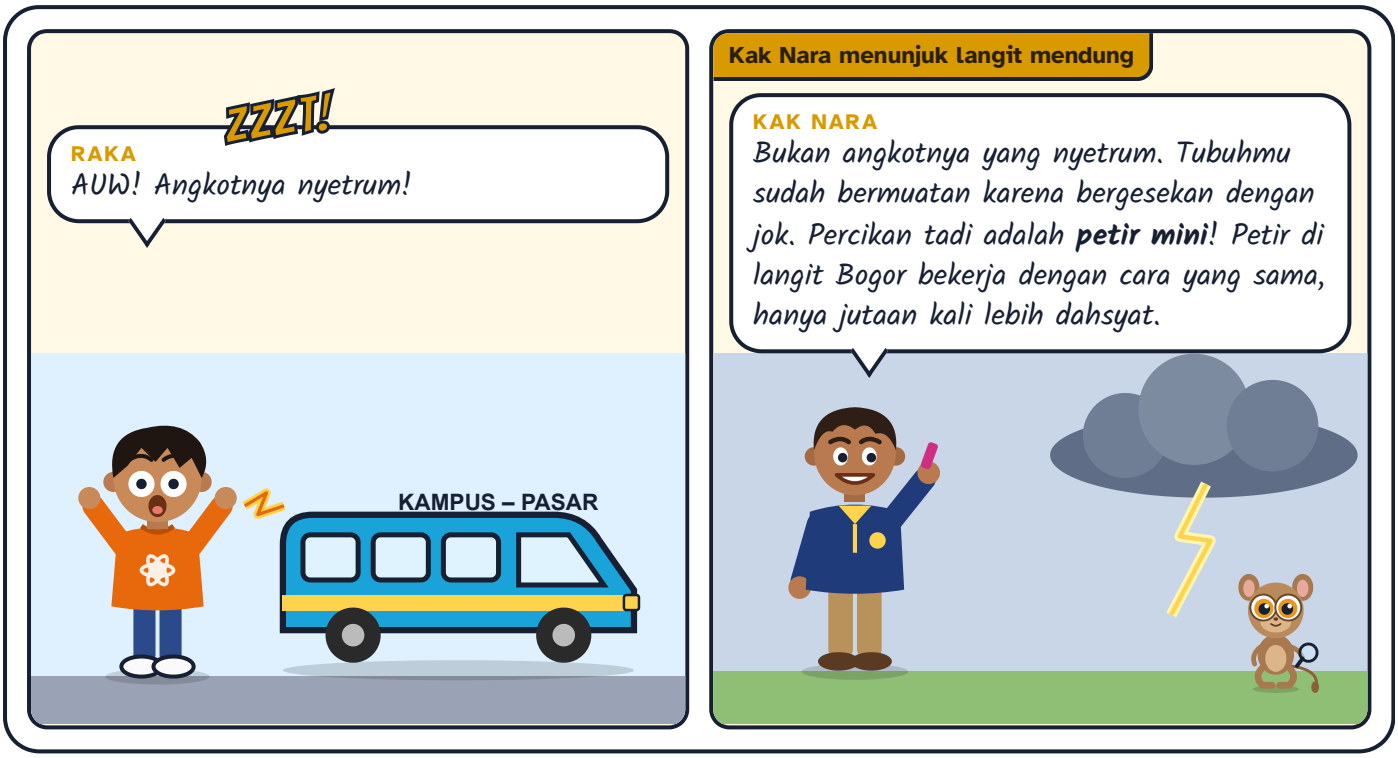
Kenapa rambutmu berdiri setelah disisir? Kenapa gagang pintu mobil kadang "menggigit" jarimu? Semuanya berasal dari partikel super kecil bernama elektron yang berpindah tempat. Pada skala raksasa, perpindahan yang sama melahirkan petir yang menggelegar di langit Indonesia.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan muatan listrik, kuantisasi muatan, kekekalan muatan, serta pemuatan dengan **gosokan**, **sentuhan**, dan **induksi**;
- menghitung gaya antarmuatan dengan **hukum Coulomb** dan kuat medan listrik $E = kq/r^2$;
- membaca pola **garis medan** dan bidang **ekuipotensial**, lalu memakai potensial listrik V dan usaha $W = q\Delta V$;
- menghitung kapasitas, muatan, dan energi **kapasitor**, termasuk susunan seri-paralel dan pengaruh dielektrik;
- menjelaskan terjadinya **petir**, cara kerja penangkal petir, dan cara melindungi diri saat badai.

RAMBUT LANDAK & ANGKOT YANG MENGGIGIT

KOMIK · 4 PANEL



Tebak Dulu!

Sisir yang baru dipakai menyisir rambut kering bisa menarik sobekan kertas. Padahal sobekan kertas itu netral. Mengapa kertas netral bisa tertarik?

- Karena kertas sebenarnya sudah bermuatan positif sejak awal.
- Karena sisir berubah menjadi magnet setelah digosok.
- Karena muatan di dalam kertas sedikit bergeser: sisi dekat sisir menjadi berlawanan muatan, sehingga tarikannya lebih kuat daripada tolakannya.
- Karena sisir yang hangat menyedot udara beserta kertasnya.

Jawabannya: muatan di dalam kertas bergeser (polarisasi). Sisir bermuatan negatif menolak elektron di dalam molekul kertas sedikit menjauh. Sisi kertas yang dekat sisir menjadi agak positif, dan sisi jauhnya agak negatif. Karena gaya listrik melemah dengan jarak, tarikan pada sisi dekat lebih kuat daripada tolakan pada sisi jauh. Hasilnya, kertas netral pun tertarik!

22.1 Muatan listrik: elektron yang suka berpindah

Semua benda tersusun atas atom. Di inti atom ada **proton** yang bermuatan positif. Di sekelilingnya ada **elektron** yang bermuatan negatif. Besar muatan proton dan elektron sama persis, hanya tandanya berlawanan. Atom yang jumlah proton dan elektronnya sama disebut **netral**.

Proton terkunci erat di inti, tetapi elektron di lapisan terluar atom bisa berpindah. Benda yang **kelebihan** elektron bermuatan **negatif**. Benda yang **kekurangan** elektron bermuatan **positif**. Aturan mainnya sederhana:

Muatan sejenis **tolak-menolak**, sedangkan muatan tak sejenis **tarik-menarik**.

Bahasa sederhana · Gampangnya: elektron itu seperti kelereng kecil yang bisa dicuri. Saat sisir menggosok rambut, sisir "mencuri" kelereng elektron dari rambut. Sisir jadi kelebihan elektron (negatif), rambut kekurangan elektron (positif). Helai-helai rambut yang sama-sama positif saling menolak, makanya berdiri seperti landak!

Dua hukum besar tentang muatan

- **Kuantisasi muatan.** Muatan selalu kelipatan bulat muatan elementer $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C: $q = ne$. Tidak ada benda bermuatan "setengah elektron". Satuan muatan adalah **coulomb** (C). Satu coulomb setara muatan sekitar $6{,}25 \times 10^{18}$ elektron!
- **Kekekalan muatan.** Muatan tidak bisa diciptakan atau dimusnahkan, hanya dipindahkan. Jika sisir mendapat -5 nC, rambut pasti kehilangan elektron senilai $+5$ nC.

Tiga cara memberi muatan

Cara	Yang terjadi	Contoh
Gosokan	elektron berpindah dari satu bahan ke bahan lain; kedua benda bermuatan berlawanan	sisir dan rambut, balon dan baju wol
Sentuhan (konduksi)	benda bermuatan menyentuh konduktor, lalu sebagian muatannya mengalir; muatannya sejenis	jari menyentuh gagang pintu, ZAP!
Induksi	benda bermuatan didekatkan (tanpa menyentuh) sehingga muatan di konduktor terpisah; jika dibumikan, konduktor mendapat muatan berlawanan	elektroskop, tanah di bawah awan petir

Bahan mana yang cenderung menjadi negatif saat digosok? Urutannya disebut **deret triboelektrik**. Bahan di ujung atas cenderung melepas elektron, dan bahan di ujung bawah cenderung menangkap elektron. Urutan ini bisa sedikit bergeser karena kelembapan dan kebersihan permukaan.

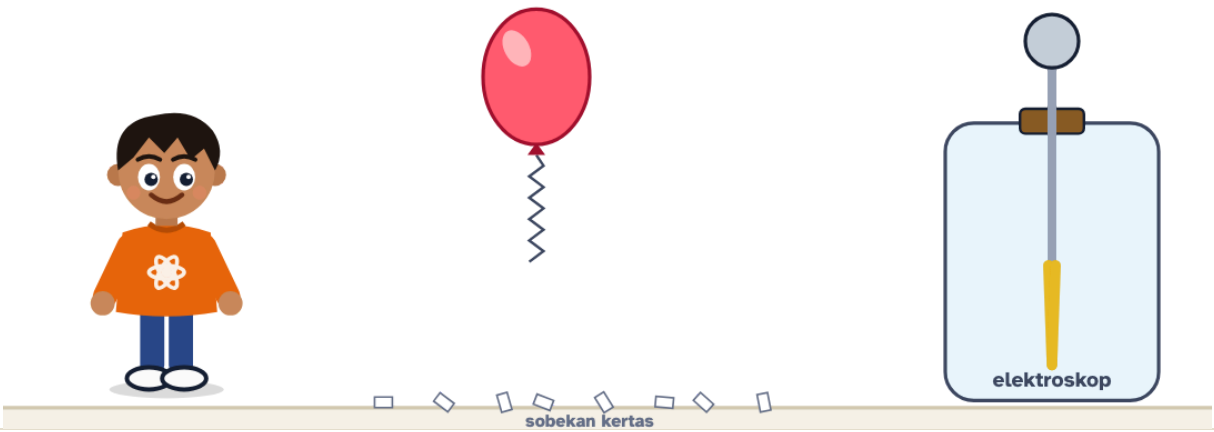
Cenderung menjadi positif (+)	...	Cenderung menjadi negatif (−)
rambut kering, kaca, nilon, wol	sutra, kertas, kapas	karet balon, plastik (penggaris, sedotan), PVC, teflon

Konduktor (logam, tubuh manusia, air keran) membiarkan elektron mengalir bebas. **Isolator** (plastik, karet, kaca kering) menahan elektron di tempatnya. Karena itu, penggaris plastik bisa "menyimpan" muatan di bagian yang digosok saja.

LAB MINI Balon, rambut Raka, dan elektroskop

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-22

Seret balon bolak-balik di rambut Raka!



Muatan balon	Muatan rambut	Muatan elektroskop	Daun elektroskop
0 satuan	0 satuan	0 satuan	menutup

Seret balon bolak-balik di rambut Raka untuk memindahkan elektron. Lalu dekatkan balon ke kepala elektroskop **tanpa menyentuh**. Kenapa daunnya membuka? Coba sentuhkan balon, coba juga tombol **bumikan** saat balon masih dekat, lalu jauhkan balonnya. Satu satuan muatan di sini mewakili sekitar 10 miliar elektron.

AWAS JEBAKAN

Saat benda menjadi positif, yang berpindah **bukan** proton yang datang, melainkan elektron yang **pergi**. Pada peristiwa listrik statis sehari-hari, proton tidak pernah berpindah dari inti atomnya.

CONTOH Menghitung elektron di balon

Setelah digosok ke rambut, sebuah balon bermuatan -8 nC (1 nC $= 10^{-9}$ C). Berapa banyak elektron yang berpindah ke balon?

1. $n = \dfrac{|q|}{e} = \dfrac{8 \times 10^{-9}}{1{,}6 \times 10^{-19}}.$

2. $n = 5 \times 10^{10}$ elektron.

Lima puluh miliar elektron! Banyak sekali, tetapi masih sangat kecil dibandingkan jumlah elektron di dalam balon itu sendiri (sekitar 10^{24}).

22.2 Hukum Coulomb: seberapa kuat tarikan dan tolakan

Pada 1785, Charles-Augustin de Coulomb memakai neraca puntir yang sangat peka untuk mengukur gaya antara dua bola kecil bermuatan. Hasilnya:

$$F = k\,\frac{q_1 q_2}{r^2}, \qquad k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \approx 9\times 10^9\ \mathrm{N\,m^2/C^2}.$$

Rumus ini bercerita: gaya sebanding dengan hasil kali kedua muatan, dan berbanding terbalik dengan **kuadrat** jaraknya. Jarak dijadikan dua kali, gaya tinggal seperempat. $\varepsilon_0 = 8{,}85\times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N\,m^2)}$ disebut **permitivitas ruang hampa**. Di dalam bahan seperti air, gaya listrik melemah sebesar faktor ε_r (permitivitas relatif bahan).

RUMUS HIDUP **Hukum Coulomb**

$$F = k\,\frac{q_1\,q_2}{r^2}$$

Muatan makin besar, gaya makin kuat. Jarak dua kali lipat, gaya tinggal seperempat.

q_1 Muatan pertama µC | q_2 Muatan kedua µC | r Jarak cm | F Gaya Coulomb N

GAYA COULOMB
-5,4
N

Muatan **3** µC dan **-2** µC berjarak **10** cm → F = **-5,4** N. Tanda + berarti tolak-menolak, tanda – berarti tarik-menarik.

Satuan Nusantara: ≈ 5,4 × berat apel kecil (±100 g) · ≈ 2% dari berat karung beras 25 kg

Cek satuan: $\frac{\mathrm{N\,m^2}}{\mathrm{C^2}}\cdot\frac{\mathrm{C\cdot C}}{\mathrm{m^2}} = \mathrm{N}$. Ubah µC ke C dan cm ke m dulu!

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

SEBERAPA KUAT GAYA LISTRIK?

Antara proton dan elektron di dalam atom hidrogen, gaya listriknya sekitar 10^{39} kali gaya gravitasinya. Kita tidak merasakan gaya sebesar itu sehari-hari karena hampir semua benda netral: muatan positif dan negatifnya saling mengimbangi dengan sangat sempurna.

KERJAKAN BERSAMA **Tiga muatan segaris**

Muatan $q_A = +2$ μC di $x = 0$, $q_B = -3$ μC di $x = 30$ cm, dan $q_C = +1$ μC di $x = 60$ cm. Berapa gaya total pada q_C?

1. Gaya A pada C (tolak, ke kanan): $F_{AC} = \dfrac{9 \times 10^9 \cdot 2 \times 10^{-6} \cdot 1 \times 10^{-6}}{0{,}6^2} = 0{,}05$ N.
2. Gaya B pada C (tarik, ke kiri): $F_{BC} = \dfrac{9 \times 10^9 \cdot 3 \times 10^{-6} \cdot 1 \times 10^{-6}}{0{,}3^2} = 0{,}30$ N.
3. Ambil kanan positif: $\Sigma F = 0{,}05 - 0{,}30 = -0{,}25$ N.

Gaya total 0,25 N ke kiri (ke arah B). Gaya-gaya listrik dijumlahkan sebagai vektor, sama seperti gaya di Bab 6. Ini disebut prinsip superposisi.

22.3 Medan listrik dan garis gaya

Bagaimana sisir "tahu" ada kertas di dekatnya, padahal tidak bersentuhan? Fisikawan Michael Faraday membayangkan setiap muatan dikelilingi **medan listrik**, yaitu "wilayah pengaruh" yang mengerjakan gaya pada muatan lain yang masuk ke dalamnya. Kuat medan didefinisikan sebagai gaya per satuan muatan uji positif:

$$E = \frac{F}{q_{\text{uji}}}, \qquad E = k\,\frac{q}{r^2} \text{ untuk muatan titik.}$$

Satuannya N/C (sama dengan V/m). Arah medan adalah arah gaya pada muatan uji **positif**: menjauhi muatan positif dan menuju muatan negatif.

RUMUS HIDUP **Kuat medan listrik muatan titik**

$$E = k\,\frac{q}{r^2}$$

Medan paling kuat di dekat muatan, lalu melemah cepat sebanding $1/r^2$.

- q Muatan sumber nC
- r Jarak dari muatan cm
- E Kuat medan N/C

KUAT MEDAN

9.000

N/C

Muatan **10** nC pada jarak **10** cm menghasilkan medan **9.000** N/C. Muatan uji 1 μC di sana akan merasakan gaya **9.000** × 10^{-6} N.

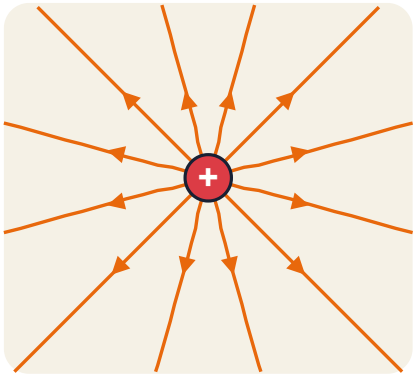
Cek satuan: $\mathrm{N/C} = \mathrm{V/m}$. Udara kering mulai 'bobol' (terjadi percikan) pada medan sekitar 3×10^6 V/m.

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

Faraday menggambarkan medan dengan **garis gaya** (garis medan):

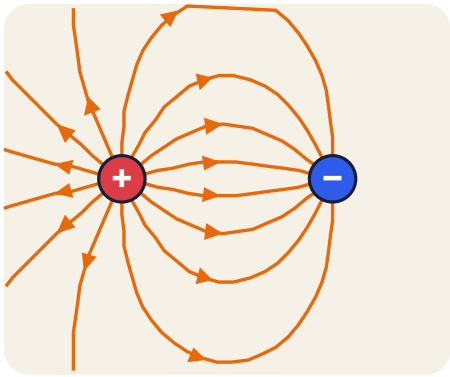
- garis keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif;
- arah garis di suatu titik adalah arah medan di titik itu;
- makin rapat garisnya, makin kuat medannya;
- garis medan tidak pernah berpotongan.

(a) satu muatan +



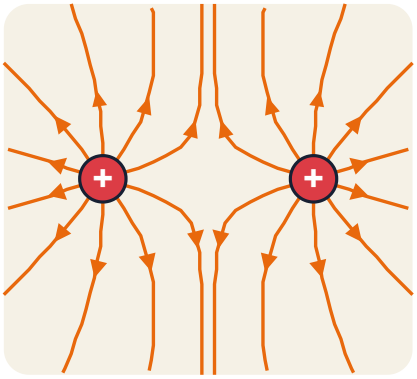
menyebar ke segala arah

(b) dipol: + dan −



dari + menuju −

(c) dua muatan +

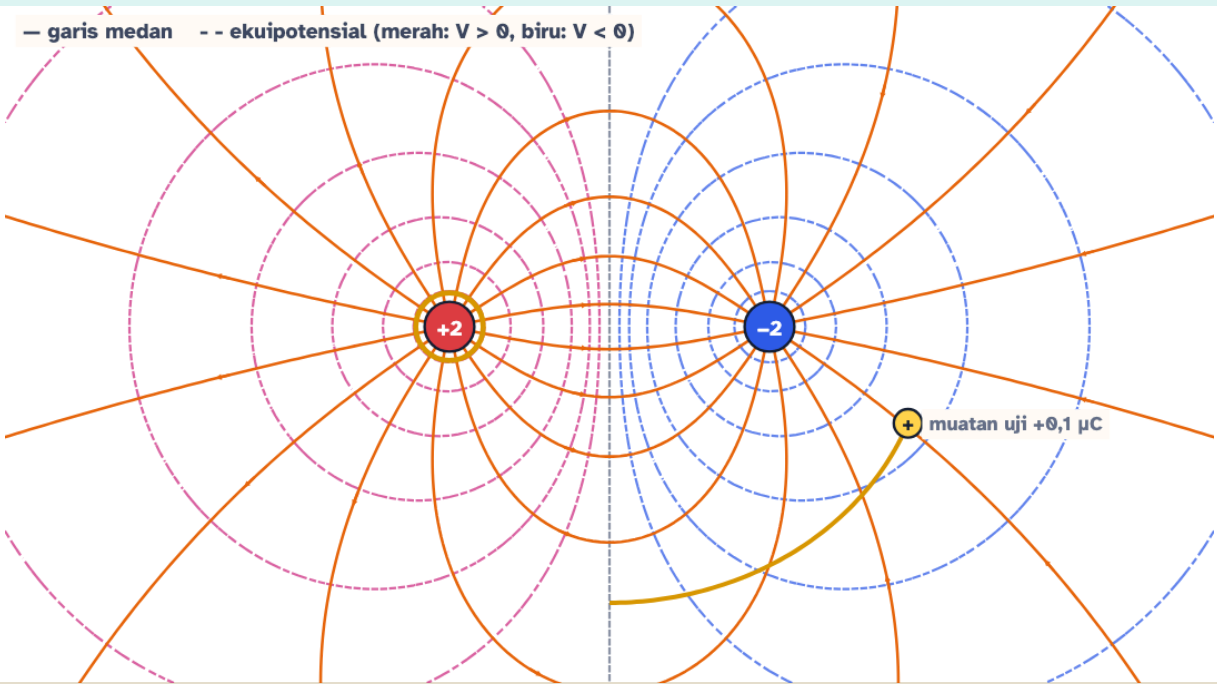


tolak-menolak, ada titik E = 0

Pola garis medan yang dihitung secara numerik. Kerapatan garis menunjukkan kuat medan. Di tengah-tengah dua muatan sejenis ada titik tanpa medan sama sekali.

LAB MINI Studio medan listrik: seret muatan sesukamu

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-22



E di kursor	V di kursor	Muatan terpilih
–	–	+2 μC

Seret muatan merah (+) dan biru (–). Klik sebuah muatan, lalu ubah nilainya dengan slider. Arahkan kursor ke mana saja untuk membaca E dan V. Garis putus-putus adalah **ekuipotensial**. Lalu seret **muatan uji** kuning ke suatu tempat dan tekan **Jalankan**. Apakah ia selalu bergerak tepat mengikuti garis medan?

COBA SENDIRI Titik tanpa medan

Muatan $+4$ μC dan $+1$ μC terpisah 30 cm. Di mana pada garis penghubungnya kuat medan listrik bernilai nol?

1. Kedua muatan sejenis, jadi titik nol berada **di antara** keduanya. Misalkan jaraknya x dari muatan 4 μC.
2. $k\dfrac{4}{x^2} = k\dfrac{1}{(30-x)^2} \Rightarrow \dfrac{30-x}{x} = \dfrac{1}{2}.$
3. $60 - 2x = x \Rightarrow x = 20$ cm.

Medan nol di titik 20 cm dari muatan 4 μC (10 cm dari muatan 1 μC), yaitu lebih dekat ke muatan yang lebih kecil. Coba buat susunan ini di Studio medan dan cari titik itu dengan kursor!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

DIPOL LISTRIK DAN ELEKTRON DI ANTARA KEPING

Pasangan $+q$ dan $-q$ berjarak d disebut **dipol**, dengan momen dipol $p = qd$. Di dalam medan seragam, dipol mengalami torsi $\tau = pE\sin\theta$ yang memutarnya searah medan. Molekul air adalah dipol, dan oven gelombang mikro memanaskan makanan dengan membuat dipol-dipol air terus berputar bolak-balik. Di antara dua keping sejajar, medannya seragam, $E = V/d$. Elektron yang masuk mendatar akan dibelokkan dengan percepatan tetap $a = eE/m$ dan lintasannya berbentuk parabola, persis gerak peluru di Bab 5. Prinsip ini dulu dipakai di tabung televisi.

22.4 Hukum Gauss dan sangkar Faraday

Bayangkan muatan dibungkus kantong khayal tertutup. Banyaknya garis medan yang menembus kantong itu disebut **fluks listrik** Φ. Karena garis medan selalu berawal dan berakhir di muatan, jumlah garis yang keluar dari kantong hanya bergantung pada muatan di dalamnya, apa pun bentuk kantongnya. Inilah inti hukum Gauss.

Akibat penting untuk kehidupan sehari-hari: di dalam **konduktor berongga**, medan listrik dari luar bernilai nol. Elektron bebas di logam langsung bergeser sampai medan di dalamnya hilang. Rongga logam seperti ini disebut **sangkar Faraday**. Karena itu, berada di dalam mobil berkerangka logam yang tertutup saat badai petir relatif aman, dan sinyal HP sering hilang di dalam lift.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM GAUSS DALAM RUMUS

$$\Phi = \oint E \cdot \mathrm{d}A = \frac{Q_{\text{dalam}}}{\varepsilon_0}.$$

Dengan memilih permukaan yang simetris, medan berbagai benda bisa dihitung dalam satu baris. **Bola bermuatan** Q (di luar bola): $E = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$, seolah semua muatan terkumpul di pusat. Di dalam kulit bola: $E = 0$. **Kawat panjang** bermuatan λ per meter: $E = \dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$. **Bidang luas** bermuatan σ per m²: $E = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}$, tidak bergantung jarak! Dua bidang bermuatan berlawanan (kapasitor) menghasilkan $E = \sigma/\varepsilon_0$ di antara keduanya dan nol di luarnya.

22.5 Potensial dan energi potensial listrik

Di Bab 8, bola di tempat tinggi menyimpan energi potensial gravitasi. Muatan di dalam medan listrik juga menyimpan energi potensial. Fisikawan mendefinisikan **potensial listrik** V sebagai energi potensial per satuan muatan. Anggaplah potensial sebagai "ketinggian listrik": muatan positif yang dilepas akan "menggelinding" dari potensial tinggi ke potensial rendah.

$$V = k\,\frac{q}{r}, \qquad E_p = k\,\frac{q_1 q_2}{r}, \qquad W = q\,\Delta V.$$

Satuan potensial adalah **volt** (V = J/C). Baterai 1,5 V memberi setiap coulomb muatan energi 1,5 joule. Untuk partikel kecil, fisikawan memakai satuan **elektronvolt**: $1\ \mathrm{eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}$ J, yaitu energi yang diperoleh satu elektron yang dipercepat oleh beda potensial 1 volt.

Titik-titik yang potensialnya sama membentuk **bidang ekuipotensial**, seperti garis kontur pada peta gunung. Bidang ekuipotensial selalu **tegak lurus** garis medan, dan memindahkan muatan sepanjang bidang ini tidak memerlukan usaha. Di antara dua keping sejajar berjarak d dengan beda potensial V, medannya seragam:

$$E = \frac{V}{d}.$$

TRIK KAK NARA: VEKTOR ATAU SKALAR?

Gaya F dan medan E adalah **vektor**, jadi jumlahkan dengan memperhatikan arah. Potensial V dan energi potensial E_p adalah **skalar**, jadi cukup jumlahkan biasa, tetapi tanda muatannya wajib ikut! Untuk empat muatan $+q, +q, -q, -q$ di sudut persegi, potensial di pusatnya nol, tetapi medannya tidak.

KERJAKAN BERSAMA **Elektron dalam tabung sinar katode**

Sebuah elektron dipercepat dari keadaan diam oleh beda potensial 1000 V. Berapa energi kinetik dan kelajuannya? ($m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg)

1. $E_k = e\,\Delta V = 1000$ eV $= 1{,}6 \times 10^{-16}$ J.
2. $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-16}}{9{,}11 \times 10^{-31}}}.$
3. $v \approx 1{,}9 \times 10^{7}$ m/s.

Kelajuannya sekitar 6% laju cahaya, hanya dengan 1000 volt! Elektron sangat ringan, sehingga mudah dipercepat.

22.6 Kapasitor: tabung penyimpan muatan

Kapasitor adalah dua keping konduktor yang dipisahkan isolator. Jika dihubungkan ke baterai, elektron dipompa dari satu keping ke keping lainnya. Satu keping menjadi $+Q$ dan keping lainnya $-Q$. Perbandingan muatan terhadap beda potensialnya disebut **kapasitas**:

$$C = \frac{Q}{V},$$

dalam satuan **farad** (F). Satu farad sangat besar, jadi yang biasa dipakai adalah μF (10^{-6}), nF (10^{-9}), dan pF (10^{-12}). Untuk kapasitor keping sejajar seluas A yang berjarak d:

RUMUS HIDUP **Kapasitas kapasitor keping sejajar**

$$C = \frac{\varepsilon_r \, \varepsilon_0 \, A}{d}$$

Keping lebih luas dan lebih rapat menampung lebih banyak muatan. Isolator di antaranya (dielektrik) melipatgandakan kapasitasnya.

- ε_r Permitivitas relatif
- A Luas keping cm²
- d Jarak keping mm
- C Kapasitas pF

KAPASITAS
88,5
pF

Keping **100** cm² berjarak **1** mm dengan ε_r = **1** → C = **88,5** pF.

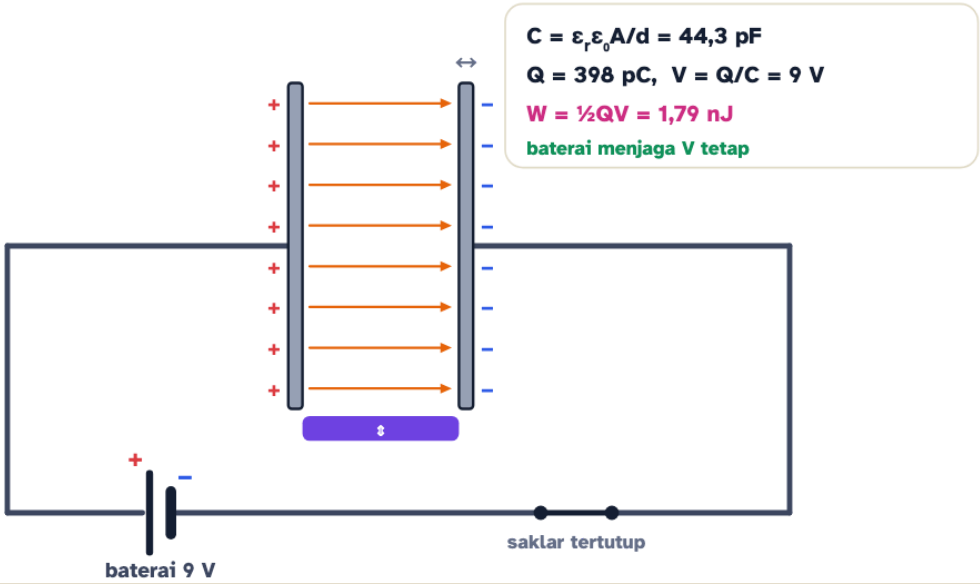
Cek satuan: $\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\,m}^2} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\,m}} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}} = \mathrm{F}.$

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

Bahan isolator di antara keping disebut **dielektrik**. Molekulnya terpolarisasi dan melemahkan medan di dalamnya, sehingga dengan muatan yang sama, beda potensialnya turun. Akibatnya, kapasitas naik sebesar faktor ε_r.

LAB MINI **Kapasitor keping sejajar: tarik, sisipkan, putuskan**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-22



Kapasitas C	Muatan Q	Tegangan V	Medan E	Energi W
44,3 pF	398 pC	9 V	2.250 V/m	1,79 nJ

Seret **keping kanan** untuk mengubah jarak, dan seret **lempeng dielektrik** naik-turun untuk menyisipkannya. Bandingkan dua keadaan: **baterai tersambung** (tegangan tetap) dan **baterai terputus** (muatan tetap). Putuskan baterai, lalu jauhkan kepingnya. Tegangannya malah naik! Mengapa?

Energi yang tersimpan

Mengisi kapasitor butuh usaha, karena tiap elektron tambahan harus melawan tolakan elektron yang sudah ada. Energi itu tersimpan di dalam medan listrik di antara keping:

RUMUS HIDUP **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.

C Kapasitas μF | V Tegangan V | W Energi tersimpan J

ENERGI TERSIMPAN

8,17

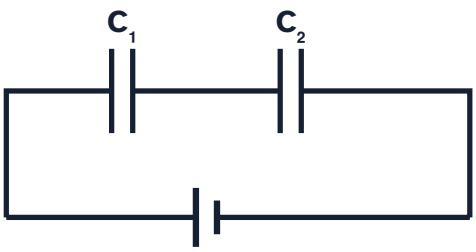
J

Kapasitor **150** μF yang diisi sampai **330** V menyimpan **8,17** J, dan bisa melepaskannya dalam sepersekian milidetik!

Cek satuan: $\mathrm{F} \cdot \mathrm{V}^2 = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}} \cdot \mathrm{V}^2 = \mathrm{C\,V} = \mathrm{J}$. Bentuk lain: $W = \frac{1}{2} Q V = \frac{Q^2}{2C}$.

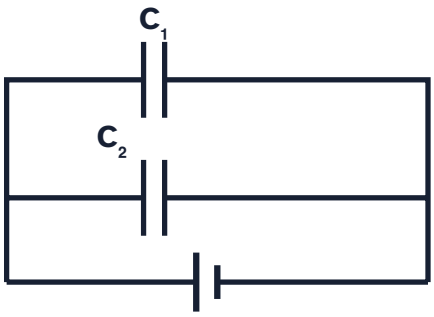
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ENERGI-KAPASITOR

Susunan seri dan paralel



seri: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$

muatan sama, tegangan dibagi



paralel: $C = C_1 + C_2$

tegangan sama, muatan dibagi

Hati-hati: rumus kapasitor **terbalik** dari rumus hambatan di Bab 23. Kapasitor paralel tinggal dijumlahkan, karena sama saja dengan memperluas keping.

KERJAKAN BERSAMA **Dua kapasitor seri**

Kapasitor 3 µF dan 6 µF disusun seri, lalu dihubungkan ke baterai 12 V. Berapa kapasitas pengganti, muatan, dan tegangan pada tiap kapasitor?

1. $\frac{1}{C} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$, jadi $C = 2$ µF.
2. $Q = CV = 2 \times 12 = 24$ µC, sama pada kedua kapasitor (susunan seri).
3. $V_1 = Q/C_1 = 24/3 = 8$ V dan $V_2 = 24/6 = 4$ V. Cek: $8 + 4 = 12$ V. ✓

Kapasitor yang lebih kecil justru menanggung tegangan yang lebih besar. Perancang rangkaian harus memastikan tegangan ini tidak melampaui batas kapasitor.

COBA SENDIRI **Defibrilator di rumah sakit**

Kapasitor defibrilator 100 µF diisi sampai 2.000 V, lalu dikosongkan melalui dada pasien dalam sekitar 5 ms. Berapa energi yang dilepaskan dan berapa daya rata-ratanya?

1. $W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}(100 \times 10^{-6})(2000)^2 = 200$ J.
2. $P = \frac{W}{t} = \frac{200}{5 \times 10^{-3}} = 40.000$ W.

Energi 200 J setara energi untuk mengangkat 2 kg setinggi 10 m, tetapi dilepaskan dalam 5 ms sehingga dayanya 40 kW, setara sekitar seratus rice cooker yang menyala bersamaan. Kejutan singkat ini dapat "mengatur ulang" irama jantung yang kacau.

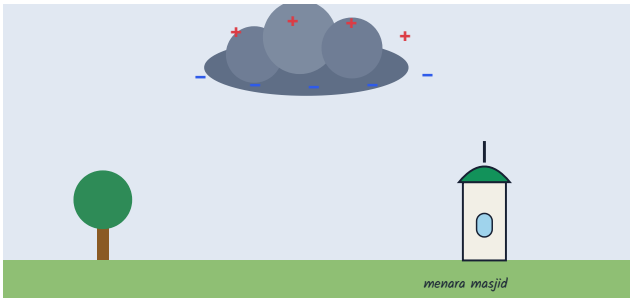
LANJUT · IB & OLIMPIADE

PENGISIAN KAPASITOR LEWAT HAMBATAN

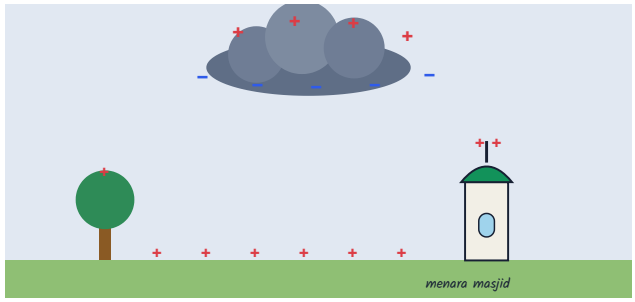
Jika kapasitor diisi lewat hambatan R, muatannya tidak langsung penuh: $Q(t) = Q_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$. Besaran $\tau = RC$ (dalam sekon) disebut **konstanta waktu**. Setelah 1τ, kapasitor terisi 63%, dan setelah 5τ hampir penuh. Saat dikosongkan, $Q = Q_0 e^{-t/RC}$. Sirkuit RC dipakai pada lampu kilat, lampu sein yang berkedip, dan penunda waktu. Kamu akan bertemu hambatan R di Bab 23.

22.7 Petir dan penangkal petir

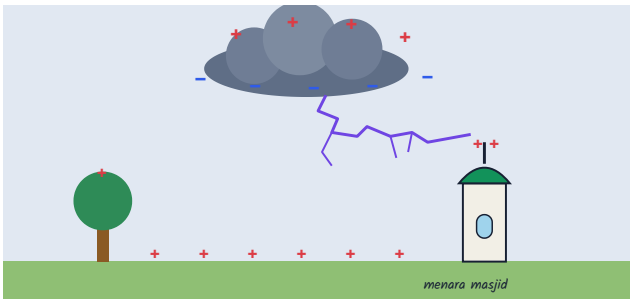
Petir adalah percikan listrik statis raksasa. Bagaimana prosesnya? Ikuti animasi berikut.



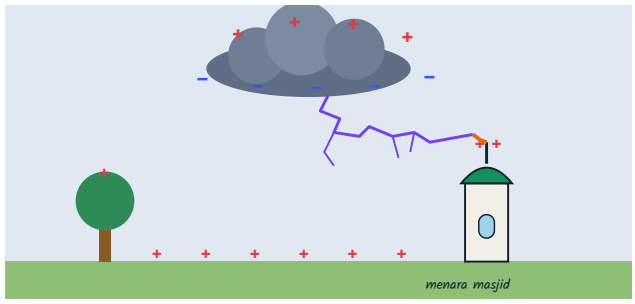
Langkah 1. Di dalam awan kumulonimbus, butiran es dan butiran es lunak (*graupel*) saling bertumbukan, sehingga muatannya terpisah. Bagian atas awan cenderung positif, dan bagian bawahnya negatif.



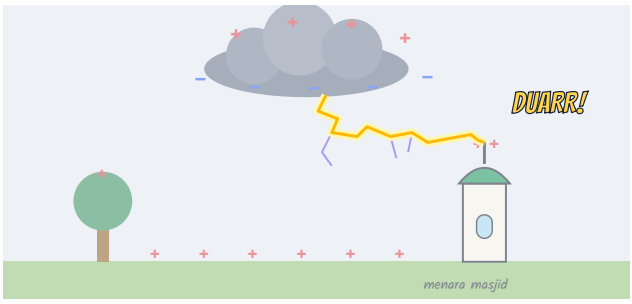
Langkah 2. Muatan negatif di dasar awan menginduksi permukaan tanah di bawahnya menjadi positif. Muatan positif paling banyak berkumpul di benda yang tinggi dan runcing, seperti pohon dan ujung penangkal petir.



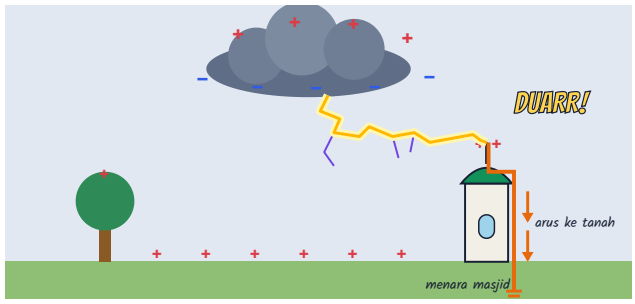
Langkah 3. Saat medannya cukup kuat, udara mulai "bobol". Lidah petir bertingkat (*stepped leader*) turun sambil bercabang, puluhan meter setiap langkah.



Langkah 4. Dari ujung penangkal petir, lidah petir naik (*streamer*) melesat menyambutnya.



Langkah 5. Keduanya bertemu dan terbentuk jalur yang menyambung. Arus puluhan ribu ampere melesat dalam **sambaran balik**. Udara di jalurnya memanas hingga sekitar 30.000 °C (lima kali suhu permukaan Matahari), lalu memuai tiba-tiba. Itulah guruh!



Langkah 6. Penangkal petir menyalurkan arus melalui kabel tebal ke batang pembumian di dalam tanah, sehingga arus tidak mengalir menembus dinding dan isi bangunan.

TAMU DARI MASA LALU

Pada 1752, Benjamin Franklin (menurut kisahnya sendiri) menerbangkan layangan saat badai dan melihat percikan dari kunci logam di ujung benangnya. Ia menyimpulkan bahwa petir adalah listrik, lalu menemukan **penangkal petir**: batang logam runcing di puncak bangunan yang dihubungkan ke tanah. Percobaan layangan itu sangat berbahaya. Pada 1753, ilmuwan Georg Richmann tewas tersambar saat melakukan percobaan serupa di Sankt-Peterburg. Jangan pernah mencobanya!

FISIKA INDONESIA

Indonesia terletak di khatulistiwa dengan udara panas dan lembap, sehingga termasuk wilayah dengan aktivitas petir tertinggi di dunia. **Bogor** dijuluki "kota hujan" dan pernah tercatat mengalami sekitar 322 hari berpetir dalam setahun (catatan tahun 1916). Karena itu, menara masjid, gedung tinggi, dan menara BTS wajib dilengkapi penangkal petir. BMKG juga memantau sambaran petir dengan jaringan alat pendeteksi petir. Di PLTU, prinsip listrik statis dipakai untuk kebaikan: **presipitator elektrostatik** memberi muatan pada partikel abu di cerobong, lalu menariknya ke keping bermuatan berlawanan, sehingga udara yang keluar lebih bersih.

KESELAMATAN SAAT BADAI PETIR

Jika kamu sudah mendengar guruh, kamu sudah berada dalam jangkauan petir. Segera masuk ke dalam bangunan atau mobil yang tertutup. **Jangan** berteduh di bawah pohon tinggi, berdiri di lapangan terbuka, berenang, atau memegang benda logam panjang. Jika terjebak di tempat terbuka, berjongkoklah dengan kaki rapat dan jauhi orang lain. Tunggu sekitar 30 menit setelah guruh terakhir sebelum keluar lagi.

MITOS

"Petir tidak pernah menyambar tempat yang sama dua kali."

FAKTA

Salah besar! Petir justru suka menyambar benda tinggi yang sama berulang kali. Gedung pencakar langit dan menara pemancar bisa tersambar puluhan kali dalam setahun. Penangkal petirnya menyalurkan arus itu dengan aman.

MITOS

"Berteduh di bawah pohon saat hujan petir itu aman karena terlindung."

FAKTA

Sangat berbahaya. Pohon tinggi mudah tersambar, dan arusnya bisa melompat ke tubuh orang di dekatnya atau menjalar lewat tanah. Lebih aman masuk ke bangunan atau mobil tertutup (sangkar Faraday).

Mesin fotokopi & printer laser

Drum bermuatan disinari bayangan dokumen. Bagian yang terang kehilangan muatan, sehingga serbuk toner hanya menempel di bagian yang membentuk huruf.

Layar sentuh HP

Jarimu yang konduktor mengubah kapasitas kecil di bawah kaca layar. Chip mendeteksi perubahan itu dan tahu di mana kamu menyentuh.

Lampu kilat kamera

Kapasitor diisi perlahan oleh baterai, lalu mengosongkan energinya dalam sekejap untuk menyalakan tabung kilat.

Penyaring abu PLTU

Presipitator elektrostatik memberi muatan pada partikel abu, lalu menariknya ke keping logam sebelum asap keluar cerobong.

Cat semprot elektrostatik

Butiran cat diberi muatan, sedangkan rangka motor dibumikan, sehingga cat tertarik merata, bahkan sampai ke balik sudut.

Penangkal petir menara

Batang runcing di puncak menara masjid menyambut petir dan menyalurkan arusnya ke tanah lewat kabel tebal.

Cek Cepat

Jarak dua muatan dijadikan tiga kali semula. Gaya Coulomb di antara keduanya menjadi...

- 3 kali semula
- 1/3 kali semula
- 1/9 kali semula
- 9 kali semula

Kapasitor dihubungkan ke baterai, lalu jarak kepingnya diperkecil saat baterai masih tersambung. Muatan pada kapasitor...

- bertambah
- berkurang
- tetap
- menjadi nol

Garis-garis medan listrik di sekitar sebuah muatan negatif tunggal...

- keluar menjauhi muatan
- masuk menuju muatan
- melingkari muatan
- tidak ada

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. B

🧪 Tantangan Rumah: elektroskop toples

Bahan: toples kaca atau gelas plastik bening, karton, paku atau kawat tembaga, aluminium foil, balon atau penggaris plastik, rambut atau kain wol

1. Tusukkan kawat melalui tutup karton. Bengkokkan ujung bawahnya menjadi kait, dan bulatkan foil menjadi bola di ujung atasnya.
2. Gantungkan dua lembar foil tipis (2 cm × 4 cm) di kait itu, lalu tutup toples. Kedua daun foil harus bebas bergerak.
3. Gosok balon ke rambut, lalu dekatkan ke bola foil tanpa menyentuh. Amati daunnya. Lalu sentuhkan, jauhkan, dan amati lagi.
4. Ulangi pada hari yang kering dan hari yang lembap.

Pertanyaan: Mengapa daun foil membuka walaupun balon tidak menyentuhnya? Mengapa percobaan ini lebih berhasil saat udara kering? (Petunjuk: air sedikit bersifat konduktor dan diam-diam "membocorkan" muatan.)

⚡ RINGKASAN KILAT **Bab 22 dalam 3 menit**

✅ **Kamu sekarang bisa...**

- menjelaskan muatan listrik, kuantisasi muatan, kekekalan muatan, serta pemuatan dengan **gosokan**, **sentuhan**, dan **induksi**
- menghitung gaya antarmuatan dengan **hukum Coulomb** dan kuat medan listrik $E = kq/r^2$
- membaca pola **garis medan** dan bidang **ekuipotensial**, lalu memakai potensial listrik V dan usaha $W = q\Delta V$
- menghitung kapasitas, muatan, dan energi **kapasitor**, termasuk susunan seri-paralel dan pengaruh dielektrik
- menjelaskan terjadinya **petir**, cara kerja penangkal petir, dan cara melindungi diri saat badai

Istilah kunci

netral · deret triboelektrik · Konduktor · Isolator · permitivitas ruang hampa · medan listrik · garis gaya · fluks listrik · sangkar Faraday · potensial listrik · elektronvolt · bidang ekuipotensial · Kapasitor · kapasitas · dielektrik

Rumus penting

$$F = k\,\frac{q_1\,q_2}{r^2}$$

Hukum Coulomb. Muatan makin besar, gaya makin kuat. Jarak dua kali lipat, gaya tinggal seperempat.

$$E = k\,\frac{q}{r^2}$$

Kuat medan listrik muatan titik. Medan paling kuat di dekat muatan, lalu melemah cepat sebanding $1/r^2$.

$$C = \frac{\varepsilon_r\,\varepsilon_0\,A}{d}$$

Kapasitas kapasitor keping sejajar. Keping lebih luas dan lebih rapat menampung lebih banyak muatan. Isolator di antaranya (dielektrik) melipatgandakan kapasitasnya.

$$W = \tfrac{1}{2}\,C\,V^2$$

Energi kapasitor. Tegangan dua kali lipat, energinya empat kali lipat. Itulah sebabnya kilat lampu kamera dan alat pacu jantung memakai tegangan tinggi.

Jangan sampai terjebak

- Saat benda menjadi positif, yang berpindah bukan proton yang datang, melainkan elektron yang pergi.
- Jika kamu sudah mendengar guruh, kamu sudah berada dalam jangkauan petir.

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=22

Teka-teki untuk Bab 23

Kapasitor lampu kilat melepaskan seluruh muatannya dalam sekejap. ZAP! Lalu selesai. Namun, lampu di kamarmu bisa menyala semalaman, dan kipas angin bisa berputar berjam-jam. Bagaimana caranya membuat muatan terus mengalir tanpa habis? Lalu, kenapa token listrik di rumahmu tetap saja bisa habis?

▼ **Intip petunjuk**

Kita butuh "pompa muatan" yang terus menjaga beda potensial, yaitu baterai atau pembangkit PLN, serta jalur tertutup tempat elektron berputar terus. Aliran muatan inilah **arus listrik**. Bab 23: Listrik Dinamis.

BAB 23 · LISTRIK & MAGNET

23 Listrik Dinamis: Sungai Elektron di Dalam Kabel

Tengah malam, meteran token berbunyi "tit-tit-tit", padahal kamu "cuma" main game. Ke mana perginya listrik itu, dan berapa rupiah harganya? Ayo ikuti perjalanan muatan dari stop kontak sampai ke dompet!

Setelah bab ini, kamu bisa

- menjelaskan **arus**, **beda potensial**, dan **GGL** dengan analogi yang tepat, lalu menghitung $I = Q/t$;
- memakai **hukum Ohm** $V = IR$ dan **hambatan jenis** $R = \rho L/A$, termasuk pengaruh suhu;
- menghitung hambatan pengganti **seri**, **paralel**, dan campuran, serta memecahkan rangkaian dengan **hukum Kirchhoff**;
- menghitung **daya**, **energi (kWh)**, dan **biaya listrik** atau token PLN di rumahmu;
- menjelaskan fungsi **MCB**, **sekering**, dan **kabel ground**, serta mempraktikkan aturan aman listrik.

TOKEN TENGAH MALAM

KOMIK · 4 PANEL

Tebak Dulu!

Kabel dari gardu PLN ke rumahmu panjangnya ratusan meter, tetapi lampu menyala begitu saklar ditekan. Seberapa cepat elektron sebenarnya bergerak di dalam kabel?

- Hampir secepat cahaya, ±300.000 km/s.
- Kira-kira secepat bunyi, ±340 m/s.
- Sangat lambat, kurang dari 1 mm per detik.
- Elektron tidak bergerak sama sekali.

Jawabannya: sangat lambat! Pada kabel rumah, elektron "berjalan" rata-rata hanya sekitar 0,1 mm/s, lebih lambat daripada siput. Yang merambat hampir secepat cahaya adalah *dorongan*-nya (medan listrik). Begitu saklar ditutup, semua elektron di sepanjang kabel mulai bergerak hampir bersamaan, seperti kelereng dalam pipa yang sudah penuh. Lihat animasinya di 23.1.

23.1 Arus listrik: muatan yang mengalir

Bayangkan gerbang *tap* kartu di stasiun KRL. Petugas menghitung berapa penumpang yang lewat setiap menit. Makin banyak penumpang lewat per menit, makin "deras" arus penumpangnya. **Arus listrik** persis seperti itu, hanya saja yang lewat adalah **muatan listrik**, dan yang dihitung adalah berapa coulomb yang melewati satu penampang kabel setiap detik.

$$I = \frac{Q}{t}$$

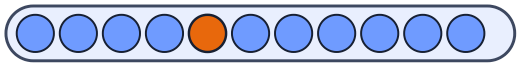
Rumus ini bercerita: *arus = banyaknya muatan yang lewat dibagi waktunya*. I adalah arus (ampere, A), Q adalah muatan (coulomb, C), dan t adalah waktu (sekon, s). Jadi 1 ampere = 1 coulomb per detik. Satu elektron hanya bermuatan $1{,}6 \times 10^{-19}$ C, sehingga arus 1 A berarti sekitar **6,25 miliar miliar** ($6{,}25 \times 10^{18}$) elektron melewati penampang kabel setiap detik!

Bahasa sederhana · Gampangnya: **arus listrik = aliran muatan**, seperti aliran air di selang. Makin banyak air yang keluar tiap detik, makin besar arusnya. Satuannya **ampere**, disingkat A.

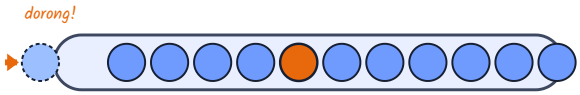
Peristiwa	Arus (kira-kira)
Lampu indikator LED kecil	0,02 A
Lampu LED 9 W di rumah (220 V)	0,04 A
Kipas angin 40 W	0,2 A
Rice cooker saat memasak (±400 W)	1,8 A
Pengisian cepat HP (kabel USB)	2–3 A
Starter mobil dari aki	100–200 A
Sambaran petir	puluhan ribu ampere (±30.000 A)
Arus lewat tubuh yang sudah berbahaya	**±0,03 A (30 mA)**

Mengapa lampu langsung menyala?

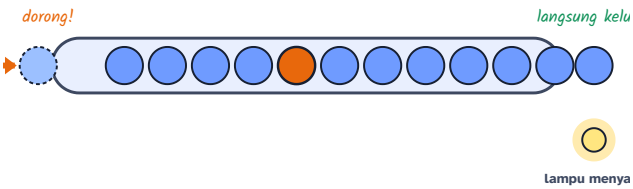
Kabel logam sudah **penuh** elektron bebas sejak awal. Baterai atau PLN tidak "mengisi" kabel dengan elektron baru. Sumber listrik hanya **mendorong** elektron yang sudah ada. Ikuti animasinya:



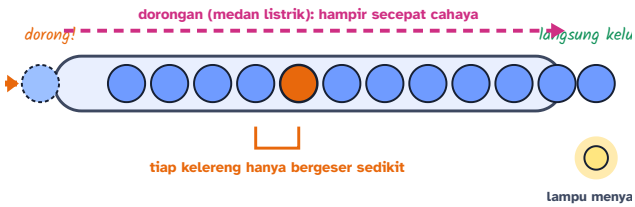
Langkah 1. Kabel ibarat pipa yang **sudah penuh** kelereng. Setiap kelereng mewakili elektron bebas. Perhatikan kelereng oranye.



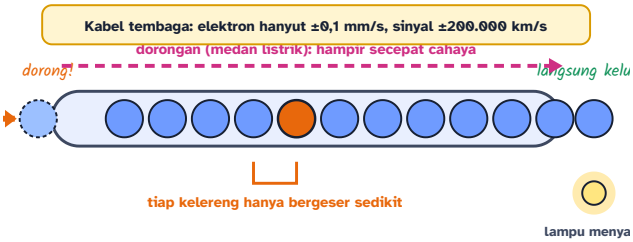
Langkah 2. Baterai (atau PLN) mendorong satu kelereng masuk dari kiri. Semua kelereng ikut bergeser bersamaan.



Langkah 3. Di ujung kanan, satu kelereng **langsung** keluar. Inilah sebabnya lampu menyala seketika, walaupun kelereng yang kamu dorong belum sampai di sana.



Langkah 4. Yang merambat cepat adalah **dorongannya**. Kelereng oranye sendiri hanya bergeser satu langkah.



Langkah 5. Di kabel sungguhan, elektron bergerak acak dengan sangat cepat, tetapi gerak "hanyut" bersihnya sangat lambat: ±0,1 mm/s. Sinyal listriknya merambat ±2/3 kecepatan cahaya.

⚠️ **AWAS JEBAKAN: DUA ARAH ARUS**

Para ilmuwan abad ke-18 menetapkan arah arus **dari kutub positif ke kutub negatif** (lewat rangkaian luar), sebelum elektron ditemukan. Ternyata yang bergerak di kabel logam adalah elektron yang bermuatan negatif, dan arahnya **berlawanan**: dari negatif ke positif. Kita tetap memakai **arah arus konvensional** (+ ke −) di semua rumus dan diagram. Jadi jangan bingung kalau gerak elektron di simulasi berlawanan dengan panah arus.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

KECEPATAN HANYUT

Jika dalam kabel ada n elektron bebas per m³, masing-masing bermuatan e, dan semuanya hanyut dengan kecepatan v_d melewati penampang A, maka $I = nev_dA$. Untuk tembaga, $n \approx 8{,}5 \times 10^{28}$ m⁻³. Kabel rumah 1 mm² yang mengalirkan 1 A memberi $v_d = \dfrac{1}{8{,}5 \times 10^{28} \cdot 1{,}6 \times 10^{-19} \cdot 10^{-6}} \approx 7 \times 10^{-5}$ m/s. Untuk menempuh 1 m, satu elektron butuh hampir 4 jam! Rapat arus $J = I/A$ dan medan listrik di kawat dihubungkan oleh bentuk mikroskopik hukum Ohm: $J = \sigma E$.

23.2 Beda potensial dan GGL: "pompa" muatan

Air di menara air mengalir turun karena ada **beda ketinggian**. Muatan listrik mengalir di rangkaian karena ada **beda potensial** (tegangan). Beda potensial adalah **energi yang dibawa atau dilepaskan setiap coulomb muatan** saat berpindah antara dua titik:

$$V = \frac{W}{Q}$$

V dalam volt (V), W energi dalam joule (J), Q muatan dalam coulomb (C). Jadi 1 volt = 1 joule per coulomb. Baterai 1,5 V memberi setiap coulomb muatan 1,5 J energi. Listrik PLN 220 V memberi setiap coulomb 220 J. Itulah sebabnya listrik rumah jauh lebih berbahaya daripada baterai senter.

Baterai bekerja seperti **pompa air** yang mengangkat air kembali ke menara. Energi kimia di dalamnya "mengangkat" muatan ke potensial tinggi. Energi per coulomb yang diberikan sumber disebut **gaya gerak listrik (GGL)**, diberi simbol ε. Namanya memang "gaya", tetapi satuannya volt, bukan newton.

Baterai sungguhan punya **hambatan dalam** r. Sebagian energi terbuang di dalam baterai itu sendiri (makanya baterai terasa hangat saat dipakai berat). Tegangan yang benar-benar sampai ke rangkaian luar disebut **tegangan jepit**:

$$V_{\text{jepit}} = \varepsilon - Ir \qquad \text{dan} \qquad I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

TRIK KAK NARA: "AMPERE ANTRE, VOLT NONTON"

Amperemeter harus **antre** di jalur arus, jadi dipasang **seri**, dan hambatannya dibuat sangat kecil. **Voltmeter** cukup **menonton** dari pinggir untuk membandingkan dua titik, jadi dipasang **paralel**, dan hambatannya sangat besar supaya hampir tidak mengambil arus.

Menyusun sel: seri atau paralel?

Senter berisi dua baterai 1,5 V yang disusun **seri** (ujung + bertemu ujung –): GGL-nya dijumlahkan menjadi 3 V, dan hambatan dalamnya juga dijumlahkan. Aki motor 12 V sebenarnya berisi **enam sel 2 V** yang disusun seri. Sel identik yang disusun **paralel** GGL-nya tetap, tetapi hambatan dalam totalnya mengecil dan baterainya lebih awet. Power bank dan baterai sepeda listrik memadukan keduanya: sel-sel disusun seri untuk menaikkan tegangan, dan paralel untuk menambah kapasitas.

TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1800, Alessandro Volta dari Italia menumpuk lempengan seng dan tembaga yang diselingi kain basah air garam. Tumpukan ini, *pila voltaica*, adalah baterai pertama di dunia dan sumber arus listrik tetap yang pertama. Sebelumnya, ilmuwan hanya bisa bermain dengan "percikan" listrik statis. Untuk menghormatinya, satuan beda potensial dinamai **volt**.

23.3 Hambatan dan hukum Ohm

Coba bandingkan mengalirkan air lewat selang besar dan lewat sedotan. Sedotan lebih "menghambat". Di kabel, elektron yang hanyut terus bertumbukan dengan ion-ion logam yang bergetar. Tumbukan inilah sumber **hambatan listrik** R, satuannya **ohm** (Ω). Hambatan juga yang membuat elemen setrika dan rice cooker panas: energi elektron berubah menjadi getaran ion, yaitu kalor.

Hukum Ohm. Untuk penghantar logam pada suhu tetap, arus sebanding dengan beda potensial: $V = IR$. Grafik V terhadap I berupa garis lurus melalui titik asal, dan kemiringannya adalah hambatan R.

RUMUS HIDUP **Hukum Ohm**

$$I = \frac{V}{R}$$

Arus = tegangan dibagi hambatan. Dorongan makin kuat, arus makin deras. Jalan makin sempit, arus makin kecil.

V Beda potensial V | R Hambatan Ω | I Arus A

ARUS
0,5
A

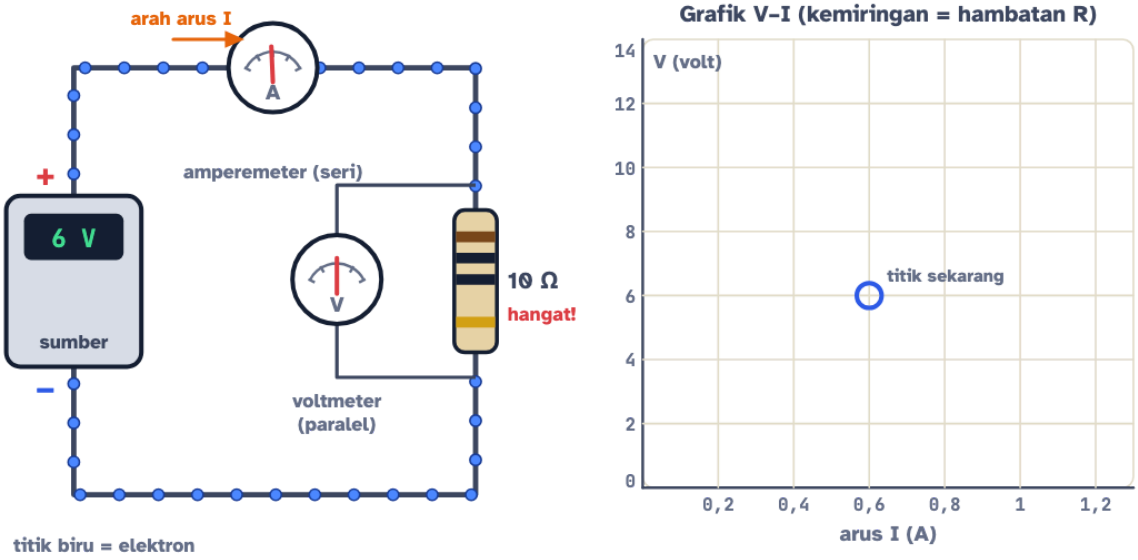
Tegangan **6** V mendorong muatan melewati hambatan **12** Ω, sehingga arusnya **0,5** A. Gandakan tegangannya: arusnya ikut berlipat dua!

Cek satuan: $\frac{\mathrm{V}}{\Omega} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{V/A}} = \mathrm{A}$

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

LAB MINI **Lab Ohm: gambar grafik V–I sendiri**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-23



Voltmeter	Amperemeter	R = V / I	Titik tercatat
6 V	0,6 A	10 Ω	0 titik

Pilih komponen, geser tegangan, lalu tekan **Catat titik** beberapa kali. Ulangi untuk **lampu pijar**. Grafik mana yang lurus (patuh hukum Ohm) dan mana yang melengkung? Mengapa?

Tidak semua komponen patuh hukum Ohm. Pada **lampu pijar**, filamen makin panas saat arusnya besar, ion-ionnya bergetar makin hebat, dan hambatannya naik hingga lebih dari sepuluh kali hambatan saat dingin. Grafik V–I-nya melengkung. Komponen seperti ini disebut **non-ohmik**. Dioda dan LED juga non-ohmik: mereka hanya mengalirkan arus ke satu arah (kamu akan bertemu lagi di Bab 32).

Apa yang menentukan hambatan sebuah kawat?

Kawat yang **panjang** menghambat lebih besar (jalan yang lebih jauh, tumbukan lebih banyak). Kawat yang **tebal** menghambat lebih kecil (lajurnya lebih banyak, seperti jalan tol bertingkat). **Bahannya** juga menentukan, lewat besaran **hambatan jenis** ρ (rho).

RUMUS HIDUP **Hambatan kawat**

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Hambatan = hambatan jenis bahan × panjang ÷ luas penampang. Panjang menambah, tebal mengurangi.

ρ Hambatan jenis nΩ m

L Panjang kawat m

A Luas penampang mm²

R Hambatan kawat Ω

HAMBATAN KAWAT

0,113

Ω

Kawat sepanjang **10** m dengan penampang **1,5** mm² dan hambatan jenis **17** nΩ m memiliki hambatan **0,113** Ω.

Cek satuan: $\frac{\Omega\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{m}^2} = \Omega$. Ingat ubah mm² ke m²: $1\,\mathrm{mm}^2 = 10^{-6}\,\mathrm{m}^2$.

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

Bahan	Hambatan jenis ρ (Ω m, ±20 °C)	Dipakai untuk
Perak	$1{,}6 \times 10^{-8}$	kontak saklar mahal, sirkuit khusus
Tembaga	$1{,}7 \times 10^{-8}$	kabel rumah, kumparan motor
Aluminium	$2{,}7 \times 10^{-8}$	kabel transmisi PLN (ringan!)
Besi	$1{,}0 \times 10^{-7}$	jarang untuk kabel
Nikrom	$1{,}1 \times 10^{-6}$	elemen setrika, solder, pemanas air
Karbon (grafit)	$\pm 10^{-5}$	resistor karbon, isi pensil
Kaca, karet	10^{10} – 10^{15}	isolator: pembungkus kabel, isolator tiang listrik

Suhu juga berpengaruh. Pada logam, hambatan naik kira-kira sebanding dengan kenaikan suhu: $R = R_0\,(1 + \alpha\,\Delta T)$, dengan $\alpha \approx 0{,}004$ per °C untuk tembaga. Sebaliknya, hambatan semikonduktor seperti **termistor NTC** justru turun saat dipanaskan, sehingga cocok sebagai sensor suhu. Pada suhu sangat rendah, beberapa bahan menjadi **superkonduktor** dengan hambatan tepat nol!

✏️ **TRIK KAK NARA: KODE WARNA RESISTOR**

Gelang warna pada resistor karbon mewakili angka 0–9: **Hi**tam 0, **Co**kelat 1, **Me**rah 2, **O**ranye 3, **Ku**ning 4, **Hi**jau 5, **Bi**ru 6, **U**ngu 7, **A**bu-abu 8, **Pu**tih 9. Hafalkan sebagai "**HiCo MeO KuHi BiU APu**". Gelang 1 dan 2 adalah angka, gelang 3 adalah banyaknya nol. Kuning-ungu-merah berarti 4-7-00 = 4.700 Ω. Gelang emas berarti toleransi ±5%.

🕰️ **TAMU DARI MASA LALU**

Georg Simon Ohm, guru sekolah di Jerman, menerbitkan hukumnya pada 1827 setelah bertahun-tahun mengukur arus dengan kawat buatannya sendiri. Awalnya karyanya dicemooh sebagai "khayalan" dan ia sempat kehilangan pekerjaan. Belasan tahun kemudian barulah karyanya diakui, dan ia menerima Medali Copley dari Royal Society London. Kini namanya abadi sebagai satuan hambatan.

CONTOH **Lampu senter**

Senter memakai dua baterai 1,5 V yang disusun seri. Lampunya berhambatan 6 Ω. Berapa arus yang mengalir? (Anggap hambatan dalam baterai sangat kecil.)

1. Dua sel seri: $V = 1{,}5 + 1{,}5 = 3$ V.
2. Hukum Ohm: $I = \dfrac{V}{R} = \dfrac{3}{6} = 0{,}5$ A.

Arusnya 0,5 A. Artinya, setiap detik 0,5 coulomb muatan melewati filamen lampu.

23.4 Rangkaian seri dan paralel

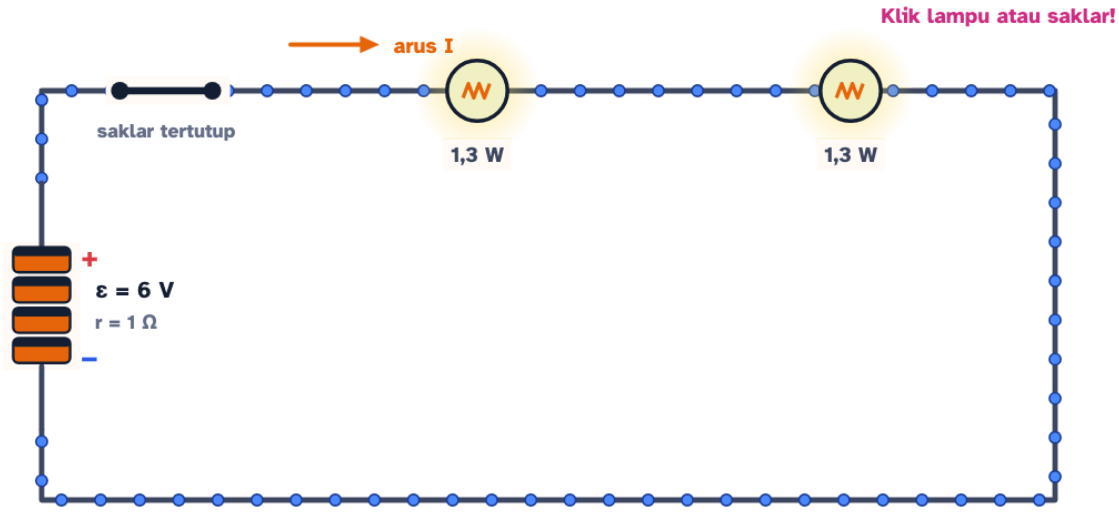
Lampu hias murah yang dililitkan di pohon saat Lebaran atau Natal sering punya "penyakit": satu lampu putus, *seluruh* untaian padam. Lampu di rumahmu tidak begitu. Kalau lampu kamar mandi putus, lampu ruang tamu tetap menyala. Bedanya ada pada cara lampu disusun.

	Rangkaian seri	Rangkaian paralel
Bentuk	berderet dalam satu jalur, seperti gerbong kereta	bercabang, tiap komponen punya jalur sendiri, seperti lajur jalan tol
Arus	**sama** di semua komponen	**terbagi**: $I = I_1 + I_2 + \ldots$

Tegangan	**terbagi**: $V = V_1 + V_2 + \ldots$	**sama** di semua cabang
Hambatan pengganti	$R_s = R_1 + R_2 + \ldots$ (makin besar)	$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots$ (makin kecil)
Satu komponen putus	semua padam	yang lain tetap bekerja
Contoh	lampu hias murah, saklar dengan lampunya, sekering	instalasi rumah, lampu jalan, stop kontak

LAB MINI **Pembangun rangkaian: seri, paralel, atau campuran?**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-23



SERI: satu jalur, arus sama di semua lampu

Hambatan luar	Arus dari baterai	Tegangan jepit	Daya tiap lampu
12 Ω	0,46 A	5,54 V	1,3 W · 1,3 W

Klik **lampu** untuk melepas atau memasangnya, dan klik **saklar** untuk membuka atau menutupnya. Bandingkan nyala lampu saat jumlah lampu ditambah pada rangkaian seri dan paralel. Hati-hati: lampunya bertuliskan 6 V / 6 W. Kalau tegangannya berlebihan, filamennya bisa putus! Titik biru adalah elektron.

RUMUS HIDUP **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.

R_1 Hambatan cabang 1 Ω

R_2 Hambatan cabang 2 Ω

R_p Hambatan pengganti Ω

HAMBATAN PENGGANTI

2

Ω

6 Ω paralel **3** Ω setara dengan satu hambatan **2** Ω. Membuka cabang baru selalu memudahkan arus, seperti menambah lajur jalan tol.

Cek satuan: $\frac{\Omega \cdot \Omega}{\Omega} = \Omega$. Kasus khusus: dua hambatan sama besar R paralel memberi $R/2$.

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

✏️ **TRIK KAK NARA: CEK KEWAJARAN PARALEL**

Hambatan pengganti paralel **selalu lebih kecil** daripada hambatan terkecil di cabang-cabangnya. Kalau hasil hitunganmu lebih besar, pasti ada yang salah! Untuk n hambatan identik R: seri menjadi nR, paralel menjadi R/n.

⚠️ **AWAS JEBAKAN: ARUS TIDAK "HABIS"**

Banyak orang mengira arus "terpakai" oleh lampu pertama, sehingga lampu terakhir pada rangkaian seri mendapat arus lebih kecil. Salah! Muatan tidak bisa hilang, jadi arus yang masuk ke lampu **sama** dengan arus yang keluar. Yang "terpakai" adalah **energi** tiap coulomb: tegangannya turun setiap melewati lampu.

KERJAKAN BERSAMA **Rangkaian campuran**

Hambatan 6 Ω dan 3 Ω disusun paralel. Susunan itu lalu dihubungkan seri dengan hambatan 4 Ω, dan semuanya dipasang pada baterai 12 V (hambatan dalam diabaikan). Tentukan arus total dan arus di hambatan 6 Ω.

1. Bagian paralel: $R_p = \dfrac{6 \times 3}{6 + 3} = 2\ \Omega$.
2. Ditambah seri 4 Ω: $R_{\text{total}} = 2 + 4 = 6\ \Omega$.
3. Arus total: $I = \dfrac{12}{6} = 2$ A. Arus ini melewati hambatan 4 Ω.
4. Tegangan pada bagian paralel: $V_p = IR_p = 2 \times 2 = 4$ V.
5. Arus di 6 Ω: $I_6 = 4/6 \approx 0{,}67$ A. (Cek: di 3 Ω mengalir $4/3 \approx 1{,}33$ A, dan $0{,}67 + 1{,}33 = 2$ A. ✓)

Arus total 2 A. Hambatan 6 Ω hanya kebagian ±0,67 A. Arus lebih suka jalur yang hambatannya kecil, tetapi tetap mengalir di semua cabang.

LANJUT · OLIMPIADE

JEMBATAN WHEATSTONE DAN TRIK SIMETRI

Empat hambatan P, Q, R, S disusun seperti belah ketupat, dengan galvanometer di "jembatan" tengahnya. Jika $P/Q = R/S$, kedua ujung jembatan sama potensialnya sehingga **tidak ada arus** lewat galvanometer, dan hambatan di jembatan boleh dihapus dari hitungan. Prinsip ini dipakai *jembatan meter* di laboratorium untuk mengukur hambatan yang tidak diketahui. Trik serupa: titik-titik yang simetris dalam rangkaian berpotensial sama dan boleh "disambung" atau "dipisah". Dengan trik ini, hambatan antara dua pojok berseberangan pada kubus 12 resistor R bisa dihitung tanpa Kirchhoff: hasilnya $\frac{5}{6}R$.

MITOS

"Lampu terakhir pada rangkaian seri paling redup karena arusnya sudah dipakai lampu-lampu sebelumnya."

FAKTA

Pada rangkaian seri arusnya **sama** di semua titik. Lampu identik menyala sama terang. Muatan tidak habis. Yang berkurang di tiap lampu adalah energi per coulomb (tegangan).

MITOS

"Burung tidak tersengat di kabel listrik karena kakinya bersisik dan kebal listrik."

FAKTA

Kedua kaki burung bertengger di kabel yang **sama**, jadi beda potensial di antara kakinya hampir nol, sehingga arus hampir tidak mengalir lewat tubuhnya. Jika sayapnya menyentuh kabel lain atau tiang, burung itu bisa tersengat.

23.5 Hukum Kirchhoff: aturan simpang dan aturan putaran

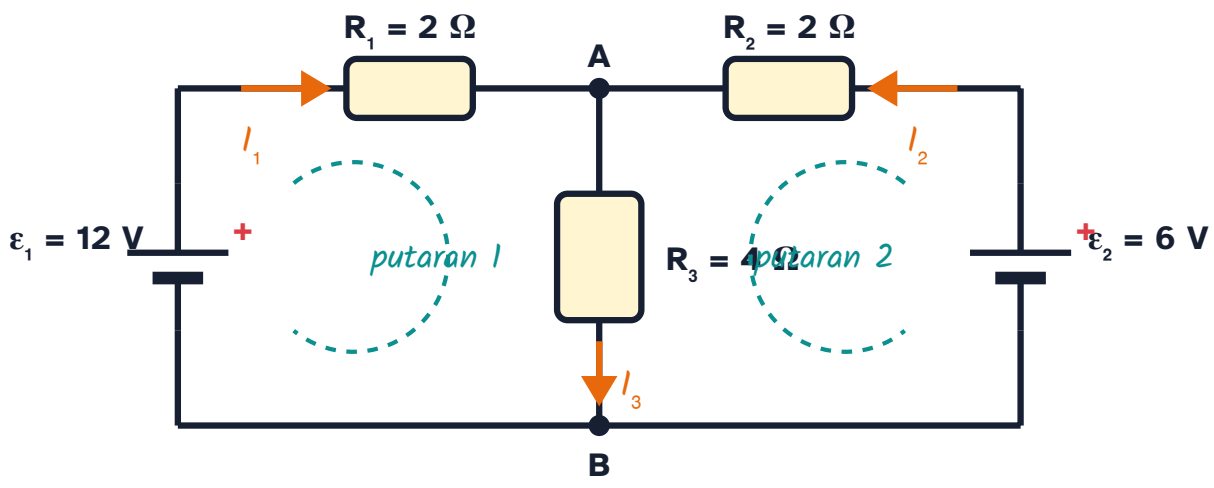
Beberapa rangkaian tidak bisa disederhanakan menjadi seri dan paralel, misalnya rangkaian dengan dua baterai di cabang yang berbeda. Untuk itu kita punya dua aturan sakti dari Gustav Kirchhoff.

Hukum I Kirchhoff (aturan simpang). Jumlah arus yang masuk ke sebuah titik cabang sama dengan jumlah arus yang keluar: $\Sigma I_{\text{masuk}} = \Sigma I_{\text{keluar}}$.

Bayangkan perempatan jalan: banyaknya motor yang masuk perempatan per menit sama dengan yang keluar, karena motor tidak menghilang di tengah jalan. Hukum ini adalah **kekekalan muatan**.

Hukum II Kirchhoff (aturan putaran). Dalam satu putaran tertutup, jumlah GGL sama dengan jumlah penurunan tegangan: $\Sigma \varepsilon = \Sigma IR$.

Bayangkan mendaki dan menuruni bukit lalu kembali ke titik awal: total perubahan ketinggianmu nol. Muatan yang mengelilingi satu putaran juga kembali ke potensial semula. Hukum ini adalah **kekekalan energi**.



Dua baterai menghidupi satu hambatan bersama R_3. Arus I_1 dan I_2 bertemu di titik A, lalu bersama-sama turun lewat R_3. Ujung baterai yang garisnya panjang adalah kutub positif (+).

COBA SENDIRI **Dua baterai, satu hambatan**

Pada gambar di atas, hitung I_1, I_2, dan I_3. Apa yang sebenarnya terjadi pada baterai 6 V?

1. Aturan simpang di titik A: $I_3 = I_1 + I_2$.
2. Putaran 1 (ε_1, R_1, R_3): $12 = 2I_1 + 4I_3$, jadi $I_1 = 6 - 2I_3$.
3. Putaran 2 (ε_2, R_2, R_3): $6 = 2I_2 + 4I_3$, jadi $I_2 = 3 - 2I_3$.
4. Substitusikan ke aturan simpang: $I_3 = (6 - 2I_3) + (3 - 2I_3)$ → $5I_3 = 9$ → $I_3 = 1{,}8$ A.
5. Maka $I_1 = 6 - 3{,}6 = 2{,}4$ A dan $I_2 = 3 - 3{,}6 = -0{,}6$ A.

$I_1 = 2{,}4$ A, $I_3 = 1{,}8$ A, dan $I_2 = -0{,}6$ A. Tanda minus berarti arus di cabang kanan mengalir berlawanan dengan tebakan kita: arus 0,6 A masuk ke kutub positif baterai 6 V. Baterai 6 V justru sedang diisi oleh baterai 12 V! Inilah prinsip mengecas aki dengan aki lain ("jumper").

TAMU DARI MASA LALU

Gustav Kirchhoff merumuskan kedua hukumnya pada 1845 ketika masih menjadi mahasiswa berusia 21 tahun di Königsberg (Prusia). Belakangan ia juga ikut menemukan cara "membaca" unsur kimia dari spektrum cahaya. Spektroskopi ini memungkinkan kita mengetahui isi Matahari tanpa pernah ke sana (lihat Bab 29).

LANJUT · IB & OLIMPIADE

MENGUBAH GALVANOMETER MENJADI AMPEREMETER DAN VOLTMETER

Galvanometer sangat peka. Misalnya jarumnya penuh pada arus $I_g = 1$ mA, dan hambatan kumparannya $R_g = 50\ \Omega$. Agar bisa mengukur sampai 1 A, pasang **hambatan shunt** kecil secara paralel supaya sebagian besar arus "melipir": $R_{\text{sh}} = \dfrac{I_g R_g}{I - I_g} = \dfrac{0{,}001 \times 50}{0{,}999} \approx 0{,}05\ \Omega$. Agar bisa mengukur sampai 10 V, pasang **hambatan depan** besar secara seri: $R_d = \dfrac{V}{I_g} - R_g = 10\,000 - 50 = 9\,950\ \Omega$. Itulah sebabnya amperemeter berhambatan kecil dan voltmeter berhambatan besar. Potensiometer bekerja dengan prinsip "nol arus" yang mirip jembatan Wheatstone, sehingga bisa mengukur GGL tanpa mengambil arus dari sel.

23.6 Energi, daya, dan token listrik

Setiap coulomb yang melewati beda potensial V melepaskan energi V joule. Jika dalam waktu t mengalir muatan $Q = It$, energi listrik yang berubah menjadi cahaya, kalor, gerak, atau bunyi adalah $W = VQ = VIt$. **Daya listrik** adalah energi per detik:

$$P = \frac{W}{t} = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

Satuan daya adalah **watt** (W) = joule per detik. Angka daya tertulis di label setiap alat: lampu LED 9 W, kipas angin 40 W, setrika 350 W. Label itu berlaku pada tegangan yang tertulis di sampingnya, biasanya 220 V.

RUMUS HIDUP **Daya listrik**

$$P = V\,I$$

Daya = tegangan × arus. Energi per coulomb dikali banyaknya coulomb per detik = energi per detik.

V Tegangan V | I Arus A | P Daya W

DAYA
352
W

Alat yang bekerja pada **220** V dengan arus **1,6** A memakai daya **352** W, yaitu **352** joule setiap detik.

Satuan Nusantara: ≈ 88% dari rice cooker saat memasak · ≈ 6% dari mesin motor bebek · ≈ 35 × lampu LED

Cek satuan: $\mathrm{V}\cdot\mathrm{A} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}\cdot\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = \mathrm{W}$

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

Tebak Dulu!

Lampu pijar 100 W/220 V dan lampu pijar 40 W/220 V dirangkai seri, lalu dipasang pada 220 V. Lampu mana yang menyala lebih terang?

Lampu 100 W, karena dayanya lebih besar.

Sama terang, karena arusnya sama.

Lampu 40 W.

Keduanya tidak menyala sama sekali.

Lampu 40 W yang lebih terang! Angka watt hanya berlaku jika lampu dipasang sendirian pada 220 V. Dari $R = V^2/P$, lampu 40 W berhambatan $220^2/40 = 1\,210\ \Omega$, sedangkan lampu 100 W hanya 484 Ω. Pada rangkaian seri arusnya sama, jadi daya $P = I^2R$ lebih besar pada hambatan yang lebih besar. Hitungannya: $I = 220/1\,694 \approx 0{,}13$ A, sehingga lampu 40 W memakai ±20 W, sedangkan lampu 100 W hanya ±8 W. (Angka sebenarnya sedikit berbeda karena hambatan filamen berubah dengan suhu, tetapi kesimpulannya sama.)

kWh: satuan "belanja" listrik

Joule terlalu kecil untuk tagihan listrik. PLN memakai **kilowatt-jam** (kWh): energi yang dipakai alat 1.000 W selama 1 jam. $1\ \mathrm{kWh} = 1\,000\ \mathrm{W} \times 3\,600\ \mathrm{s} =$ **3,6 juta joule**. Inilah "barang" yang kamu beli saat membeli token.

$$\text{Energi (kWh)} = \frac{P\,(\mathrm{W}) \times t\,(\text{jam})}{1\,000}$$

$$\text{Biaya} = \text{Energi (kWh)} \times \text{tarif per kWh}$$

RUMUS HIDUP **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.

- P Daya alat W
- t Lama pemakaian per hari jam
- n Jumlah hari hari
- tarif Tarif per kWh (contoh) Rp/kWh
- Biaya Biaya rupiah

BIAYA

78.300

rupiah

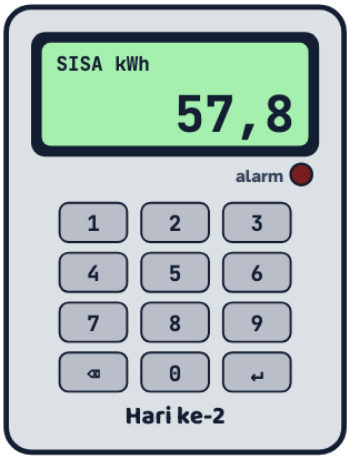
Alat **300** W yang menyala **6** jam sehari selama **30** hari memakai energi **300**×**6**×**30**/1000 kWh. Dengan contoh tarif Rp**1.450**/kWh, biayanya ±Rp**78.300**.

Cek satuan: $\mathrm{kW} \times \mathrm{jam} = \mathrm{kWh}$, lalu $\mathrm{kWh} \times \frac{\mathrm{Rp}}{\mathrm{kWh}} = \mathrm{Rp}$

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

LAB MINI Kalkulator token: berapa lama tokenmu bertahan?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-23



token Rp100.000 ≈ 69 kWh
(abaikan pajak & biaya admin)

Pemakaian per bulan (30 hari)

Lampu		11,3 kWh · Rp16.400
Kipas		9,6 kWh · Rp13.900
TV		9 kWh · Rp13.100
Kulkas		36 kWh · Rp52.200
Rice cooker		13,5 kWh · Rp19.600
Setrika		5,3 kWh · Rp7.600
AC		mati
Komputer		27 kWh · Rp39.200

Total: 3,72 kWh/hari → 111,7 kWh/bulan

Biaya ±Rp162.000 per bulan (contoh tarif Rp1.450/kWh)

Token Rp100.000 habis dalam ±18,5 hari

Energi per hari	Energi per bulan (30 hari)	Biaya per bulan	Token habis dalam
3,72 kWh	111,7 kWh	Rp162.000	±18,5 hari

Atur lama pemakaian tiap alat dalam sehari, pilih nominal token, lalu tekan ▶ **Jalankan** untuk melihat sisa kWh berkurang hari demi hari. Coba matikan "mode hangat" rice cooker atau kurangi jam main game. Berapa hari tokenmu bertambah awet? Tarif hanyalah contoh. Tarif sebenarnya mengikuti golongan tarif rumahmu.

KERJAKAN BERSAMA Main game semalaman

Komputer dan monitor Raka memakai daya total 300 W. Raka bermain 6 jam setiap hari selama 30 hari. Dengan contoh tarif Rp1.450/kWh, berapa biaya listrik untuk main game sebulan?

1. Energi per hari: $\frac{300 \times 6}{1\,000} = 1{,}8$ kWh.
2. Energi sebulan: $1{,}8 \times 30 = 54$ kWh.
3. Biaya: $54 \times 1\,450 = 78\,300$, jadi ±Rp78.300.

Sekitar Rp78.300 sebulan, hampir setara token Rp100.000! Mengurangi main game 2 jam sehari menghemat ±Rp26.100 per bulan.

FISIKA INDONESIA: TOKEN DAN LITERASI FINANSIAL

Jutaan rumah di Indonesia memakai **meteran prabayar**. Kamu membeli token, memasukkan 20 angkanya, dan meteran menambah "saldo" kWh. Saat saldo menipis, meteran berbunyi sebagai pengingat. Beberapa hal penting:

- Harga per kWh mengikuti **golongan tarif** (daya tersambung 450 VA, 900 VA, 1.300 VA, dan seterusnya). Sebagian golongan mendapat subsidi. Selalu cek tarif terbaru di struk atau aplikasi resmi PLN.
- kWh yang kamu terima sedikit lebih kecil daripada nominal ÷ tarif, karena ada **pajak daerah** untuk penerangan jalan (besarnya berbeda di tiap daerah) dan kadang biaya administrasi.
- Penghematan paling besar datang dari alat yang **dayanya besar** atau yang **menyala lama**: AC, setrika, pompa air, dan rice cooker yang dibiarkan dalam mode hangat seharian.

23.7 Instalasi listrik rumah dan keselamatan

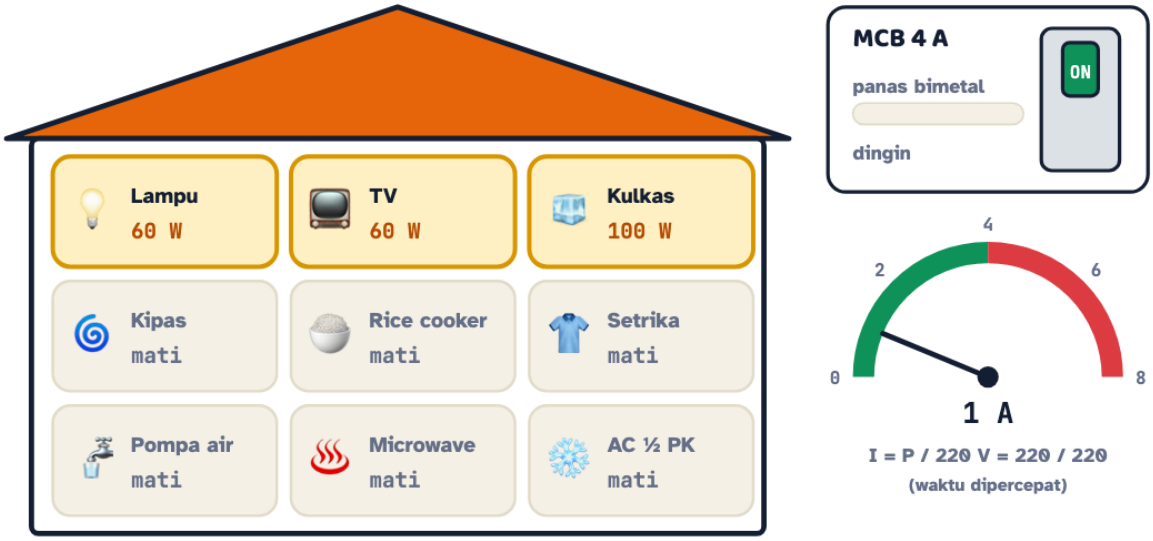
Listrik masuk ke rumahmu lewat kabel dari tiang PLN, lalu melewati **meteran kWh** dan **MCB** (pemutus arus mini). Dari sana, listrik dibagi ke cabang-cabang **paralel**: lampu, stop kontak, pompa air. Di dalam dinding ada tiga jenis kabel:

Kabel	Warna umum (PUIL)	Tugasnya
Fase (L)	cokelat (kadang hitam atau abu-abu)	membawa tegangan ±220 V terhadap tanah. **Inilah kabel yang berbahaya.** Saklar dan MCB dipasang di kabel ini.
Netral (N)	biru	jalur kembali arus, potensialnya dekat dengan tanah
Ground/arde (PE)	hijau-kuning	menghubungkan badan logam alat ke tanah. Dalam keadaan normal tidak dialiri arus.

MCB (*miniature circuit breaker*) adalah "satpam arus". Jika arus melebihi batas cukup lama (beban lebih), keping bimetal di dalamnya memanas dan melengkung sehingga saklarnya terlepas. Jika terjadi **korsleting** (hubung singkat) dengan arus sangat besar, kumparan magnet di dalamnya langsung menyentak saklar dalam sekejap. **Sekering** lama bekerja dengan cara lebih sederhana: kawat tipisnya meleleh. Batas MCB dari PLN disesuaikan dengan **daya tersambung**: 900 VA ≈ 4 A, 1.300 VA ≈ 6 A, 2.200 VA ≈ 10 A (karena $220\ \mathrm{V} \times 6\ \mathrm{A} \approx 1\,300\ \mathrm{VA}$).

LAB MINI Njeglek! Uji batas MCB rumahmu

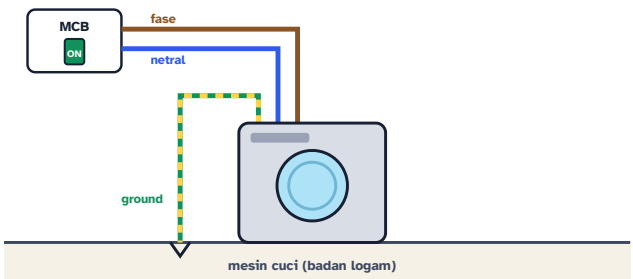
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-23



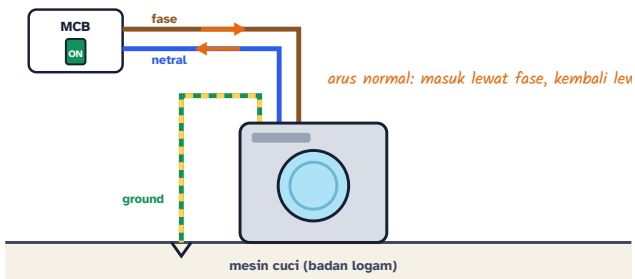
Daya total	Arus total	Batas MCB	Status
220 W	1 A	4 A	Aman

Nyalakan alat-alat satu per satu dan perhatikan jarum arus serta "panas bimetal" MCB. Pada daya 900 VA, bisakah setrika, rice cooker, dan pompa air menyala bersamaan? Tekan ⚡ **Korsleting** untuk melihat pemutus magnetik bekerja seketika, lalu ▲ **Naikkan MCB** untuk menyalakan kembali.

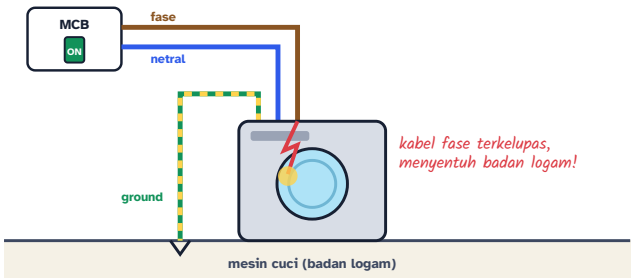
Kabel ground: penyelamat yang sering diremehkan



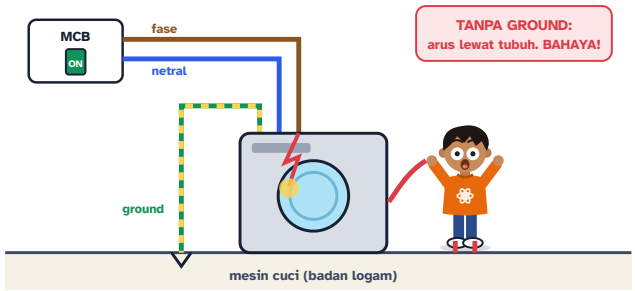
Langkah 1. Mesin cuci terhubung ke tiga kabel: **fase** (cokelat) membawa ±220 V, **netral** (biru) sebagai jalur kembali, dan **ground** (hijau-kuning) yang disambungkan ke badan logam mesin dan ke tanah.



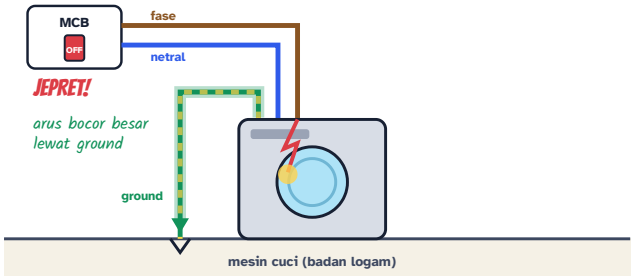
Langkah 2. Keadaan normal: arus masuk lewat kabel fase, memutar motor, lalu kembali lewat netral. Kabel ground tidak dialiri arus.



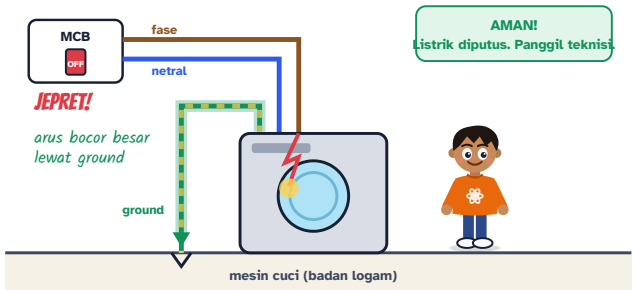
Langkah 3. Kerusakan: isolasi kabel fase di dalam mesin terkelupas dan menyentuh badan logam. Sekarang badan mesin ikut bertegangan.



Langkah 4. Tanpa ground, badan mesin bertegangan ±220 V terhadap lantai. Saat Raka menyentuhnya, arus mengalir lewat tubuhnya ke tanah. Ini bisa mematikan!



Langkah 5. Dengan ground, arus bocor mengalir lewat kabel ground yang hambatannya sangat kecil. Arusnya sangat besar sehingga MCB (atau ELCB) memutus listrik dalam sekejap.



Langkah 6. Listrik padam dan badan mesin tidak bertegangan lagi. Raka aman. Mesin rusak harus diperbaiki teknisi sebelum dipakai lagi.

⚠️ ATURAN AMAN LISTRIK (WAJIB HAFAL!)

- **Jangan menumpuk steker** (colokan T bertingkat). Arus total semua alat lewat satu stop kontak dan kabel yang sama, sehingga kabel bisa sangat panas dan memicu kebakaran.
- Jangan menyentuh saklar, steker, atau alat listrik dengan **tangan atau kaki basah**. Kulit basah menurunkan hambatan tubuh berkali-kali lipat.
- Saat **banjir** mulai masuk rumah, matikan MCB lebih dulu dan jangan menyalakan alat yang pernah terendam sebelum diperiksa.
- Matikan MCB sebelum memperbaiki atau mengganti fiting lampu. Cabut steker dengan memegang kepalanya, jangan menarik kabelnya.
- Jika ada orang tersengat, **jangan langsung memegangnya**. Matikan MCB dulu, atau dorong kabelnya menjauh dengan benda kering yang tidak menghantar listrik (kayu kering, plastik). Lalu segera minta bantuan orang dewasa.
- Alat berbadan logam yang dekat air (mesin cuci, pompa air, pemanas air) harus memakai stop kontak **dengan arde**. Pengaman arus bocor (ELCB/RCCB) memutus listrik bila ada arus bocor sekitar 30 mA.

MITOS

"Tegangan rendah pasti aman dan tegangan tinggi pasti mematikan."

FAKTA

Yang melukai adalah **arus** lewat tubuh. Setruman karpet bisa ribuan volt tetapi muatannya amat sedikit, jadi tidak berbahaya. Listrik PLN 220 V bisa mematikan karena sanggup mengalirkan arus terus-menerus, apalagi saat kulit basah.

MITOS

"Charger atau TV yang tidak dipakai tetapi masih tercolok tidak memakai listrik sama sekali."

FAKTA

Alat dalam mode *standby* tetap memakai daya. Pada charger modern dayanya sangat kecil, tetapi TV, dekoder, dan komputer standby bisa memakai beberapa watt terus-menerus. Mencabutnya juga mengurangi risiko panas berlebih.

Lampu hias Lebaran & Natal

Untaian lampu murah dirangkai seri, jadi satu lampu putus membuat semua padam. Untaian yang lebih baik dirangkai paralel atau memakai pintasan otomatis di tiap lampu.

Rice cooker & setrika

Elemen pemanasnya dari nikrom yang hambatan jenisnya besar, sehingga energi listrik berubah menjadi kalor. Kabel tembaga ke alat itu sendiri tetap dingin karena hambatannya kecil.

Aki motor 12 V

Isinya enam sel 2 V yang disusun seri. Saat starter, arusnya besar sekali, sehingga tegangan jepit aki sempat turun karena hambatan dalam.

Stop kontak bertumpuk

Semua alat yang dicolok bersamaan menarik arus lewat satu kabel. Arus besar pada kabel tipis membuat kabel panas ($P = I^2R$). Ini salah satu penyebab kebakaran rumah.

Sepeda listrik & power bank

Puluhan sel litium disusun seri (supaya tegangannya tinggi) dan paralel (supaya kapasitasnya besar dan awet).

Lampu lalu lintas LED

Lampu LED memakai daya jauh lebih kecil daripada lampu pijar untuk terang yang sama, sehingga menghemat listrik kota dan bisa ditopang baterai saat listrik padam.

Cek Cepat

Muatan 120 C mengalir melalui sebuah kawat selama 1 menit. Kuat arusnya adalah...

- 2 A
- 120 A
- 0,5 A
- 7.200 A

Tiga lampu identik dirangkai paralel pada baterai ideal. Jika satu lampu dilepas, maka dua lampu lainnya...

- padam
- lebih redup
- lebih terang
- tetap sama terang

Setrika 350 W dipakai 2 jam setiap hari selama 30 hari. Energi yang dipakainya adalah...

700 kWh

21 kWh

2,1 kWh

21.000 kWh

Kunci Cek Cepat: 1. A · 2. D · 3. B

Tantangan Rumah: detektif watt

Bahan: buku catatan, senter HP, kalkulator. **Jangan membuka atau mengutak-atik kabel dan stop kontak!**

1. Bersama orang tua, cari **stiker label** di belakang atau bawah alat listrik di rumah (kipas, TV, rice cooker, kulkas, setrika, pompa air). Catat angka daya (W) dan tegangannya.
2. Perkirakan berapa jam setiap alat menyala dalam sehari.
3. Hitung kWh per hari tiap alat, lalu kWh sebulan. Urutkan dari yang paling "rakus".
4. Bandingkan totalnya dengan pemakaian token keluargamu dalam sebulan (tanyakan berapa kali dan berapa rupiah orang tuamu membeli token).

Pertanyaan: Alat mana yang paling boros? Apakah alat berdaya besar selalu yang paling boros, atau alat kecil yang menyala 24 jam bisa mengalahkannya? Usulkan dua cara hemat yang realistis untuk keluargamu.

RINGKASAN KILAT

Bab 23 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- menjelaskan **arus**, **beda potensial**, dan **GGL** dengan analogi yang tepat, lalu menghitung $I = Q/t$
- memakai **hukum Ohm** $V = IR$ dan **hambatan jenis** $R = \rho L/A$, termasuk pengaruh suhu
- menghitung hambatan pengganti **seri**, **paralel**, dan campuran, serta memecahkan rangkaian dengan **hukum Kirchhoff**
- menghitung **daya**, **energi (kWh)**, dan **biaya listrik** atau token PLN di rumahmu
- menjelaskan fungsi **MCB**, **sekering**, dan **kabel ground**, serta mempraktikkan aturan aman listrik

Istilah kunci

Arus listrik | arah arus konvensional | beda potensial | gaya gerak listrik (GGL) | hambatan dalam | hambatan listrik | non-ohmik | hambatan jenis | Daya listrik

Rumus penting

$$I = \frac{V}{R}$$

Hukum Ohm. Arus = tegangan dibagi hambatan. Dorongan makin kuat, arus makin deras. Jalan makin sempit, arus makin kecil.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Hambatan kawat. Hambatan = hambatan jenis bahan × panjang ÷ luas penampang. Panjang menambah, tebal mengurangi.

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Dua hambatan paralel. Untuk dua hambatan paralel: hasil kali dibagi hasil jumlah. Hasilnya selalu lebih kecil daripada hambatan yang terkecil.

$$P = V I$$

Daya listrik. Daya = tegangan × arus. Energi per coulomb dikali banyaknya coulomb per detik = energi per detik.

$$\text{Biaya} = \frac{P t n}{1000} \times \text{tarif}$$

Biaya listrik sebuah alat. Biaya = daya (kW) × jam per hari × jumlah hari × harga per kWh.

Jangan sampai terjebak

- Para ilmuwan abad ke-18 menetapkan arah arus dari kutub positif ke kutub negatif (lewat rangkaian luar), sebelum elektron ditemukan.
- Banyak orang mengira arus "terpakai" oleh lampu pertama, sehingga lampu terakhir pada rangkaian seri mendapat arus lebih kecil.
- Jangan menumpuk steker (colokan T bertingkat).

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=23

Teka-teki untuk Bab 24

Letakkan kompas di dekat seutas kabel, lalu sambungkan kabel itu ke baterai sebentar saja. Jarum kompas tiba-tiba berbelok! Padahal kabelnya dari tembaga, logam yang sama sekali tidak ditarik magnet. Dari mana "magnet" itu datang?

▼ Intip petunjuk

Bukan kabelnya yang bersifat magnet, melainkan **arus** di dalamnya. Muatan yang bergerak menciptakan medan magnet di sekelilingnya. Hans Christian Oersted menemukannya secara tak sengaja di depan mahasiswanya pada 1820. Kisah lengkapnya ada di Bab 24: Medan Magnet.

BAB 24 · LISTRIK & MAGNET

24 Medan Magnet: Kekuatan Tak Terlihat di Sekitar Arus

Jarum kompas tiba-tiba berbelok di dekat kabel. Burung bermigrasi ribuan kilometer tanpa peta. Kipas angin berputar tanpa disentuh. Semuanya diatur oleh satu hal yang tak terlihat: medan magnet.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menggambar **garis medan magnet** dan menjelaskan cara kerja **kompas** serta **magnet Bumi**;
- memakai **aturan tangan kanan** untuk arah medan di sekitar kawat berarus dan solenoid, lalu menghitung besarnya;
- menentukan arah dan besar **gaya Lorentz** pada kawat berarus dan pada muatan yang bergerak;
- menjelaskan lintasan **lingkaran** dan **heliks** partikel bermuatan, serta cara kerja **motor listrik DC**;
- membedakan bahan **feromagnetik**, **paramagnetik**, dan **diamagnetik**.

KOMPAS YANG BANDEL

KOMIK · 4 PANEL

24.1 Magnet dan garis medan

Setiap magnet punya dua **kutub**: kutub **utara** (U, *north*) dan kutub **selatan** (S, *south*). Aturannya mirip muatan listrik: kutub **sejenis tolak-menolak**, kutub **tak sejenis tarik-menarik**. Magnet menarik benda dari bahan **feromagnetik** seperti besi, nikel, kobalt, dan baja, bahkan tanpa menyentuhnya.

Daerah di sekitar magnet tempat gaya magnet masih terasa disebut **medan magnet**, diberi simbol B, dengan satuan **tesla** (T). Medan ini kita "lihat" lewat **garis medan**: taburkan serbuk besi di atas kertas yang menutupi magnet, ketuk-ketuk, lalu serbuk besi akan berbaris mengikuti garis medan.

- Di luar magnet, garis medan keluar dari kutub **U** dan masuk ke kutub **S**. Di dalam magnet, garis itu menyambung dari S ke U sehingga membentuk lingkaran tertutup.
- Arah medan di suatu titik = arah yang ditunjuk **ujung U jarum kompas** di titik itu.
- Garis medan **tidak pernah berpotongan**. Makin **rapat** garisnya, makin **kuat** medannya.

Bahasa sederhana · Gampangnya: magnet punya "daerah kekuasaan" tak terlihat yang disebut medan magnet. Kompas adalah magnet kecil yang selalu menunjuk mengikuti arah medan itu.

Tebak Dulu!

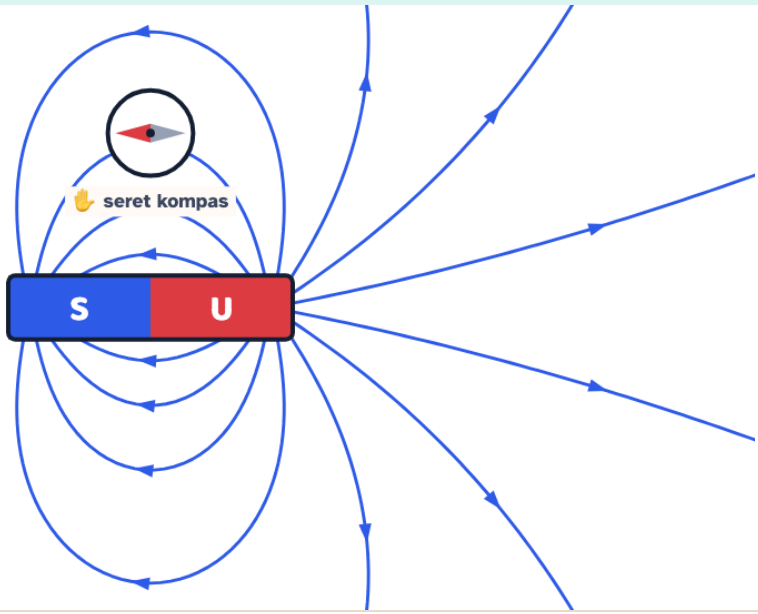
Sebuah magnet batang dipotong tepat di tengahnya, di antara kutub U dan kutub S. Apa yang kamu dapatkan?

- Satu potongan berisi kutub U saja dan satu potongan berisi kutub S saja.
- Dua magnet kecil, masing-masing punya kutub U dan kutub S.
- Dua potongan besi biasa yang tidak bermagnet lagi.
- Satu potongan masih bermagnet, potongan lainnya tidak.

Dua magnet kecil yang lengkap! Magnet tersusun dari jutaan "magnet mini" (domain) yang searah. Dipotong berapa kali pun, setiap potongan tetap punya kutub U dan S. Fisikawan belum pernah menemukan *monopol magnet* (kutub tunggal). Inilah beda besar antara magnet dan listrik: muatan positif bisa berdiri sendiri, kutub U tidak.

LAB MINI Peta medan: magnet batang dan kompas

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-24



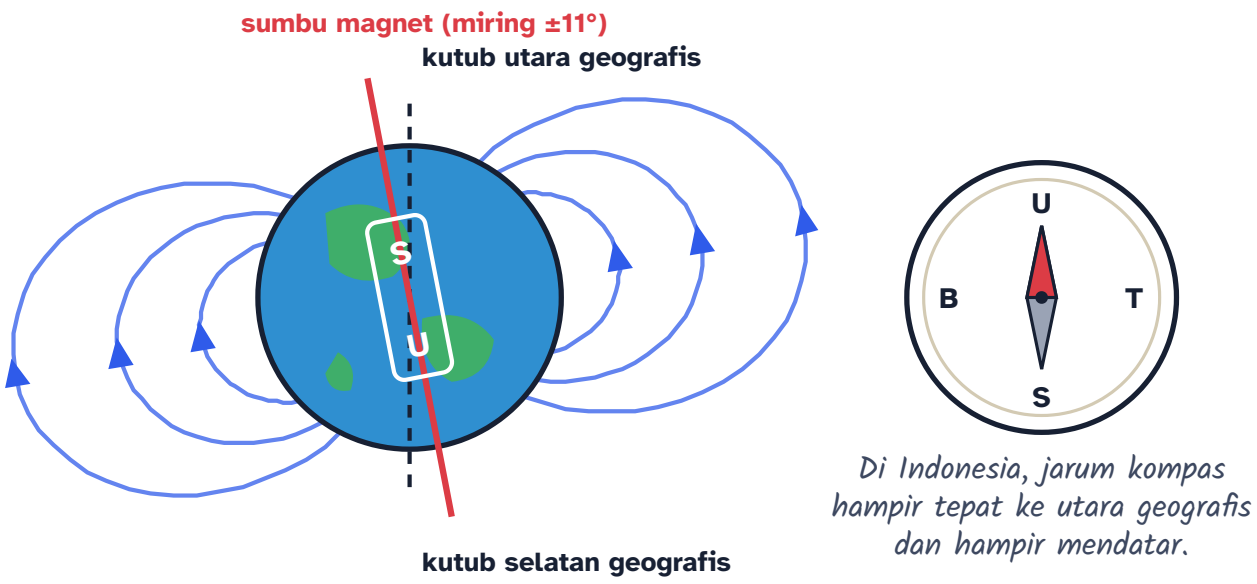
Arah jarum (sudut dari kanan)	Kuat medan (relatif)
180°	×1

Seret kompas ke mana saja dan lihat ujung merahnya (kutub U jarum) mengikuti garis medan. Pilih susunan "tarik-menarik" dan "tolak-menolak", lalu nyalakan **serbuk besi**. Di mana medannya paling rapat? Adakah titik tempat jarum kompas bingung (medannya nol)?

Sumber medan magnet	Kuat medan (kira-kira)
Medan magnet Bumi di Indonesia	±40 μT (0,00004 T)
Magnet hiasan kulkas	±5 mT
Kabel 10 A, pada jarak 5 cm	±40 μT
Magnet neodimium kecil (di permukaannya)	±0,5–1 T
Mesin MRI di rumah sakit	1,5–3 T
Magnetar (sejenis bintang neutron)	sampai 10^{10}–10^{11} T

24.2 Magnet Bumi dan kompas

Bumi sendiri adalah magnet raksasa. Arus besi cair yang berputar di inti luar Bumi menghasilkan medan magnet yang bentuknya mirip medan magnet batang (fisikawan menyebutnya *geodinamo*). Ada satu kejutan: karena ujung **U** jarum kompas menunjuk ke arah utara, kutub magnet Bumi di dekat kutub utara geografis sebenarnya adalah kutub **selatan** magnet!



Medan magnet Bumi mirip medan "magnet batang raksasa" di dalam Bumi yang miring sekitar 11° dari sumbu putar. Garis medan keluar dari belahan Bumi selatan dan masuk ke belahan utara.

Ada dua sudut penting bagi penjelajah:

- **Deklinasi**: sudut antara arah utara kompas dan utara geografis yang sebenarnya. Di Indonesia sudut ini kecil (umumnya hanya beberapa derajat), tetapi di dekat kutub bisa puluhan derajat.
- **Inklinasi** (sudut dip): sudut antara medan magnet Bumi dan bidang mendatar. Di kutub magnet, jarum yang bebas berputar akan berdiri tegak (90°). Indonesia berada dekat **khatulistiwa magnet**, sehingga

inklinasinya relatif kecil dan jarum hampir mendatar.

FISIKA INDONESIA: DARI PASIR BESI SAMPAI OBSERVATORIUM MAGNET

Pasir hitam di beberapa pantai selatan Jawa, misalnya di Kulon Progo dan Lumajang, banyak mengandung mineral **magnetit**. Masukkan magnet ke kantong plastik, lalu celupkan ke pasir itu: butiran hitamnya menempel! Pasir besi ini bahkan ditambang sebagai bahan baku besi. Di Tangerang, BMKG mengoperasikan **observatorium magnet Bumi** yang merekam medan magnet setiap saat. Datanya dipakai untuk memantau badai magnet akibat letusan Matahari, yang bisa mengganggu satelit, GPS, dan jaringan listrik.

TAMU DARI MASA LALU

Pelaut Tiongkok sudah memakai jarum magnet untuk navigasi sekitar abad ke-11. Pada 1600, dokter Inggris William Gilbert menulis buku *De Magnete*. Ia membuat bola magnet kecil yang disebutnya *terrella* ("Bumi mini") dan menunjukkan bahwa jarum kompas di sekitarnya berperilaku persis seperti di Bumi. Kesimpulannya berani untuk zamannya: **Bumi sendiri adalah magnet raksasa**.

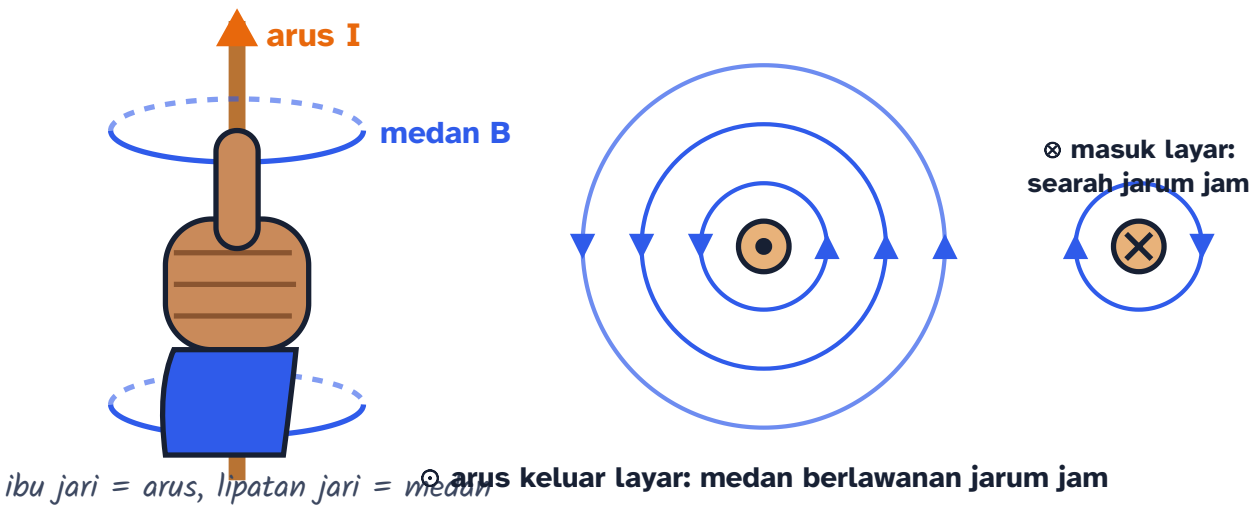
MENGAPA AURORA JARANG TERLIHAT DI INDONESIA?

Matahari terus menyemburkan partikel bermuatan (angin surya). Medan magnet Bumi membelokkan sebagian besar partikel itu, sehingga melindungi kita. Sebagian partikel "dialirkan" sepanjang garis medan ke daerah sekitar kutub dan menumbuk atmosfer, sehingga udara berpendar hijau dan merah: **aurora**. Indonesia jauh dari kutub magnet, jadi aurora hampir tidak pernah tampak di sini.

24.3 Medan magnet di sekitar arus listrik

Pada 1820, saat mengajar, Hans Christian Oersted melihat jarum kompas di mejanya bergerak setiap kali ia menyambungkan kawat ke baterai. Itulah bukti pertama bahwa **listrik dan magnet bersaudara**: **arus listrik menghasilkan medan magnet**.

Di sekitar kawat lurus panjang, garis medan magnet berbentuk **lingkaran-lingkaran sepusat** yang mengelilingi kawat. Arahnya ditentukan dengan **aturan genggaman tangan kanan**: genggam kawat dengan tangan kanan, arahkan **ibu jari searah arus**, maka **lipatan keempat jari** menunjukkan arah putaran medan magnet.



Kiri: aturan genggaman tangan kanan. Kanan: kawat dilihat dari ujungnya. Simbol ⊙ berarti arus keluar dari layar menuju kamu (seperti melihat ujung panah), dan ⊗ berarti arus masuk ke layar (seperti melihat ekor panah).

Kuat medan di sekitar kawat lurus panjang sebanding dengan arus dan berbanding terbalik dengan jarak:

RUMUS HIDUP **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.

- I Arus dalam kawat A
- a Jarak dari kawat cm
- B Kuat medan magnet μT

KUAT MEDAN MAGNET
40
μT

Arus **10** A pada jarak **5** cm menghasilkan medan **40** μT. Medan magnet Bumi di Indonesia ±40 μT. Jika medan kawat jauh lebih besar dari itu, kompas di dekatnya akan menunjuk mengikuti kawat, bukan ke utara.

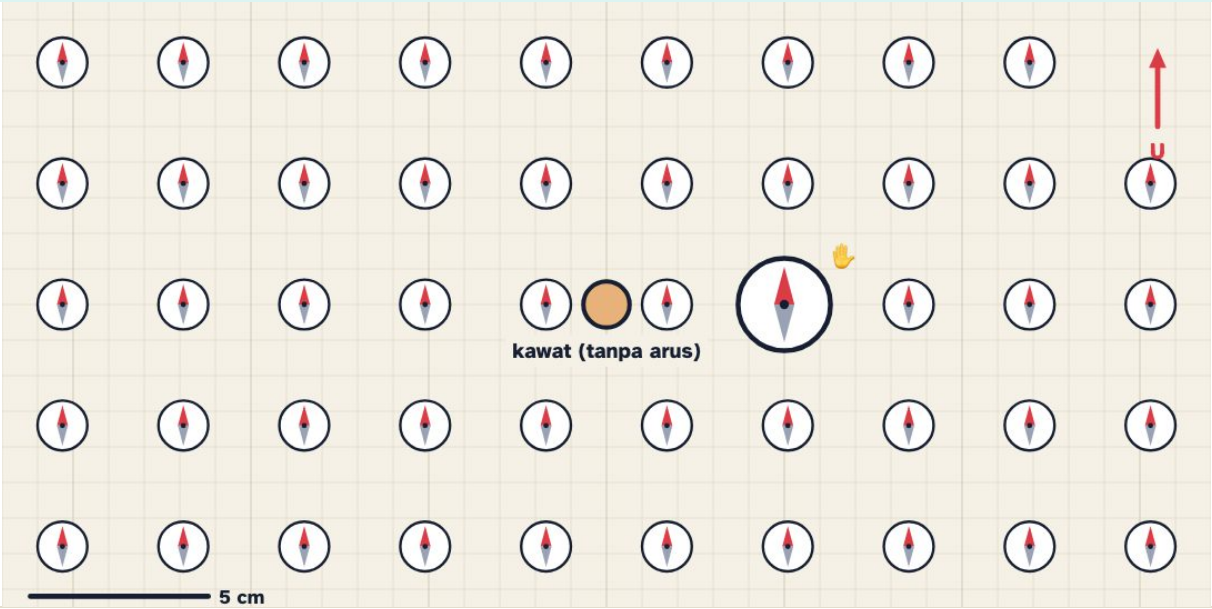
Cek satuan: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A}$, sehingga $\frac{\mathrm{T\,m/A \cdot A}}{\mathrm{m}} = \mathrm{T}$. Ingat: 1 μT = 0,000001 T.

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

LAB MINI

Percobaan Oersted: kompas di sekitar kawat berarus

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-24



Medan kawat di kompas besar	Jarak ke kawat	Jarum kompas besar
0 μT	5 cm	0° dari utara

Kawat tegak lurus layar berada di tengah. Geser arus dari nol ke besar, lalu balik arahnya. Mula-mula semua kompas menunjuk ke utara (medan Bumi). Pada arus berapa kompas di dekat kawat mulai membentuk lingkaran? Matikan medan Bumi untuk melihat medan kawat saja. **Seret kompas besar** untuk mengukur medan di titik mana pun.

AWAS JEBAKAN: ARAH GARIS MEDAN KAWAT

Garis medan di sekitar kawat lurus **tidak** berawal dan berakhir di kutub mana pun. Garis itu berupa lingkaran tertutup tanpa ujung. Dan medan magnet tidak mengarah *menjauhi* kawat seperti medan listrik muatan titik: arahnya **menyinggung** lingkaran, tegak lurus terhadap garis dari kawat.

Jika kawat dilengkungkan menjadi **lingkaran**, garis-garis medan dari setiap bagian kawat "berkumpul" di tengah lingkaran. Medan di pusat lingkaran berjari-jari R dengan N lilitan adalah $B = \dfrac{\mu_0 N I}{2R}$. Satu sisi lingkaran berlaku seperti kutub U, sisi lainnya kutub S.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM BIOT–SAVART DAN HUKUM AMPÈRE

Setiap potongan kawat kecil $\mathrm{d}l$ yang membawa arus I menyumbang medan $\mathrm{d}B = \dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{I\,\mathrm{d}l \times \hat{r}}{r^2}$ (hukum Biot–Savart). Jika diintegralkan sepanjang kawat lurus tak hingga, hasilnya $B = \mu_0 I/(2\pi a)$. Pada sumbu lingkaran berjari-jari R, sejauh x dari pusatnya: $B = \dfrac{\mu_0 I R^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}}$. Untuk bentuk yang simetris, **hukum Ampère** lebih cepat: $\oint B \cdot \mathrm{d}l = \mu_0 I_{\text{dilingkupi}}$. Pilih lintasan lingkaran di sekitar kawat, maka $B \cdot 2\pi a = \mu_0 I$, dan selesai dalam satu baris!

24.4 Solenoid dan elektromagnet

Gulung kawat menjadi kumparan panjang seperti per (pegas), lalu alirkan arus. Inilah **solenoid**. Medan dari setiap lilitan saling menguatkan di dalam kumparan, sehingga di dalamnya medan menjadi **kuat dan seragam**, sedangkan di luarnya mirip medan magnet batang. Ujung tempat garis medan keluar adalah kutub U.

TRIK KAK NARA: GENGGAMAN UNTUK KUMPARAN

Untuk kumparan, tukar peran jari: genggam kumparan dengan tangan kanan sehingga **keempat jari searah arus di lilitan**. Maka **ibu jari menunjuk kutub utara** (U) kumparan. Trik lain: lihat ujung kumparan. Jika arus berputar **berlawanan** arah jarum jam, ujung itu kutub **U**. Jika searah jarum jam, ujung itu kutub **S**.

RUMUS HIDUP **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.

- N Jumlah lilitan `lilitan`
- I Arus `A`
- L Panjang solenoid `cm`
- B Medan di dalam solenoid `mT`

MEDAN DI DALAM SOLENOID

6,28

mT

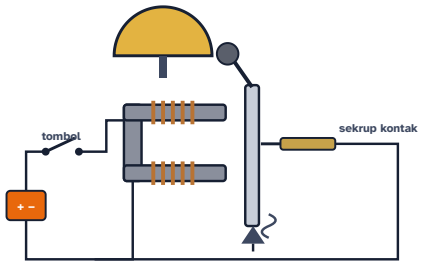
Solenoid **500** lilitan sepanjang **20** cm berarus **2** A menghasilkan medan **6,28** mT di dalamnya, ratusan kali medan magnet Bumi. Masukkan inti besi, maka medannya bisa ratusan hingga ribuan kali lebih kuat lagi!

Cek satuan: $\frac{\mathrm{T\,m/A \cdot A}}{\mathrm{m}} = \mathrm{T}$. Yang penting adalah kerapatan lilitan $n = N/L$ (lilitan per meter): $B = \mu_0 n I$.

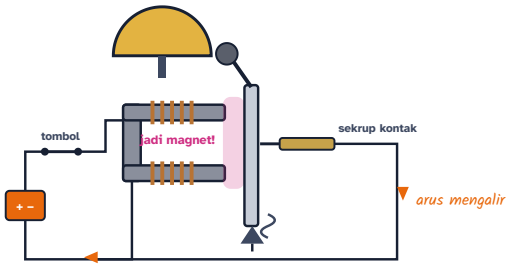
`RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-MAGNET-SOLENOID`

Masukkan **inti besi lunak** ke dalam solenoid, maka domain-domain magnet di dalam besi ikut searah dan medannya berlipat ratusan kali. Inilah **elektromagnet**: magnet yang bisa dinyalakan dan dimatikan dengan

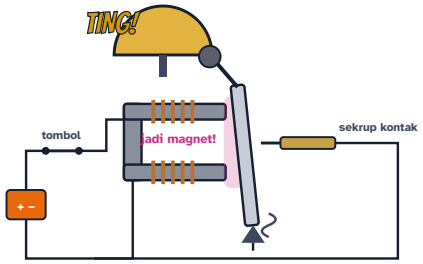
saklar. Kekuatannya bisa diatur lewat arus dan jumlah lilitan. Besi **lunak** dipakai karena kemagnetannya langsung hilang saat arus diputus. Baja akan tetap bermagnet.



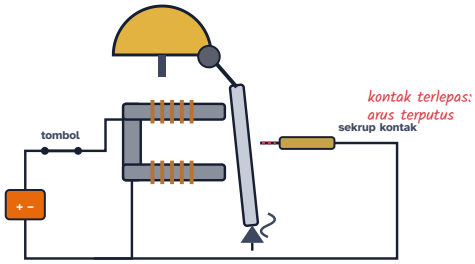
Langkah 1. Bel listrik sekolah terdiri atas **elektromagnet** (inti besi berbentuk U yang dililit kawat), **jangkar** besi lunak berpegas dengan pemukul di ujungnya, sebuah gong, dan **sekrup kontak**.



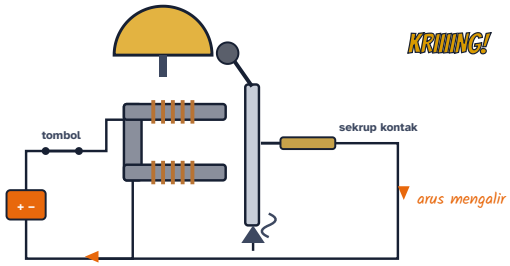
Langkah 2. Tombol ditekan: rangkaian tertutup, arus mengalir lewat kumparan, dan inti besi menjadi magnet.



Langkah 3. Elektromagnet menarik jangkar. Pemukul menghantam gong: **TING!**



Langkah 4. Tetapi saat jangkar tertarik, jangkar terlepas dari sekrup kontak. Rangkaian terputus, arus berhenti, dan elektromagnet kehilangan kemagnetannya.



Langkah 5. Pegas menarik jangkar kembali sampai menyentuh sekrup kontak. Arus mengalir lagi, dan siklus ini berulang puluhan kali per detik: **KRIIIING!**

Crane besi tua

Di tempat pengumpulan besi bekas dan pelabuhan, elektromagnet raksasa mengangkat berton-ton besi. Arus diputus, besinya jatuh di tempat yang diinginkan.

Bel sekolah

Elektromagnet menarik dan melepas jangkar puluhan kali per detik, sehingga pemukul menghantam gong berulang-ulang.

Relai

Elektromagnet kecil berarus lemah menyambung saklar berarus besar, misalnya pada pompa air otomatis dan lampu jalan bersensor.

MRI rumah sakit

Solenoid superkonduktor raksasa menghasilkan medan 1,5–3 T untuk "memotret" bagian dalam tubuh tanpa sinar-X.

24.5 Gaya Lorentz: magnet mendorong arus

Jika arus membuat medan magnet, maka magnet juga bisa **mendorong** arus. Kawat berarus yang berada di dalam medan magnet mengalami gaya yang disebut **gaya Lorentz**. Gaya ini paling besar jika kawat tegak lurus medan, dan nol jika kawat sejajar medan.

RUMUS HIDUP **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.

- B Kuat medan magnet T
- I Arus A
- L Panjang kawat dalam medan m
- θ Sudut kawat terhadap medan °
- F Gaya Lorentz N

GAYA LORENTZ
0,3
N

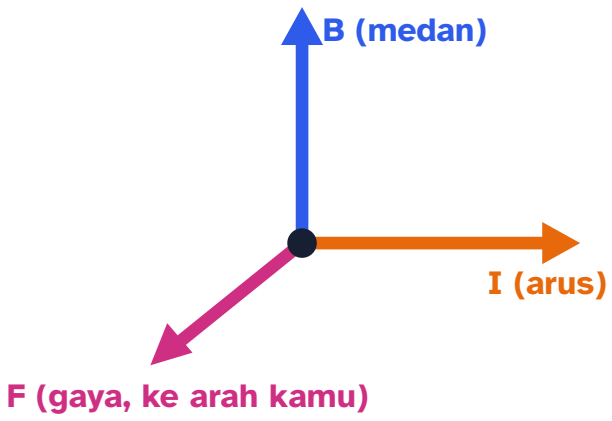
Kawat **0,3** m berarus **5** A dalam medan **0,2** T dengan sudut **90°** mengalami gaya **0,3** N. Coba ubah sudut ke 0°: gayanya lenyap!

Satuan Nusantara: ≈ 30% dari berat apel kecil (±100 g)

Cek satuan: $\mathrm{T}\cdot\mathrm{A}\cdot\mathrm{m} = \mathrm{N}$. Dari sinilah definisi tesla: $1\,\mathrm{T} = 1\,\mathrm{N}/(\mathrm{A}\,\mathrm{m})$.

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

Arah gaya tegak lurus terhadap arus *dan* terhadap medan. Ada dua cara populer untuk menentukannya, dan keduanya memberi jawaban yang sama:



Kaidah telapak tangan kanan

ibu jari = arah arus I
empat jari lurus = arah medan B
dorongan telapak tangan = arah gaya F

Kaidah tangan kiri Fleming (IGCSE)

telunjuk = medan (**F**ield)
jari tengah = arus (**C**urrent)
ibu jari = gerak/gaya (thu**M**b = **M**otion)

Arus ke kanan, medan ke atas, maka gaya mengarah keluar layar menuju kamu. Ketiganya selalu saling tegak lurus jika kawat tegak lurus medan.

Gaya pada muatan yang bergerak

Arus hanyalah muatan yang bergerak, jadi setiap muatan q yang melaju dengan kecepatan v di dalam medan B juga merasakan gaya Lorentz: $F = qvB\sin\theta$. Untuk muatan positif, ganti "arus" dengan "kecepatan" pada kaidah tangan. Untuk muatan negatif seperti elektron, arah gayanya **dibalik**.

Tebak Dulu!

Sebuah proton ditembakkan ke daerah bermedan magnet seragam, tegak lurus terhadap medannya. Bagaimana bentuk lintasannya di dalam medan?

- Garis lurus, karena magnet tidak memengaruhi proton.
- Parabola, seperti bola yang dilempar mendatar.
- Lingkaran, dengan kelajuan tetap.
- Spiral yang makin mengecil sampai proton berhenti.

Lingkaran! Gaya magnet selalu **tegak lurus** kecepatan, persis seperti tali yang menahan batu yang diputar. Gaya ini membelokkan arah gerak tanpa pernah mempercepat atau memperlambat, karena gaya tegak lurus tidak melakukan usaha. Hasilnya: gerak melingkar beraturan dengan jari-jari $r = \dfrac{mv}{qB}$. Bentuknya bukan parabola, karena pada lemparan bola arah gayanya (gravitasi) tetap, sedangkan di sini arah gayanya ikut berputar.

Samakan gaya Lorentz dengan gaya sentripetal: $qvB = \frac{mv^2}{r}$, sehingga

RUMUS HIDUP **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).

- m Massa partikel u
- v Kelajuan km/s
- q Muatan e
- B Kuat medan mT
- r Jari-jari lintasan cm

JARI-JARI LINTASAN

5,18

cm

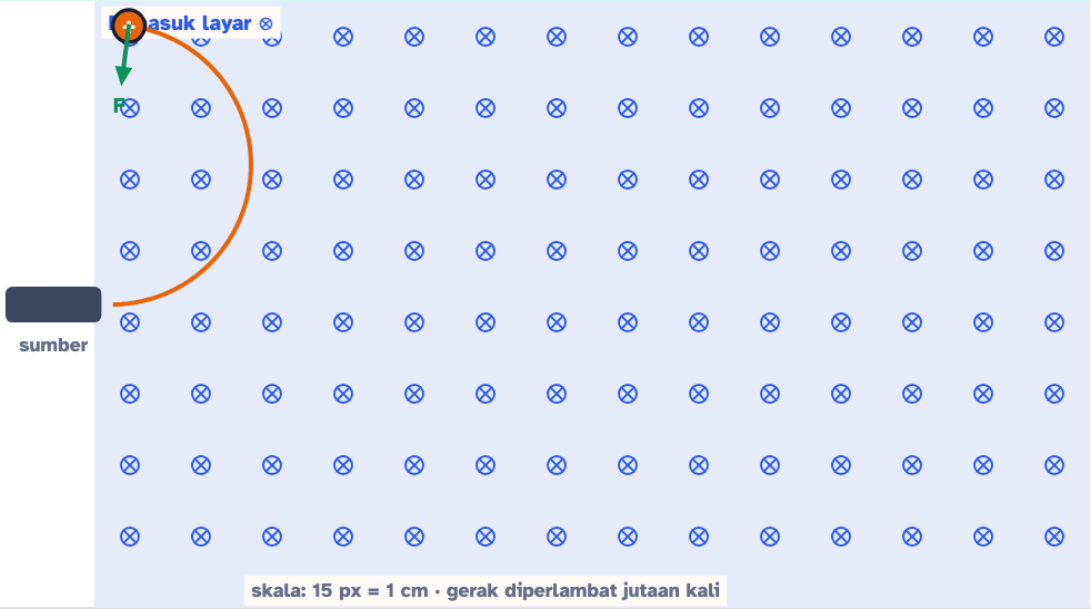
Partikel **1** u bermuatan **1**e yang melaju **500** km/s dalam medan **100** mT berputar dengan jari-jari **5,18** cm.

Cek satuan: $\frac{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m/s}}{\mathrm{C}\cdot\mathrm{T}} = \frac{\mathrm{kg\,m/s}}{\mathrm{C}\cdot\mathrm{N/(A\,m)}} = \mathrm{m}$, karena $\mathrm{C} = \mathrm{A\,s}$ dan $\mathrm{N} = \mathrm{kg\,m/s^2}$.

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

LAB MINI **Muatan dalam medan magnet: lingkaran, heliks, dan pemilih kecepatan**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-24



Jari-jari r = mv⊥/(qB)
5,22 cm

Periode T = 2πm/(qB)
$6{,}56 \times 10^{-7}$ s

Info
muatan +: berbelok ke kiri (berlawanan jarum jam)

Mode **lingkaran**: ubah kelajuan dan medan, lalu bandingkan proton, partikel alfa, dan elektron. Mode **heliks**: atur sudut antara kecepatan dan medan. Mode **pemilih kecepatan**: atur medan listrik E sampai partikel lolos lurus lewat celah. Berapa kelajuan yang lolos?

Jika kecepatan partikel membentuk sudut dengan medan, komponen yang sejajar medan tidak dibelokkan sama sekali, sedangkan komponen yang tegak lurus membuat partikel berputar. Gabungannya adalah lintasan **heliks** (spiral seperti per). Inilah cara medan magnet Bumi "menggiring" partikel angin surya ke daerah kutub.

CONTOH **Kawat di antara kutub magnet**

Kawat sepanjang 20 cm dialiri arus 3 A dan diletakkan tegak lurus medan magnet 0,5 T. Berapa gaya yang dialami kawat?

1. Ubah satuan: $L = 20$ cm $= 0{,}2$ m. Karena tegak lurus, $\sin 90^\circ = 1$.
2. $F = BIL = 0{,}5 \times 3 \times 0{,}2 = 0{,}3$ N.

Gayanya 0,3 N, kira-kira seberat sepertiga apel kecil. Inilah gaya yang memutar motor listrik.

KERJAKAN BERSAMA **Proton berputar**

Proton ($m = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg, $q = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C) melaju 2×10^6 m/s tegak lurus medan magnet 0,4 T. Tentukan jari-jari lintasan dan waktu satu putaran.

1. $r = \dfrac{mv}{qB} = \dfrac{1{,}67 \times 10^{-27} \times 2 \times 10^6}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 0{,}4} \approx 5{,}2 \times 10^{-2}$ m $\approx 5{,}2$ cm.

2. Periode: $T = \dfrac{2\pi r}{v} = \dfrac{2\pi m}{qB} = \dfrac{2\pi \times 1{,}67 \times 10^{-27}}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 0{,}4} \approx 1{,}6 \times 10^{-7}$ s.

Jari-jarinya ±5,2 cm, dan proton berputar ±6 juta kali per detik. Perhatikan bahwa $T = 2\pi m/(qB)$ tidak bergantung pada kelajuan. Rahasia ini dipakai mesin siklotron.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SIKLOTRON, PEMILIH KECEPATAN, DAN DUA KAWAT SEJAJAR

Pemilih kecepatan: jika partikel melewati medan listrik E dan medan magnet B yang saling tegak lurus, gaya listrik qE dan gaya magnet qvB saling meniadakan hanya untuk $v = E/B$. Partikel lain dibelokkan. **Siklotron:** partikel berputar dalam dua "D" berongga di dalam medan B, dan setiap setengah putaran dipercepat oleh tegangan bolak-balik di celahnya. Karena periodenya tetap, frekuensi tegangan cukup dibuat $f = \dfrac{qB}{2\pi m}$. **Dua kawat sejajar** berjarak d yang dialiri arus I_1 dan I_2 saling menarik (jika arusnya searah) atau menolak (jika berlawanan) dengan gaya per meter $\dfrac{F}{L} = \dfrac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$. Dulu, definisi resmi ampere memakai gaya ini.

TAMU DARI MASA LALU

Gaya ini dinamai menurut Hendrik Antoon Lorentz, fisikawan Belanda peraih Nobel Fisika 1902. Fakta unik dari Tarsi: Taman Nasional Lorentz di Papua, situs Warisan Dunia UNESCO, **tidak** dinamai menurut sang fisikawan, melainkan menurut Hendrikus Albertus Lorentz, penjelajah Belanda yang memimpin ekspedisi ke sana pada awal abad ke-20. Dua orang berbeda, sama-sama Belanda, sama-sama bernama Lorentz!

24.6 Motor listrik DC: gaya Lorentz yang berputar

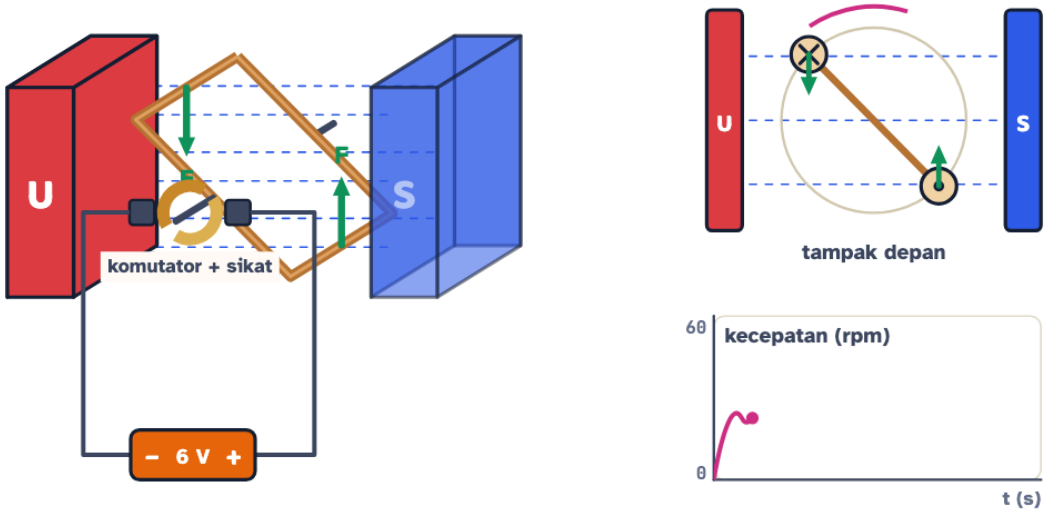
Letakkan kumparan persegi di antara kutub U dan S, lalu alirkan arus. Kedua sisi panjang kumparan membawa arus dengan arah **berlawanan**, sehingga gaya Lorentz-nya juga berlawanan: satu sisi didorong ke atas, sisi lain ke bawah. Pasangan gaya ini membuat kumparan **berputar**.

Masalahnya, setelah setengah putaran, sisi yang tadi di kiri pindah ke kanan dan gaya justru membalikkan putaran. Solusinya adalah **komutator** (cincin belah): setiap setengah putaran, komutator membalik arah arus di kumparan, sehingga kumparan selalu didorong ke arah yang sama. Sikat karbon menjaga sambungan listrik ke komutator yang berputar.

LAB MINI

Motor DC beranimasi: lihat gaya pada kumparan

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-24



Arus kumparan	Kecepatan	Torsi
0,5 A	23 rpm	0,209 N m

Keadaan
Berputar ↺ (dilihat dari depan)

Tekan ▶ **Jalankan**. Perhatikan panah gaya F pada kedua sisi kumparan di tampak depan. Matikan **komutator**: apa yang terjadi? Balik arah arus, lalu tambah tegangan, jumlah lilitan, atau kuat magnet. Kalau motor macet di posisi tegak, tekan 👆 **Dorong sedikit**.

Agar motor berputar lebih kuat, kita bisa (1) memperbesar **arus**, (2) menambah **jumlah lilitan**, (3) memakai **magnet yang lebih kuat**, dan (4) melilitkan kumparan pada **inti besi lunak**. Membalik arah arus *atau* membalik kutub magnet akan membalik arah putaran.

🚀 LANJUT · IB & OLIMPIADE

TORSI PADA KUMPARAN DAN GALVANOMETER

Kumparan N lilitan dengan luas A dan arus I berperilaku seperti magnet kecil dengan **momen magnet** $\mu = NIA$. Di dalam medan B, torsinya $\tau = NIAB\sin\phi$, dengan ϕ adalah sudut antara garis normal kumparan dan medan. Torsi maksimum terjadi saat bidang kumparan sejajar medan. Pada **galvanometer kumparan putar**, kutub magnetnya dibuat melengkung dan diberi inti besi silinder supaya medannya *radial*. Akibatnya $\sin\phi = 1$ di semua posisi, torsi magnet $NIAB$ diimbangi torsi pegas $k\theta$, dan simpangan jarum $\theta = \dfrac{NAB}{k} I$ sebanding dengan arus. Skalanya pun jadi seragam.

Kipas angin

Kumparan dan medan magnet di dalam motor kipas saling mendorong, sehingga energi listrik berubah menjadi energi gerak baling-baling.

MRT dan KRL

Motor traksi di bawah gerbong kereta perkotaan mendorong kereta berton-ton dengan gaya magnet yang dikendalikan secara elektronik.

Motor & sepeda listrik

Banyak yang memakai motor di dalam roda (*hub motor*) tanpa sikat. Komutatornya diganti rangkaian elektronik yang membalik arus pada saat yang tepat.

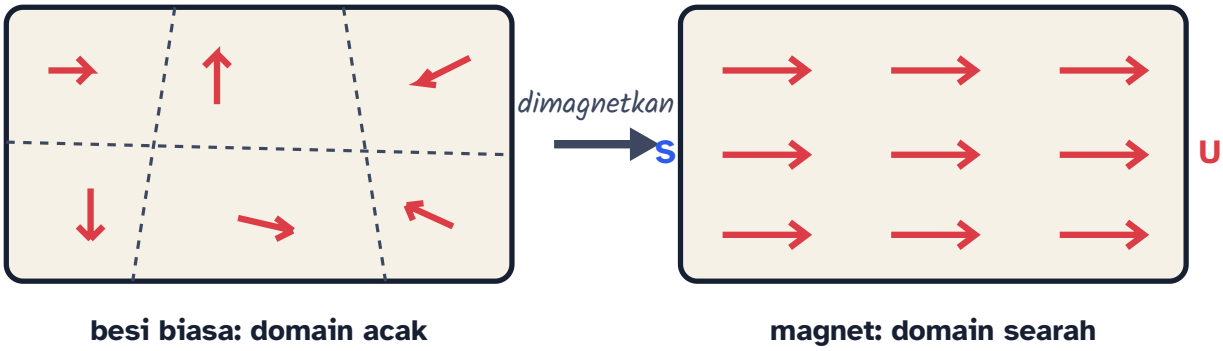
Pengeras suara

Kumparan pada kerucut speaker berada di dalam medan magnet. Arus sinyal yang naik-turun membuat kerucut maju-mundur dan menggetarkan udara.

24.7 Bahan magnetik

Mengapa besi ditarik magnet, sedangkan aluminium tidak? Setiap elektron berperilaku seperti magnet super kecil, karena berputar pada porosnya (*spin*) dan beredar mengelilingi inti. Pada kebanyakan bahan, magnet-magnet mini itu saling meniadakan. Berdasarkan responsnya terhadap medan magnet, bahan dibagi menjadi tiga:

Jenis	Perilaku dalam medan magnet	Contoh
Feromagnetik	ditarik **sangat kuat**. Bisa dijadikan magnet. Di dalamnya ada daerah-daerah kecil (**domain**) yang magnet mininya sudah searah.	besi, nikel, kobalt, baja, magnet neodimium
Paramagnetik	ditarik **sangat lemah**, hanya terasa dengan magnet sangat kuat	aluminium, oksigen cair, platina
Diamagnetik	**ditolak** sangat lemah	air, tembaga, emas, kayu, tubuhmu!



Besi biasa tidak bermagnet karena domain-domainnya mengarah acak dan saling meniadakan. Saat dimagnetkan, domain-domain itu menjadi searah.

Kemagnetan bisa **hilang** jika magnet dipanaskan melewati **suhu Curie** (untuk besi ±770 °C), dipukul-pukul keras, atau diletakkan dalam medan bolak-balik yang makin melemah. Pada suhu Curie, getaran panas mengacak domain-domainnya.

FAKTA UNIK DARI TARSI: RAHASIA RICE COOKER

Rice cooker model lama punya "saklar pintar" berupa magnet kecil di bawah panci. Magnet itu menempel pada keping khusus yang suhu Curie-nya sedikit di atas 100 °C. Selama masih ada air, suhu panci tertahan di sekitar 100 °C. Begitu air habis dan nasi matang, suhu naik melewati suhu Curie, keping itu berhenti bersifat magnet, magnet terlepas, dan saklar "klik" pindah ke mode hangat. Itulah bunyi "klik" yang kamu dengar!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HISTERESIS: BAHAN "KERAS" DAN "LUNAK"

Jika medan luar H pada bahan feromagnetik dinaikkan, diturunkan, lalu dibalik, kemagnetannya B tidak kembali melalui jalur yang sama. Grafiknya membentuk lingkaran yang disebut **kurva histeresis**. Saat medan luar sudah nol, bahan masih menyimpan kemagnetan sisa (**remanensi**). Untuk menghapusnya, dibutuhkan medan balik sebesar **koersivitas**. Bahan **keras** (baja, magnet neodimium) punya remanensi dan koersivitas besar, sehingga cocok untuk magnet permanen dan pita rekaman. Bahan **lunak** (besi lunak, baja silikon) punya lingkaran histeresis sempit dan mudah dibalik, sehingga energinya yang hilang sebagai kalor kecil. Bahan ini cocok untuk inti elektromagnet dan transformator (Bab 25). Luas lingkaran histeresis sebanding dengan energi yang hilang per siklus.

MITOS

"Magnet menarik semua jenis logam."

FAKTA

Magnet hanya menarik kuat bahan **feromagnetik**: besi, nikel, kobalt, dan paduannya. Kaleng minuman aluminium, kabel tembaga, emas, dan perak praktis tidak ditarik. Cobalah dengan sendok, kaleng, dan peniti di rumah!

MITOS

"Medan magnet bisa mempercepat elektron supaya makin ngebut."

FAKTA

Gaya magnet selalu tegak lurus kecepatan, jadi tidak melakukan usaha. Medan magnet hanya **membelokkan**, tidak menambah kelajuan. Akselerator partikel memakai medan **listrik** untuk mempercepat, dan medan magnet untuk membelokkan.

MITOS

"Ujung utara jarum kompas menunjuk ke kutub utara magnet Bumi."

FAKTA

Kutub U jarum ditarik oleh kutub **S**. Jadi di dekat kutub utara geografis Bumi terdapat kutub **selatan** magnet Bumi. Nama "kutub utara" pada jarum artinya "kutub yang mencari utara".

COBA SENDIRI **Pemilih kecepatan**

Di sebuah alat spektrometer, ion-ion melewati daerah dengan medan listrik $E = 3{,}0 \times 10^4$ V/m dan medan magnet $B = 0{,}060$ T yang saling tegak lurus. Ion dengan kelajuan berapa yang lolos lurus tanpa dibelokkan? Jika ion yang lolos itu adalah proton, lalu masuk ke daerah yang hanya bermedan magnet 0,060 T, berapa jari-jari lintasannya?

1. Lolos lurus jika gaya listrik = gaya magnet: $qE = qvB$, jadi $v = \dfrac{E}{B} = \dfrac{3{,}0 \times 10^4}{0{,}060} = 5{,}0 \times 10^5$ m/s.
2. Perhatikan bahwa muatan q dicoret, sehingga semua ion dengan kelajuan ini lolos, apa pun muatan dan massanya.
3. Di daerah bermedan magnet saja: $r = \dfrac{mv}{qB} = \dfrac{1{,}67 \times 10^{-27} \times 5{,}0 \times 10^5}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 0{,}060} \approx 8{,}7 \times 10^{-2}$ m.

Kelajuan yang lolos $5{,}0 \times 10^5$ m/s, dan jari-jari proton ±8,7 cm. Ion yang lebih berat akan membentuk lingkaran lebih besar. Inilah cara spektrometer massa memisahkan isotop.

Cek Cepat

Kawat lurus tegak dialiri arus ke atas. Dilihat dari atas, garis medan magnet di sekitarnya...

- keluar menjauhi kawat seperti jari-jari roda
- berputar searah jarum jam
- berputar berlawanan arah jarum jam
- sejajar kawat, ke atas

Cara yang tidak memperkuat elektromagnet adalah...

- mengganti inti besi lunak dengan inti kayu
- menambah jumlah lilitan
- memperbesar arus
- merapatkan lilitan

Elektron dan proton masuk ke medan magnet yang sama dengan kecepatan yang sama, tegak lurus medan. Pernyataan yang benar adalah...

- keduanya berbelok ke arah yang sama dengan jari-jari sama
- elektron tidak dibelokkan karena massanya sangat kecil
- proton berbelok lebih tajam karena muatannya positif
- keduanya berbelok ke arah berlawanan, dan lingkaran elektron jauh lebih kecil

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: kompas jarum dan elektromagnet paku

Bahan: jarum jahit, magnet kulkas, gabus atau tutup botol plastik, mangkuk air, paku besi besar, ±1 m kabel tipis berisolasi, baterai 1,5 V, beberapa klip kertas. **Pakai baterai saja, jangan pernah listrik PLN!**

1. Gosok jarum dengan satu ujung magnet kulkas ke **satu arah** saja, ±30 kali. Letakkan jarum di atas gabus yang mengapung di mangkuk air. Ke mana jarum menunjuk? Bandingkan dengan kompas di HP.
2. Lilitkan kabel ±20 kali pada paku. Sambungkan kedua ujung kabel ke baterai **sebentar saja** (kabel bisa hangat). Hitung berapa klip yang bisa diangkat paku.
3. Ulangi dengan 40 lilitan. Dekatkan kompas jarummu ke ujung paku dan lihat ujung mana yang menjadi kutub U.

Pertanyaan: Mengapa jarum yang digosok menjadi magnet? Mengapa paku dengan 40 lilitan mengangkat lebih banyak klip? Apa yang terjadi pada klip saat baterai dilepas, dan mengapa inti dari besi lunak lebih cocok daripada baja?

⚡ RINGKASAN KILAT — Bab 24 dalam 3 menit

✅ Kamu sekarang bisa...

- menggambar **garis medan magnet** dan menjelaskan cara kerja **kompas** serta **magnet Bumi**
- memakai **aturan tangan kanan** untuk arah medan di sekitar kawat berarus dan solenoid, lalu menghitung besarnya
- menentukan arah dan besar **gaya Lorentz** pada kawat berarus dan pada muatan yang bergerak
- menjelaskan lintasan **lingkaran** dan **heliks** partikel bermuatan, serta cara kerja **motor listrik DC**
- membedakan bahan **feromagnetik**, **paramagnetik**, dan **diamagnetik**

Istilah kunci

kutub · medan magnet · garis medan · Deklinasi · Inklinasi · arus listrik menghasilkan medan magnet · aturan genggaman tangan kanan · solenoid · elektromagnet · gaya Lorentz · heliks · komutator · suhu Curie

Rumus penting

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Medan magnet di sekitar kawat lurus. Medan makin kuat jika arus makin besar, dan makin lemah jika kita makin jauh dari kawat. Jarak dua kali lipat, medan tinggal separuh.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L}$$

Medan di dalam solenoid. Makin banyak lilitan, makin besar arus, dan makin rapat gulungannya (L kecil), medan di dalam solenoid makin kuat.

$$F = B I L \sin\theta$$

Gaya Lorentz pada kawat berarus. Gaya = kuat medan × arus × panjang kawat dalam medan × sin sudut antara kawat dan medan.

$$r = \frac{m v}{q B}$$

Jari-jari lintasan muatan. Partikel yang berat dan cepat sulit dibelokkan (lingkarannya besar). Muatan besar dan medan kuat membelokkannya tajam (lingkarannya kecil).

Jangan sampai terjebak

- Garis medan di sekitar kawat lurus tidak berawal dan berakhir di kutub mana pun.

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=24

Teka-teki untuk Bab 25

Oersted menunjukkan bahwa **listrik bisa membuat magnet**. Sebelas tahun kemudian, Michael Faraday bertanya kebalikannya: bisakah **magnet membuat listrik**? Ia meletakkan magnet diam di dalam gulungan kawat yang tersambung ke galvanometer. Jarumnya tidak bergerak sedikit pun. Apakah Faraday gagal?

▼ Intip petunjuk

Kuncinya ada pada kata "diam". Faraday menemukan bahwa jarum galvanometer baru bergerak **saat magnetnya digerakkan**, yaitu saat medan magnet yang menembus kumparan **berubah**. Penemuan ini melahirkan generator, dinamo, dan transformator. Lanjutkan ke Bab 25: Induksi Elektromagnetik.

BAB 25 · LISTRIK & MAGNET

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.

SENTER GOYANG

KOMIK · 4 PANEL

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):

RUMUS HIDUP **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.

- B Kuat medan magnet T
- A Luas bidang kumparan cm^2
- θ Sudut medan terhadap garis normal °
- Φ Fluks magnet mWb

FLUKS MAGNET

2

mWb

Medan **0,2** T yang menembus bidang **100** cm² dengan sudut **0°** menghasilkan fluks **2** mWb. Putar bidangnya ke 90°: fluksnya hilang!

Cek satuan: $1\,\mathrm{Wb} = 1\,\mathrm{T\,m^2}$. Jadi tesla bisa juga ditulis Wb/m², artinya "fluks per luas".

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI 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.

25.2 Hukum Faraday: perubahan melahirkan listrik

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:

RUMUS HIDUP **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.

- 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.

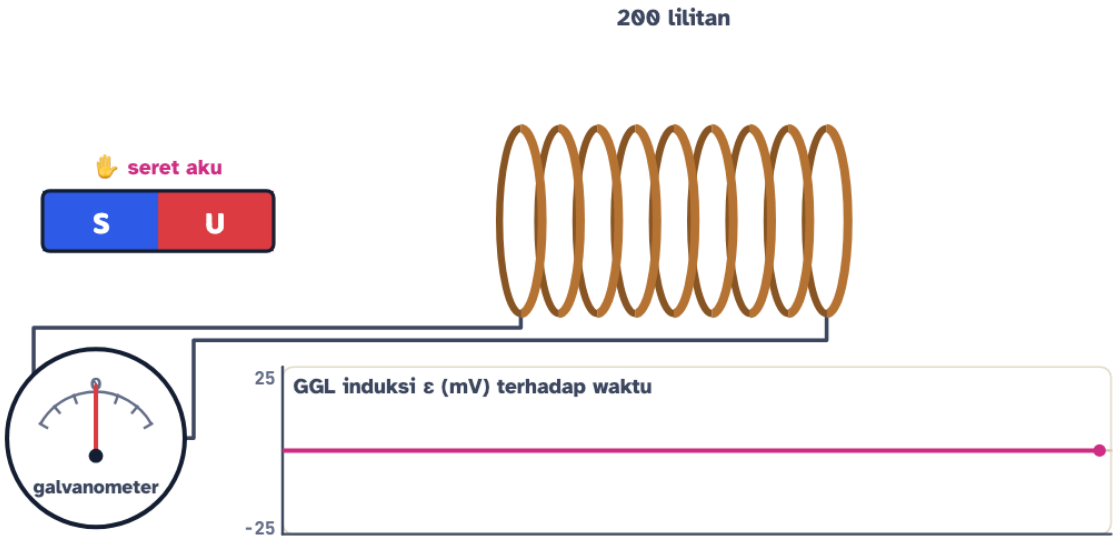
Cek satuan: $\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{T\,m^2}}{\mathrm{s}} = \mathrm{V}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI 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).

LAB MINI Magnet dan kumparan: buat jarum galvanometer menari

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



GGL induksi	Fluks total NΦ	Kumparan
0 mV	0,033 mWb	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?

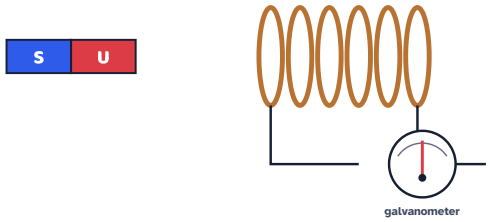
1. $\Delta\Phi = 0{,}6\ \mathrm{mWb} = 6 \times 10^{-4}$ Wb.
2. $|\varepsilon| = N\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 500 \times \dfrac{6 \times 10^{-4}}{0{,}2} = 1{,}5$ V.

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

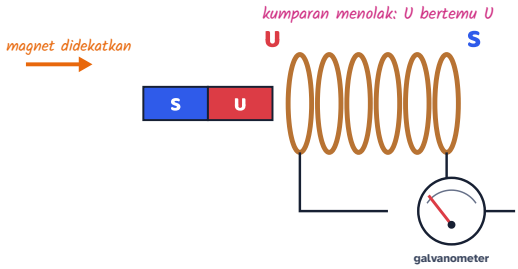
25.3 Hukum Lenz: alam tidak memberi listrik gratis

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

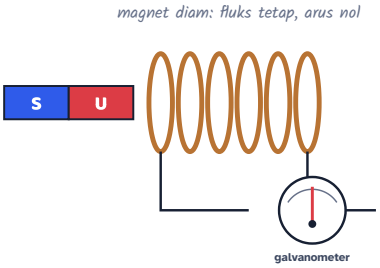
Saat kutub U magnet didekatkan, kumparan "membela diri" dengan membuat kutub U juga di ujung yang menghadap magnet, sehingga magnet **ditolak**. Saat magnet dijauhkan, kumparan membuat kutub S untuk **menahan** magnet pergi. Ikuti animasinya:



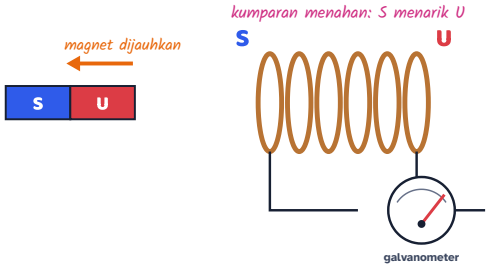
Langkah 1. Magnet diam jauh dari kumparan. Fluks di dalam kumparan tidak berubah, jadi jarum galvanometer menunjuk nol.



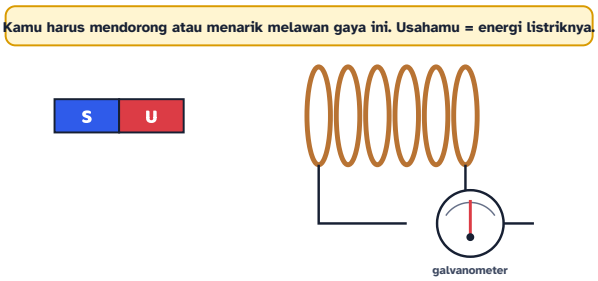
Langkah 2. Kutub U didekatkan: fluks bertambah. Arus induksi membuat ujung kiri kumparan menjadi kutub **U** yang **menolak** magnet. Jarum menyimpang ke satu arah.



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.



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 genggaman 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!

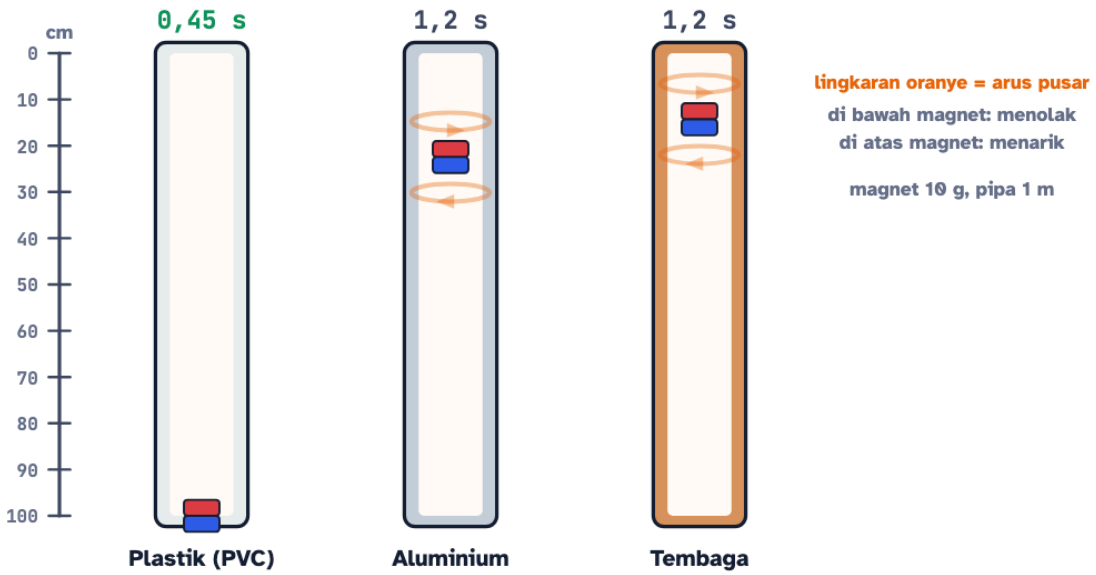
Magnet neodimium kecil dijatuhkan ke dalam pipa tembaga yang berdiri tegak. Tembaga tidak ditarik magnet. Dibandingkan jatuh di dalam pipa plastik, magnet itu...

- 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	Aluminium	Tembaga	Kecepatan terminal (tembaga)
0,45 s	1,2 s…	1,2 s…	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:

RUMUS HIDUP **GGL gerak**

$$\varepsilon = B\,\ell\,v$$

GGL = kuat medan × panjang batang × 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.

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

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).

KERJAKAN BERSAMA **Batang di atas rel**

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: $\varepsilon = B\ell v = 0{,}8 \times 0{,}5 \times 4 = 1{,}6$ V.
2. Arus: $I = \varepsilon / R = 1{,}6/2 = 0{,}8$ A.
3. Batang berarus di dalam medan mengalami gaya Lorentz yang melawan gerak (hukum Lenz): $F = BI\ell = 0{,}8 \times 0{,}8 \times 0{,}5 = 0{,}32$ N.
4. Agar kecepatannya tetap, batang harus ditarik dengan 0,32 N. Daya tarik: $Fv = 0{,}32 \times 4 = 1{,}28$ W, persis sama dengan daya lampu $I^2R = 0{,}64 \times 2 = 1{,}28$ 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 mengimbanginya: $eE = evB$, sehingga beda potensial ujung-ujungnya $E\ell = B\ell v$. 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: $\varepsilon = \int_0^L B\omega r \, \mathrm{d}r = \frac{1}{2}B\omega L^2$. Pesawat bersayap 60 m yang terbang 250 m/s melintasi komponen vertikal medan Bumi ±40 µT menghasilkan GGL sekitar $B\ell v \approx 0{,}6$ 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).

RUMUS HIDUP

GGL maksimum generator

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

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 `cm²`
- f Frekuensi putaran `Hz`
- $\varepsilon_{\text{maks}}$ GGL maksimum `V`

GGL MAKSIMUM

125,7

V

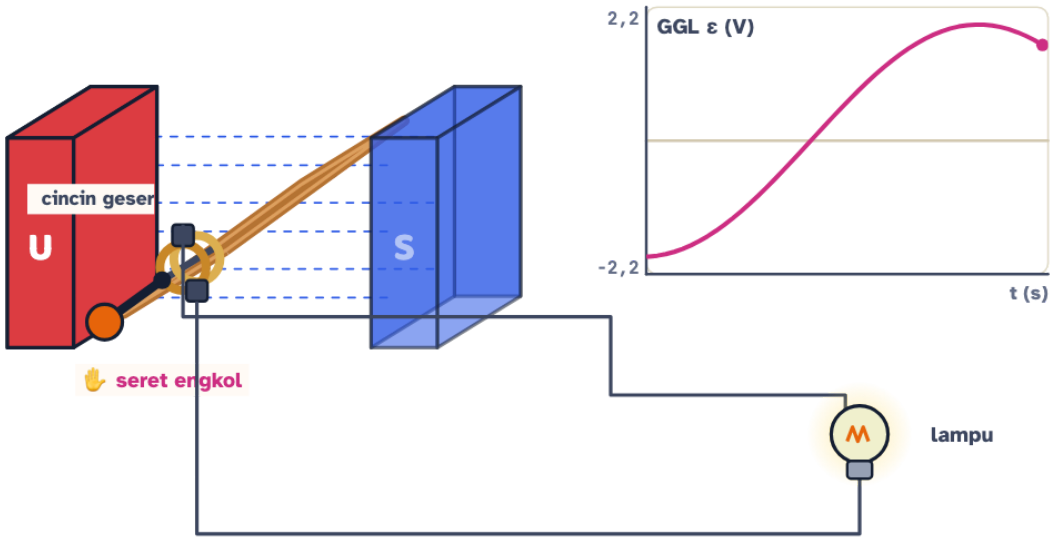
Kumparan **100** lilitan seluas **200** cm² yang berputar **50** kali per detik dalam medan **0,2** T menghasilkan GGL puncak **125,7** V.

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

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

LAB MINI **Generator engkol: putar dan lihat GGL sinus**

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



GGL maksimum NBAω	GGL sekarang	Frekuensi
1,88 V	1,52 V	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 dipasangi puluhan kutub magnet supaya tetap menghasilkan 50 Hz.

KERJAKAN BERSAMA **Generator sepeda**

Kumparan dinamo berisi 250 lilitan dengan luas 4 cm² dan berputar di dalam medan 0,1 T. Berapa putaran per detik yang diperlukan agar GGL puncaknya 6 V?

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

2. $f = \dfrac{\omega}{2\pi} = \dfrac{600}{2\pi} \approx 95$ 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:

RUMUS HIDUP

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).

- V_p Tegangan primer V
- N_p Lilitan primer lilitan
- N_s Lilitan sekunder lilitan
- V_s Tegangan sekunder V

TEGANGAN SEKUNDER

12

V

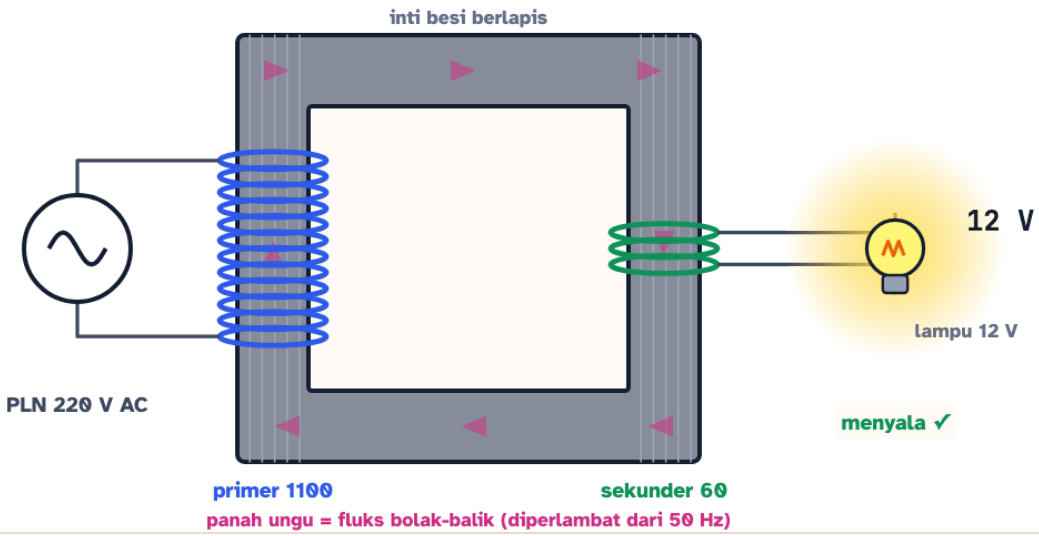
Trafo dengan **1.100** lilitan primer dan **60** lilitan sekunder mengubah **220** V menjadi **12** V.

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

LAB MINI **Bengkel trafo: naikkan, turunkan, atau... pakai aki?**

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



Tegangan sekunder	Jenis trafo	Arus lampu	Arus primer (ideal)
12 V	step-down (penurun)	2 A	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: TRAFO 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!

RUMUS HIDUP

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.

- P Daya yang dikirim MW
- V Tegangan transmisi kV
- R Hambatan 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: $\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{V}}\right)^2 \Omega = \mathrm{A}^2\,\Omega = \mathrm{W}$

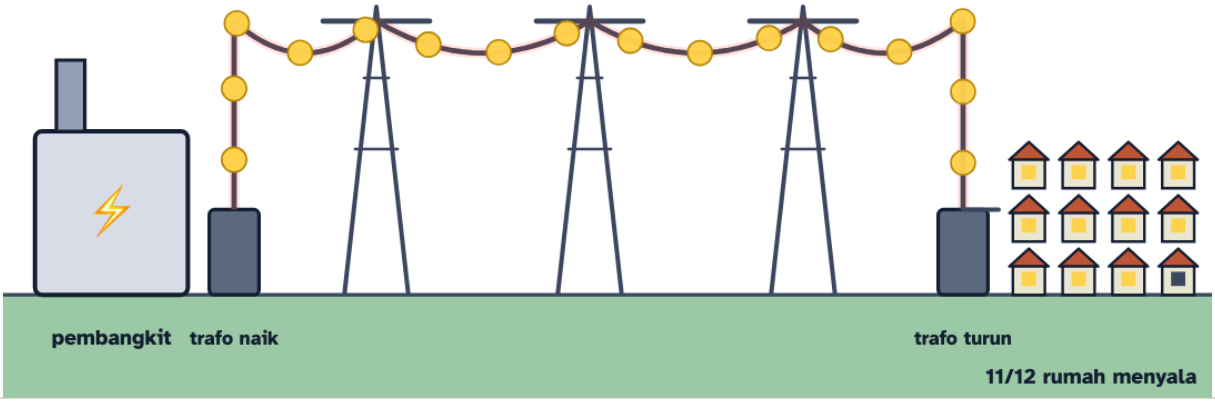
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-INDUKSI-RUGI

LAB MINI **Kirim listrik ke kota: tegangan rendah atau SUTET?**

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

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

Rugi I^2R = 4,44 MW (4,44% dari daya kirim)



Arus di kabel	Daya hilang	Persentase hilang	Daya sampai
667 A	4,44 MW	4,44 %	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: $I = \dfrac{50 \times 10^6}{20 \times 10^3} = 2\,500$ 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: $I = \dfrac{50 \times 10^6}{150 \times 10^3} \approx 333$ A, sehingga $P_{\text{rugi}} = 333^2 \times 8 \approx 0{,}89$ MW.
3. Persentase: $\dfrac{0{,}89}{50} \times 100\% \approx 1{,}8\%$.

Pada 20 kV hampir seluruh daya hilang, sedangkan pada 150 kV hanya ±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): $\varepsilon = -L\,\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$. 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.

LANJUT · IB & OLIMPIADE

SOLENOID, ENERGI, DAN RANGKAIAN R–L

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

Kompor induksi

Kumparan di bawah kaca dialiri arus bolak-balik berfrekuensi puluhan kilohertz. Arus pusar muncul langsung di dasar panci, sehingga panci yang memanas, 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."

FAKTA

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

MITOS

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

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.

⚡ RINGKASAN KILAT **Bab 25 dalam 3 menit**

✅ 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

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

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.

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

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).

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

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.

⛰️ 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=25

🧩 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 **nol**! 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.

BAB 26 · LISTRIK & MAGNET

26 Arus Bolak-balik: Listrik yang Menari

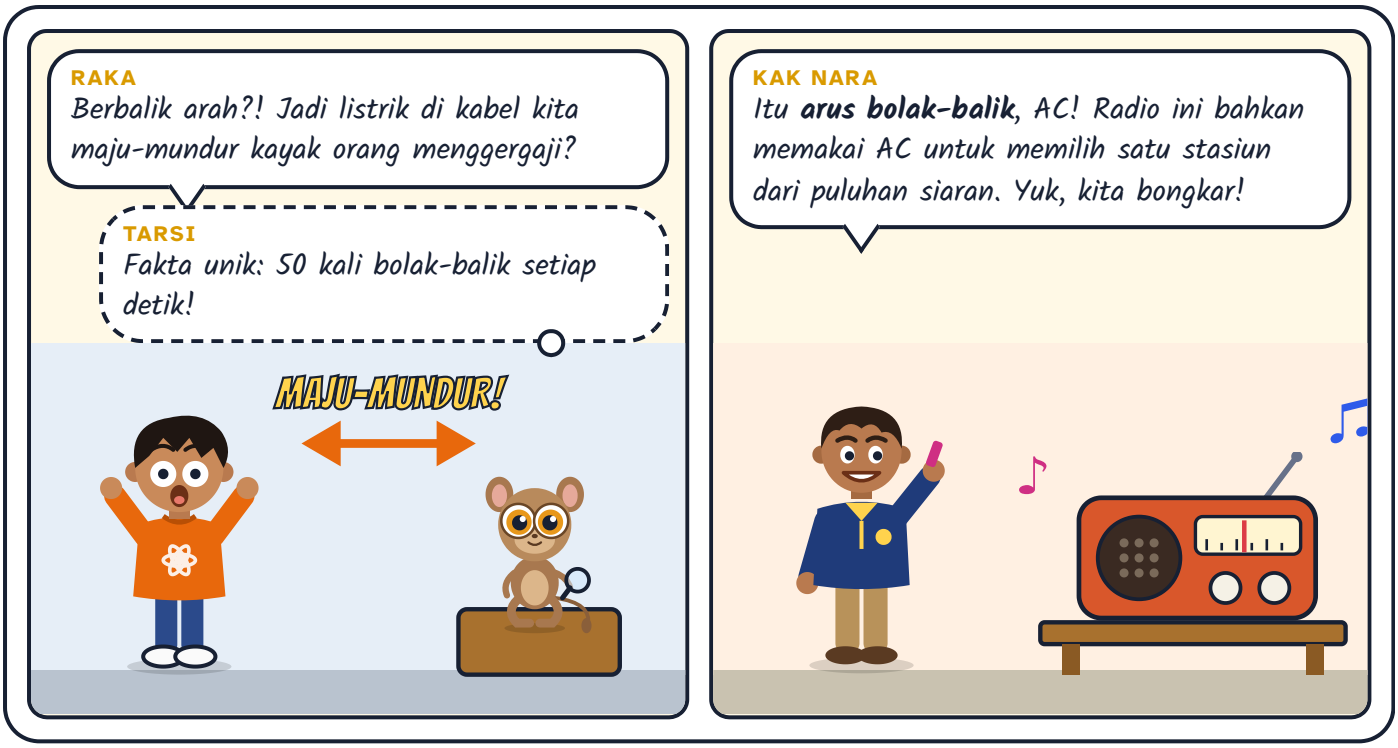
Stopkontak di rumahmu berlabel 220 V, padahal tegangannya naik-turun sampai ±311 V dan berbalik arah seratus kali setiap detik. Lalu bagaimana radio bisa memilih satu stasiun di antara puluhan siaran yang memenuhi udara?

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



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

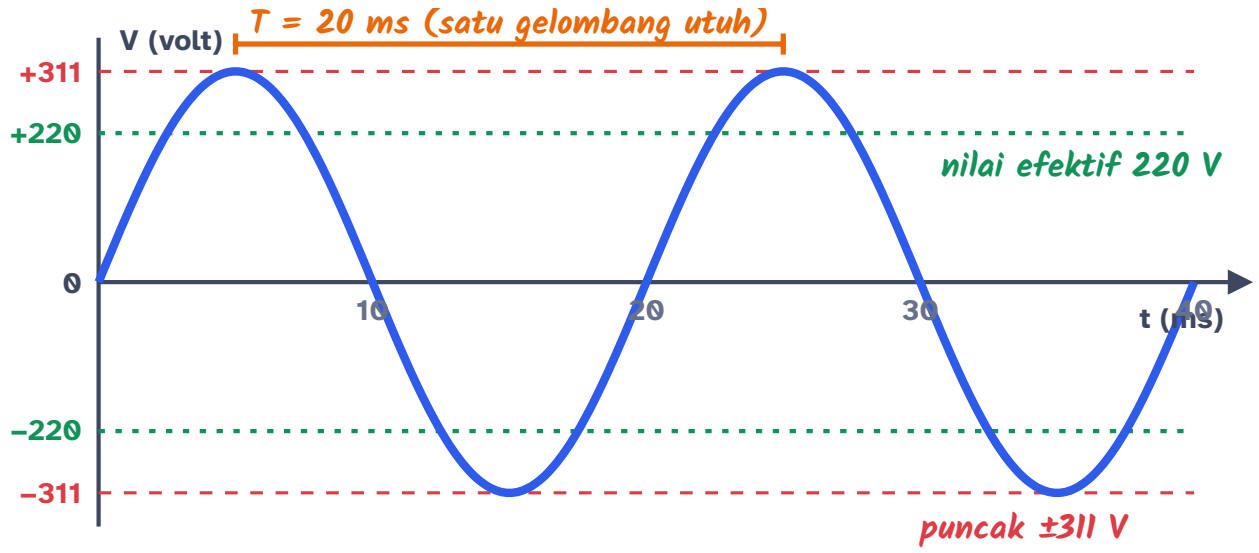
Baterai senter mendorong elektron ke **satu arah saja**, dari kutub negatif ke kutub positif melalui rangkaian. Arus seperti ini disebut **arus searah** atau **DC** (*direct current*).

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*).

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

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

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

RUMUS HIDUP **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.

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 $V_{\text{maks}} = 1{,}414 \times 220 \approx 311$ V.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI 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 (±198 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: $V_{\text{rms}} = \dfrac{12}{\sqrt{2}} = \dfrac{12}{1{,}414} \approx 8{,}5$ V.
2. Periode: $T = 4 \times 5$ ms $= 20$ ms $= 0{,}020$ s.
3. Frekuensi: $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{0{,}020} = 50$ Hz.

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

MITOS

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

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.

MITOS

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

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 √2?

Daya sesaat pada resistor: $P(t) = \dfrac{V_{\text{maks}}^2}{R}\sin^2(\omega t)$. 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 $\langle P \rangle = \dfrac{V_{\text{maks}}^2}{2R} = \dfrac{V_{\text{rms}}^2}{R}$ 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	$X_L = 2\pi f L$	naik	arus **terlambat** 90° (¼ periode)	roda gila berat: malas diubah arah putarnya
Kapasitor C	$X_C = \dfrac{1}{2\pi f C}$	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 ¼ periode lebih dulu daripada puncak tegangan. Induktor kebalikannya: ia menahan perubahan arus, sehingga arusnya baru memuncak ¼ 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: $\frac{1}{\mathrm{Hz}\cdot\mathrm{F}} = \frac{1}{\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{C/V}} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{C/s}} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = \Omega$

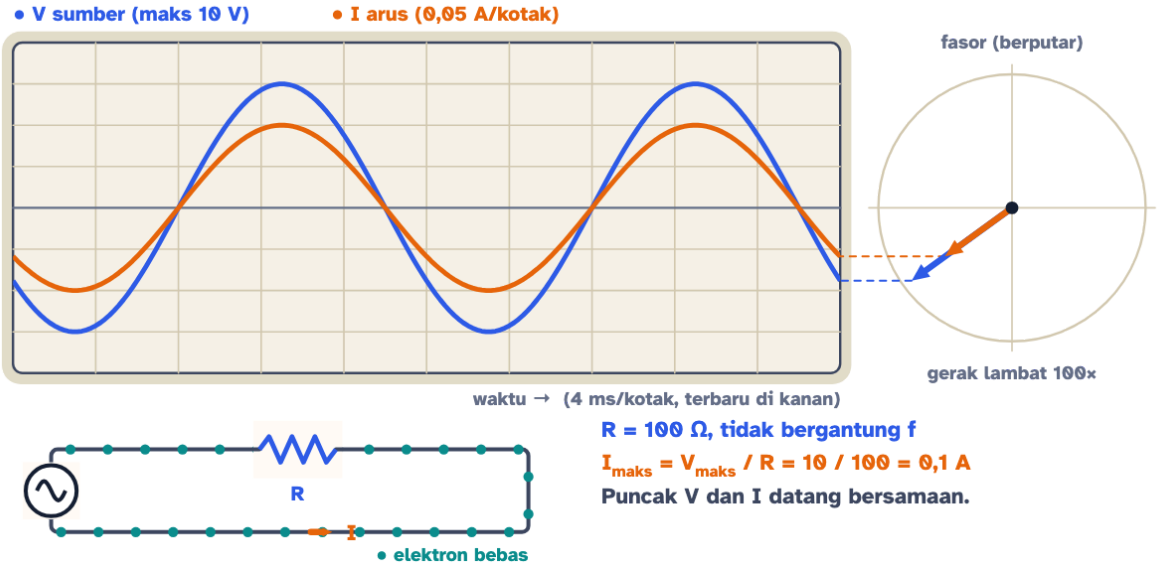
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AC-XC

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!

LAB MINI Osiloskop AC: siapa yang duluan, V atau I?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-26



R = 100 Ω, tidak bergantung f

$I_{maks} = V_{maks} / R = 10 / 100 = 0{,}1$ A

Puncak V dan I datang bersamaan.

Reaktansi / impedansi	Arus puncak	Beda fase ϕ	Siapa duluan?
100 Ω	0,1 A	0 °	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 naikkan frekuensinya dan amati arusnya. Coba juga mode **R + L + C** pada 50 Hz. Ada kejutan!

KERJAKAN BERSAMA Kapasitor di stopkontak

Sebuah kapasitor 10 µF (tahan 400 V) dihubungkan ke listrik PLN 220 V, 50 Hz. Berapa reaktansinya dan berapa arus efektif yang mengalir?

1. $X_C = \dfrac{1}{2\pi f C} = \dfrac{1}{2\pi \times 50 \times 10 \times 10^{-6}} = \dfrac{1}{3{,}14 \times 10^{-3}} \approx 318\ \Omega.$

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

3. Cek isolasi: tegangan puncak 311 V masih di bawah 400 V. Aman.

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

MITOS

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

FAKTA

Kapasitor memblokir **DC**, tetapi meloloskan **AC**. Makin tinggi frekuensinya, makin mudah. Elektron bolak-balik mengisi dan mengosongkan pelat tanpa pernah menembus celahnya.

MITOS

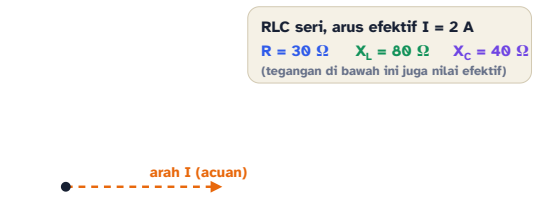
"Kumparan kawat tembaga hanya seutas kabel panjang, jadi tidak menghambat apa-apa."

FAKTA

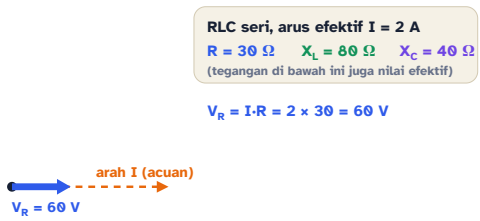
Untuk DC memang hampir begitu. Untuk AC, kumparan melawan perubahan arus (Hukum Lenz), sehingga reaktansinya $X_L = 2\pi f L$ bisa ratusan ohm walaupun hambatan kawatnya hanya beberapa ohm.

26.4 Diagram fasor & impedansi rangkaian RLC

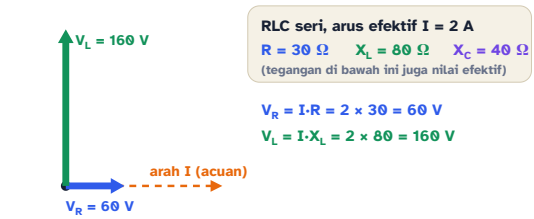
Bagaimana kalau R, L, dan C dipasang seri? Arusnya sama di semua komponen, tetapi tegangan di tiap komponen memuncak pada saat yang **berbeda**. Tegangan-tegangan itu tidak bisa dijumlahkan begitu saja. Alatnya adalah **fasor**: panah berputar yang panjangnya menyatakan nilai puncak dan sudutnya menyatakan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



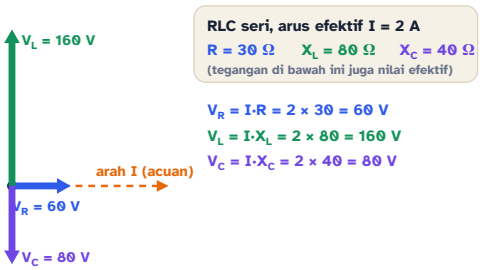
Langkah 1. Pada rangkaian seri, arus I sama di mana-mana. Kita jadikan arus sebagai acuan: fasornya mendatar.



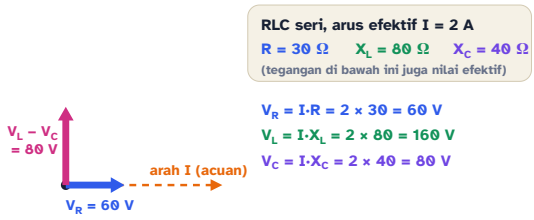
Langkah 2. Tegangan resistor $V_R = IR = 60$ V **sefase** dengan arus, jadi panahnya searah I.



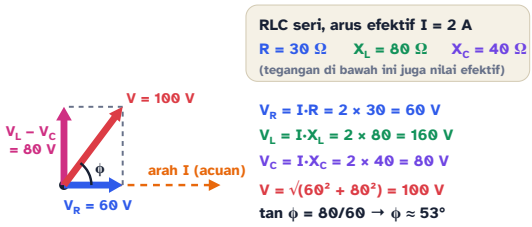
Langkah 3. Tegangan induktor $V_L = IX_L = 160$ V **mendahului** arus 90°, jadi panahnya tegak ke atas.



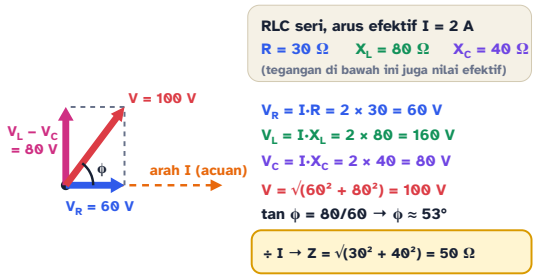
Langkah 4. Tegangan kapasitor $V_C = IX_C = 80$ V **tertinggal** 90° dari arus, jadi panahnya tegak ke bawah.



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



Langkah 6. Jumlahkan dengan Pythagoras: $V = 60^2 + 80^2 = 100$ V. Tegangan sumber mendahului arus sebesar $\varphi \approx 53°$.



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

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

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.

RUMUS HIDUP **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!

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

IMPEDANSI
50
Ω

R = **30** Ω, X_L = **80** Ω, X_C = **40** Ω, sehingga Z = **50** Ω. 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

⚠️ **AWAS JEBAKAN**

Pada contoh di atas, $V_R + V_L + V_C = 60 + 160 + 80 = 300$ 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.

KERJAKAN BERSAMA **Rangkaian RLC dan beda fase**

Resistor 40 Ω, 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. $I = V/Z = 100/50 = 2$ A.
4. $\tan\varphi = 30/40 = 0{,}75 \Rightarrow \varphi \approx 37°$: tegangan sumber mendahului arus.

$Z = 50\ \Omega$, $I = 2$ **A,** $\varphi \approx 37°$**. 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:

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

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.

RUMUS HIDUP

Frekuensi resonansi penala radio

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C}}$$

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** µH dan C = **26** 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.

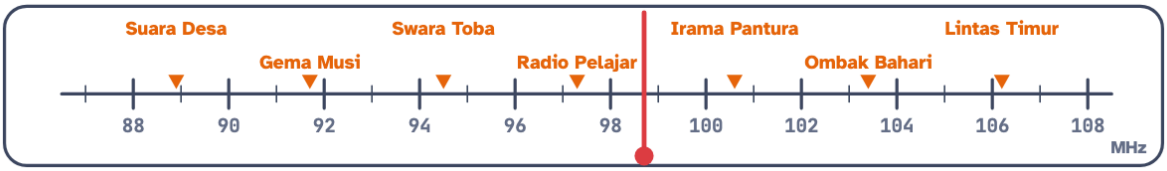
Cek satuan: $\frac{1}{\sqrt{\mathrm{H}\cdot\mathrm{F}}} = \frac{1}{\sqrt{(\Omega\,\mathrm{s})(\mathrm{s}/\Omega)}} = \frac{1}{\mathrm{s}} = \mathrm{Hz}$

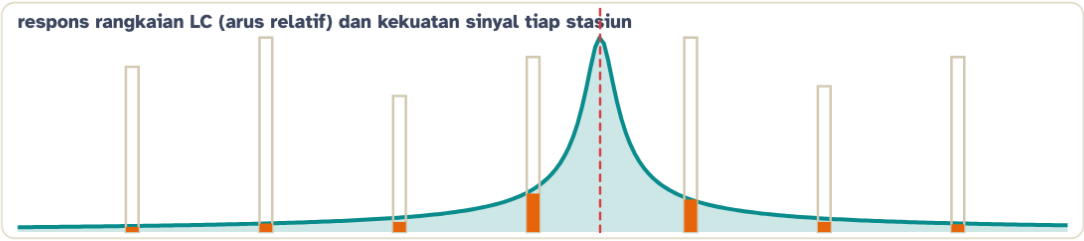
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-AC-RESONANSI

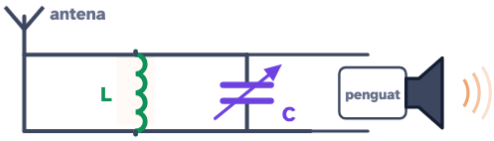
Antena radio menangkap **semua** siaran sekaligus. Di dalam radio, antena terhubung ke rangkaian LC. Saat kamu memutar tombol penala, sebenarnya kamu mengubah kapasitansi C (pada radio lama berupa kapasitor variabel dengan pelat-pelat yang bisa diputar; pada radio digital berupa dioda khusus yang kapasitansinya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

LAB MINI **Penala radio: putar kapasitor, tangkap stasiun!**

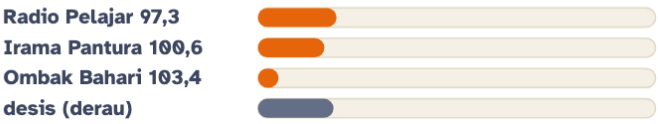
LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-26







Yang keluar dari speaker:



Frekuensi resonansi	Lebar pita Δf	Faktor kualitas Q	Terdengar
98,7 MHz	0,64 MHz	155	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. Penerimanya 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.

COBA SENDIRI **Merancang penala FM**

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

1. Dari $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, kuadratkan dan susun ulang: $C = \dfrac{1}{(2\pi f_0)^2 L}$.
2. $2\pi f_0 = 2\pi \times 10^8 = 6{,}28 \times 10^8$ rad/s, sehingga $(2\pi f_0)^2 = 3{,}95 \times 10^{17}$.
3. $C = \dfrac{1}{3{,}95 \times 10^{17} \times 0{,}25 \times 10^{-6}} = \dfrac{1}{9{,}87 \times 10^{10}} \approx 1{,}01 \times 10^{-11}$ F.

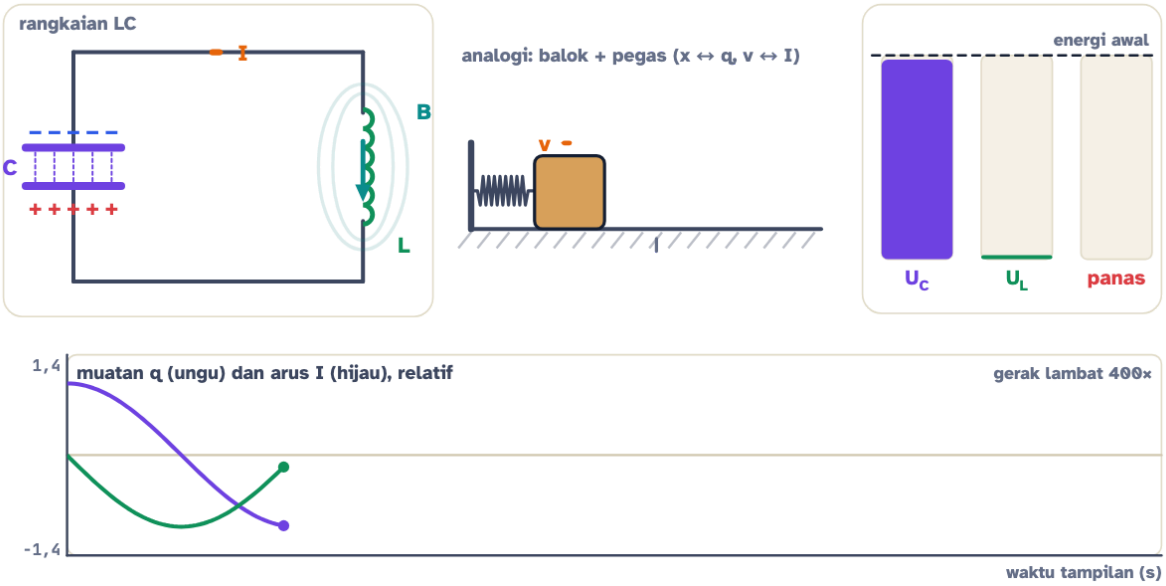
$C \approx 10$ pF. Untuk menangkap 90 MHz, C harus sedikit lebih besar (sekitar 12,5 pF), karena $f_0 \propto 1/\sqrt{C}$.

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).

LAB MINI **Osilasi LC: energi yang berayun**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-26



Frekuensi alami f_0	Periode T	Energi kapasitor	Energi kumparan
159 Hz	6,28 ms	0,98 mJ	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 naikkan 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 × arus × 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: ≈ 1,1 × rice cooker saat memasak · ≈ 7% dari mesin motor bebek · ≈ 44 × lampu LED

Cek satuan: $\mathrm{V} \cdot \mathrm{A} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} \cdot \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}} = \mathrm{W}$; 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.

COBA SENDIRI **Rumah 1.300 VA**

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.

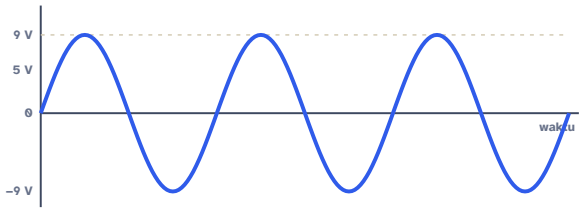
Sekitar 6,5 A, melebihi batas 5,9 A. Setrika sebaiknya menunggu nasi matang, kalau tidak MCB bisa turun! Tanpa setrika, arusnya hanya sekitar 5,0 A. (Kalau arus dijumlahkan biasa, $1{,}82 + 3{,}5 + 1{,}59 \approx 6{,}9$ **A: terlalu besar karena beda fase diabaikan.)**

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

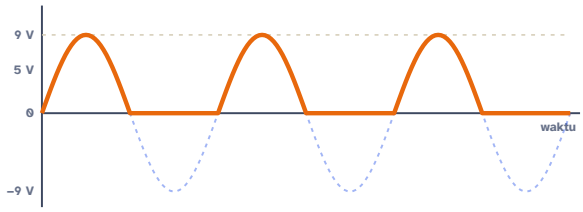
Baterai HP membutuhkan DC sekitar 5 V, sedangkan stopkontak memberi AC 220 V. Charger HP melakukan empat tugas: **menurunkan** tegangan, **menyearahkan** arus, **meratakan** gelombang, dan **menstabilkan** hasilnya. Komponen kuncinya adalah **dioda**, "pintu satu arah" bagi arus listrik. Cara kerja dioda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

① Trafo: AC kecil, puncak 9 V



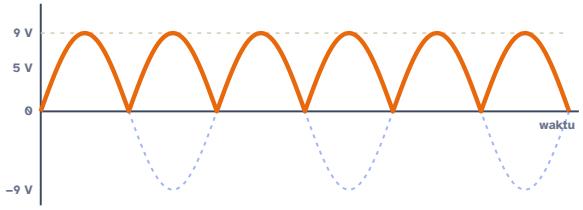
Langkah 1. Dari stopkontak: 220 V AC. Bagian pertama charger menurunkan tegangannya, misalnya menjadi AC dengan puncak 9 V. Arusnya masih bolak-balik.

② 1 dioda: setengah gelombang



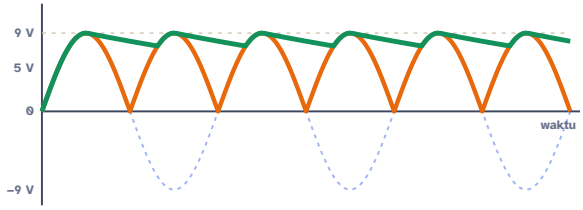
Langkah 2. Satu **dioda** hanya meloloskan arus satu arah. Setengah gelombang negatif dibuang. Hasilnya **penyearah setengah gelombang**: arahnya selalu sama, tetapi separuh waktu kosong.

③ 4 dioda (jembatan): gelombang penuh



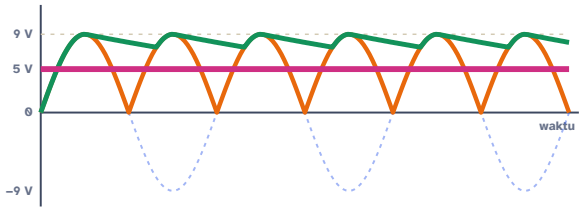
Langkah 3. Empat dioda yang disusun sebagai **jembatan** membalik setengah gelombang negatif menjadi positif. Inilah **penyearah gelombang penuh**. Arahnya selalu sama, tetapi besarnya masih naik-turun 100 kali per detik.

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!"

Kompor induksi

Kumparannya 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!

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C}}$$

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, $V_R + V_L + V_C = 60 + 160 + 80 = 300$ 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.

BAB 27 · LISTRIK & MAGNET

27 Gelombang Elektromagnetik: Satu Keluarga, Banyak Wajah

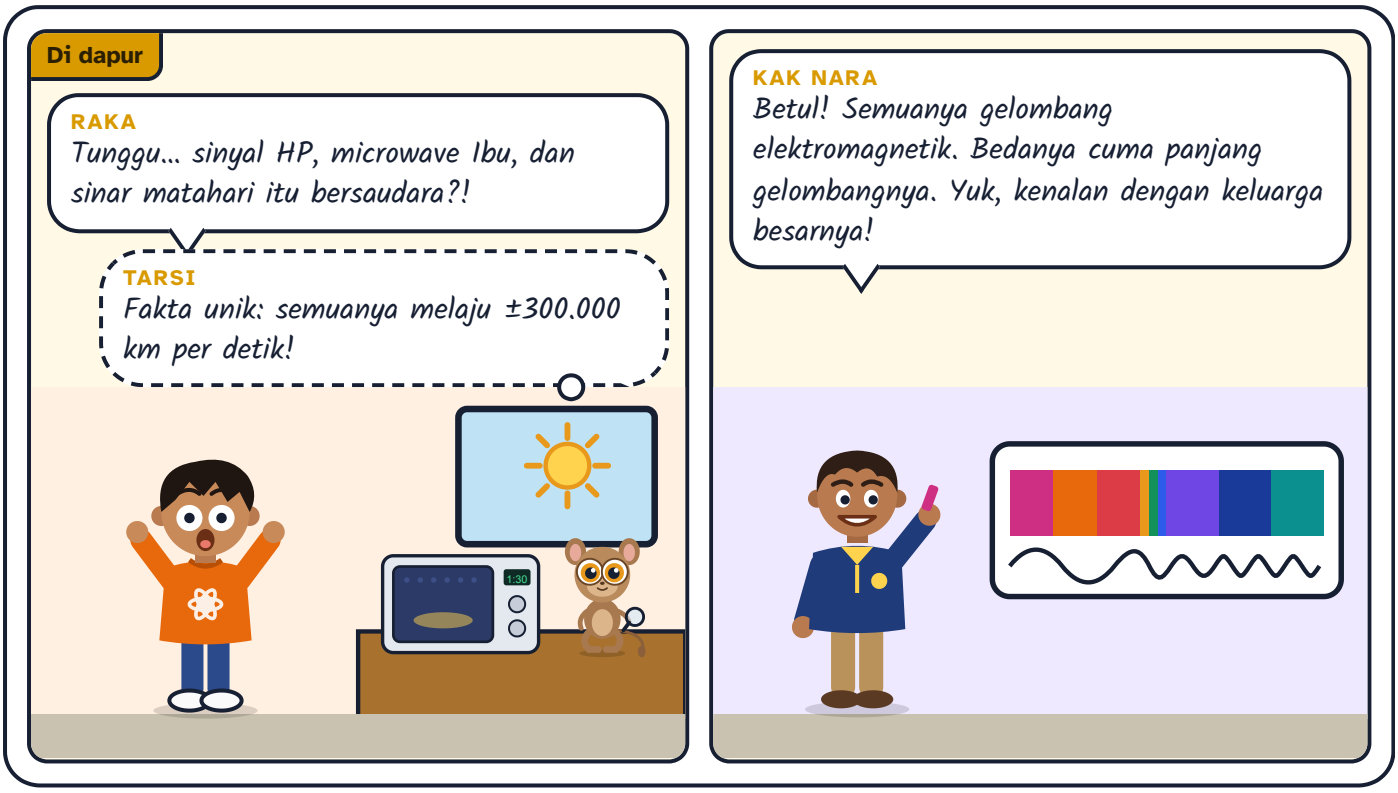
Pesan dari Palembang sampai di Jayapura dalam sekejap. Oven microwave memanaskan sayur, sinar matahari menghangatkan kulit, dan sinar X memotret tulang. Ternyata semuanya saudara kandung: gelombang listrik dan magnet yang saling menggendong.

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 $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$;
- 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



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!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

HUKUM AMPÈRE–MAXWELL

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

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

Untuk kapasitor pelat sejajar yang diisi arus I, medan di celah $E = \dfrac{q}{\varepsilon_0 A}$, sehingga $\varepsilon_0 \dfrac{\mathrm{d}(EA)}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = I$. 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

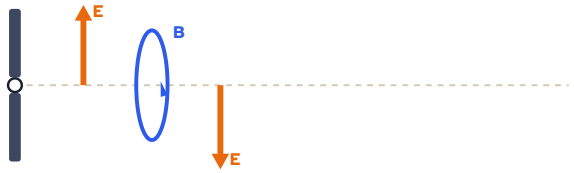
Muatan yang **diam** hanya punya medan listrik yang tenang. Muatan yang bergerak dengan kecepatan **tetap** membawa medan listrik dan medan magnet, tetapi tidak memancarkan gelombang. Gelombang baru lahir saat muatan **dipercepat**, misalnya bergetar bolak-balik.

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.

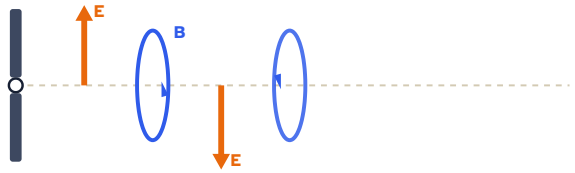
Langkah 1. Arus bolak-balik dari pemancar mendorong elektron di antena naik-turun. Ujung antena bergantian bermuatan positif dan negatif.

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

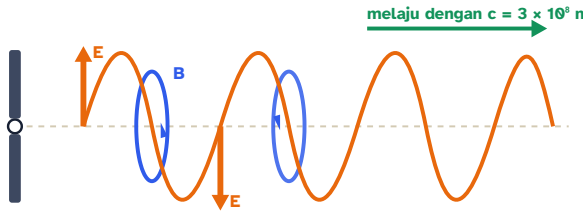
Langkah 3. Hukum Ampère–Maxwell: medan listrik yang berubah menimbulkan **medan magnet** B yang melingkar.



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



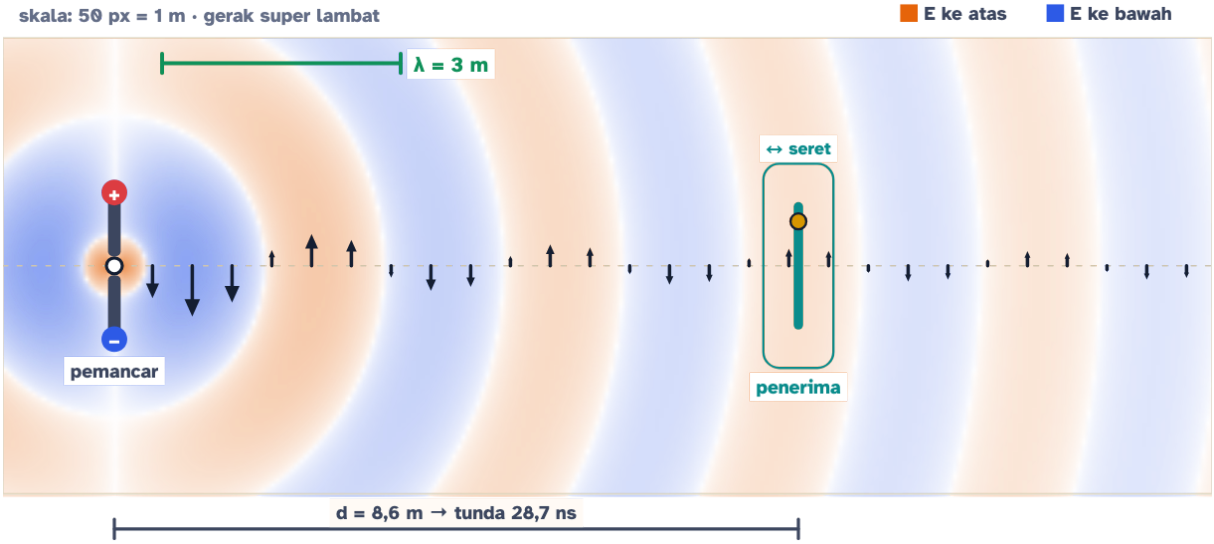
Langkah 5. Medan listrik baru itu menimbulkan medan magnet baru lagi, dan seterusnya...



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

LAB MINI **Antena pemancar: muatan bergetar melempar gelombang**

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



Panjang gelombang λ	Jarak penerima	Tunda = jarak/c
3 m	8,6 m	28,7 ns

Penerima
Elektron bergoyang (kuat medan ∝ 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 antena, 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:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\,\varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(1{,}257\times10^{-6})(8{,}854\times10^{-12})}} \approx 3{,}00\times10^{8}\ \mathrm{m/s}$$

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**

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\,\varepsilon}}$$

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

μ Permeabilitas ×10⁻⁷ T·m/A

ε Permitivitas ×10⁻¹² F/m

v Kecepatan gelombang m/s

KECEPATAN GELOMBANG

2,998 × 10⁸

m/s

Dengan μ = **12,566** × 10⁻⁷ dan ε = **8,854** × 10⁻¹², gelombang EM melaju **2,998 × 10⁸** m/s. Coba ubah ε menjadi 2,25 kali nilai awalnya (sekitar 19,92): cahaya melambat menjadi ±2 × 10⁸ m/s, seperti di dalam kaca.

Satuan Nusantara: ≈ 100% dari cahaya

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

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

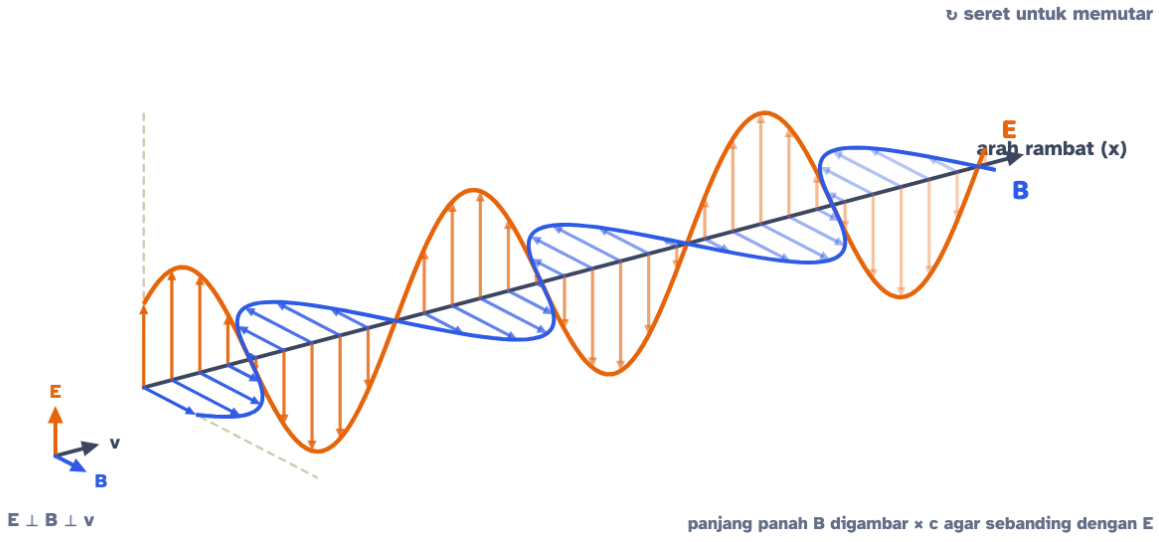
Dalam gelombang EM, medan listrik E dan medan magnet B selalu **tegak lurus** satu sama lain, dan keduanya tegak lurus arah rambat. Jadi gelombang EM adalah **gelombang transversal**. Keduanya juga **sefase**: mencapai puncak bersama, melewati nol bersama.

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

LAB MINI

Gelombang EM 3D: E dan B menari bersama

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



E_0	$B_0 = E_0/c$	E_0/B_0	Arah rambat
600 V/m	2,001 μT	$2{,}998 \times 10^8$ m/s	E × B → +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?

RUMUS HIDUP **Medan listrik dan medan magnet dalam gelombang EM**

$$E = c\,B$$

Medan listrik = kecepatan cahaya × 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.

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

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 $c = 3 \times 10^8$ m/s. Frekuensi tinggi berarti gelombang pendek, dan sebaliknya.

RUMUS HIDUP **Panjang gelombang pemancar**

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

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: ≈ 2 × tinggi Raka · ≈ 3% dari panjang lapangan sepak bola · ≈ 2% dari tinggi Monas

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

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

Jenis	Panjang gelombang	Frekuensi	Sumber	Kegunaan
Gelombang radio	> 1 m	< 3×10^8 Hz	antena pemancar	radio AM/FM, TV, HT, radio kapal
Gelombang mikro	1 mm – 1 m	3×10^8 – 3×10^{11} Hz	antena HP & BTS, magnetron	HP, Wi-Fi, oven microwave, radar, satelit
Inframerah	700 nm – 1 mm	3×10^{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

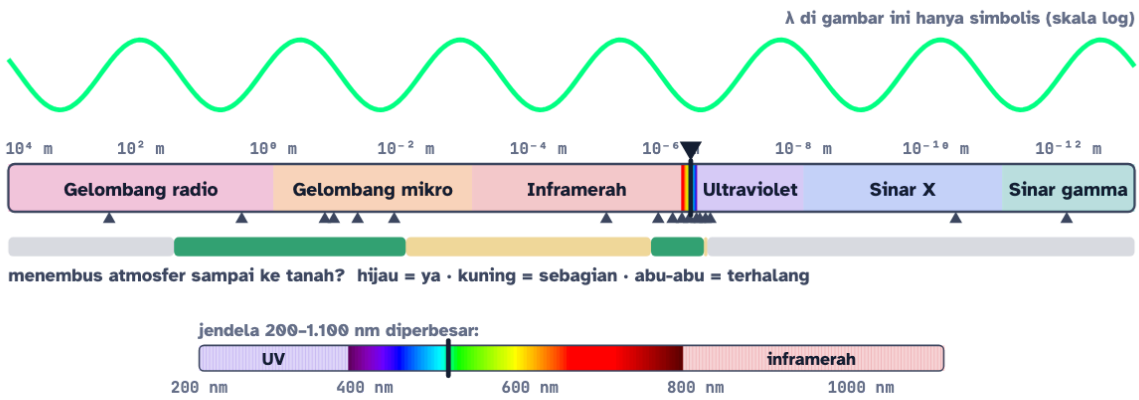
Ultraviolet (UV)	10 – 400 nm	$7{,}5 \times 10^{14}$ – 3×10^{16} Hz	Matahari, lampu UV	sterilisasi, cek uang, pembentukan vitamin D
Sinar X	0,01 – 10 nm	3×10^{16} – 3×10^{19} Hz	tabung sinar X	rontgen, CT scan, pemeriksaan bagasi
Sinar gamma	< 0,01 nm	> 3×10^{19} Hz	inti radioaktif, ledakan bintang	radioterapi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

TRIK KAK NARA: URUTAN KELUARGA

Dari gelombang terpanjang ke terpendek: **R**ajin **M**andi **I**tu **T**anda **U**ntuk e**X**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

λ = 501 nm · f = 598 THz

Ukuran pembanding: sebuah bakteri (±1 μm)

Cahaya hijau (±530 nm)

Mata manusia paling peka di sekitar warna ini.

Non-pengion: efek utamanya pada tubuh hanya pemanasan.

Panjang gelombang λ	Frekuensi f	Energi foton (Bab 28)	Jenis
501 nm	598 THz	2,474 eV	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

"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.

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.

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 ¼; jika 10 kali, tinggal 1/100. Itulah **hukum kuadrat terbalik**.

RUMUS HIDUP

Intensitas dari sumber titik

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

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

- P Daya pemancar W
- r Jarak m
- I Intensitas W/m²

INTENSITAS

$3{,}18 \times 10^{-6}$

W/m²

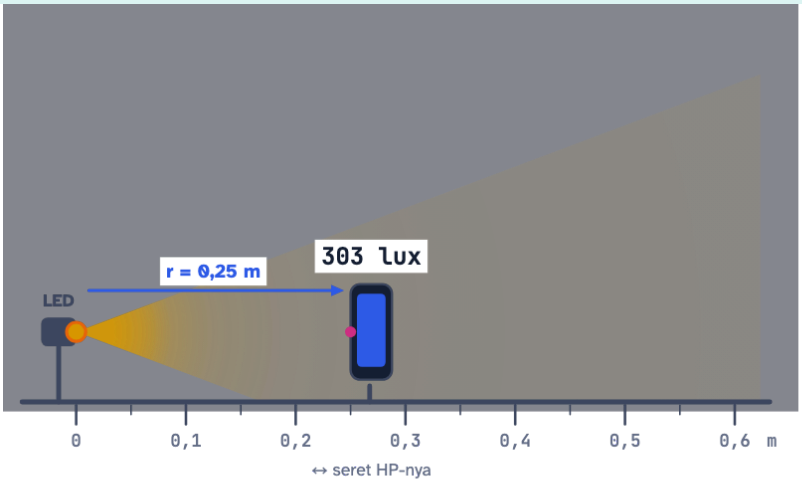
Pemancar **40** W pada jarak **1.000** m memberi intensitas **$3{,}18 \times 10^{-6}$** W/m². Bandingkan dengan sinar matahari siang: sekitar 1.000 W/m². HP tetap bisa menangkap sinyal yang miliaran kali lebih lemah!

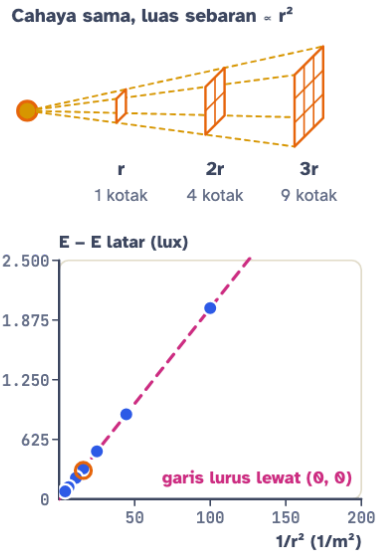
Cek satuan: $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$: joule per detik per meter persegi.

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

LAB MINI Lampu & sensor cahaya: hukum kuadrat terbalik

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





Terbaca sensor	E – E latar	(E – E latar) × r²	Kemiringan grafik 1/r²	Data tercatat
303 lux	301 lux	18,8 lux·m²	20 cd	7

Seret HP-nya menjauhi lampu. Saat jaraknya menjadi 2 kali, angka lux tinggal kira-kira ¼. 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. $\lambda = \dfrac{c}{f} = \dfrac{3{,}00 \times 10^8}{1{,}00 \times 10^8} = 3{,}0\ \text{m}.$

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

KERJAKAN BERSAMA **Daya Matahari sampai ke Bumi**

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

1. Luas bola berjari-jari jarak Bumi–Matahari: $4\pi r^2 = 4\pi(1{,}5 \times 10^{11})^2 \approx 2{,}83 \times 10^{23}\ \mathrm{m}^2$.
2. $I = \dfrac{3{,}8 \times 10^{26}}{2{,}83 \times 10^{23}} \approx 1{,}3 \times 10^3\ \mathrm{W/m^2}$.

Sekitar 1.300 W/m² (nilai terukur ±1.361 W/m²). 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:

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

COBA SENDIRI **Seberapa kuat medan listrik sinar matahari?**

Sinar matahari di permukaan Bumi berintensitas $1{,}0 \times 10^3$ W/m². Hitung amplitudo medan listrik E_0 dan medan magnet B_0-nya.

1. $E_0 = \sqrt{\dfrac{2I}{c\,\varepsilon_0}} = \sqrt{\dfrac{2 \times 1000}{(3{,}0 \times 10^8)(8{,}85 \times 10^{-12})}} = \sqrt{7{,}53 \times 10^5}$.
2. $E_0 \approx 868$ V/m.
3. $B_0 = \dfrac{E_0}{c} = \dfrac{868}{3{,}0 \times 10^8} \approx 2{,}9 \times 10^{-6}$ T $= 2{,}9\ \mu$T.

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

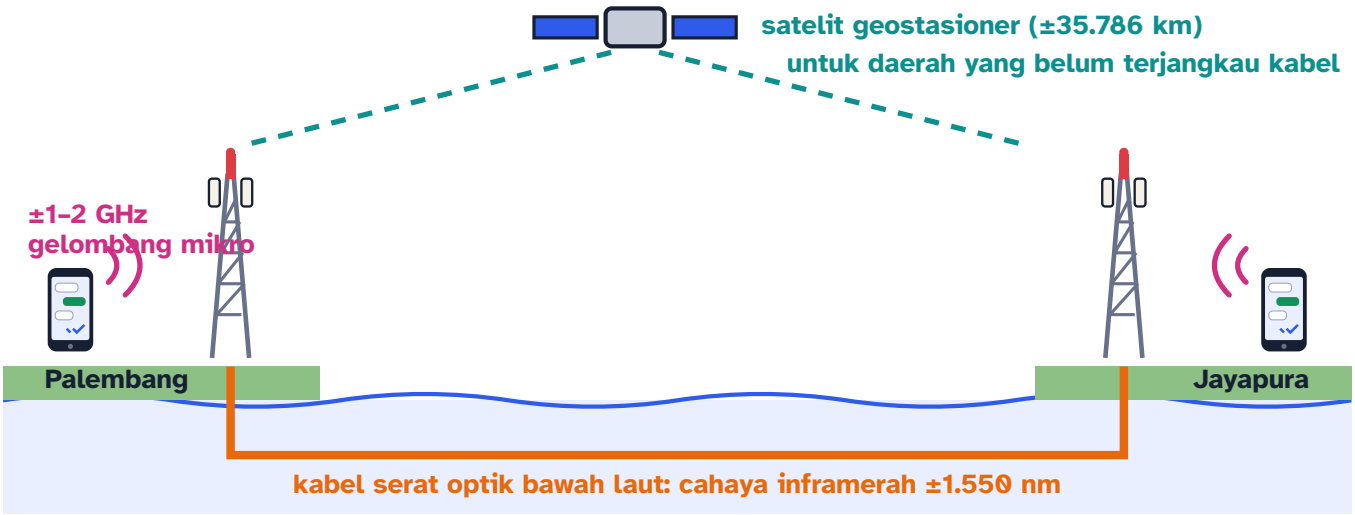
LANJUT · IB & OLIMPIADE

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/m²) yang dipantulkan cermin: $P_{\text{rad}} = 2(1361)/(3 \times 10^8) \approx 9\ \mu$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 ±200 m² 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.

KERJAKAN BERSAMA **Radar cuaca BMKG**

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

1. Pulsa menempuh jarak pergi-pulang: $2d = ct$.
2. $d = \dfrac{ct}{2} = \dfrac{(3{,}0 \times 10^8)(400 \times 10^{-6})}{2} = \dfrac{1{,}2 \times 10^5}{2} = 6{,}0 \times 10^4$ 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.

COBA SENDIRI **Telepon lewat satelit**

Sinyal telepon dari Merauke dikirim ke satelit geostasioner (tinggi ±35.786 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 $\approx 2 \times 35\,786$ km $\approx 7{,}16 \times 10^7$ m.
2. $t = \dfrac{d}{c} = \dfrac{7{,}16 \times 10^7}{3{,}0 \times 10^8} \approx 0{,}24$ s.
3. Jawaban lawan bicara menempuh perjalanan yang sama kembali, jadi jeda bolak-balik minimal ±0,48 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 memanas 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 $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$
- 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

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\,\varepsilon}}$$

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

$$E = c\,B$$

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.

BAB 28 · FISIKA MODERN

28 Kuantum: Cahaya Berbutir, Elektron Bergelombang

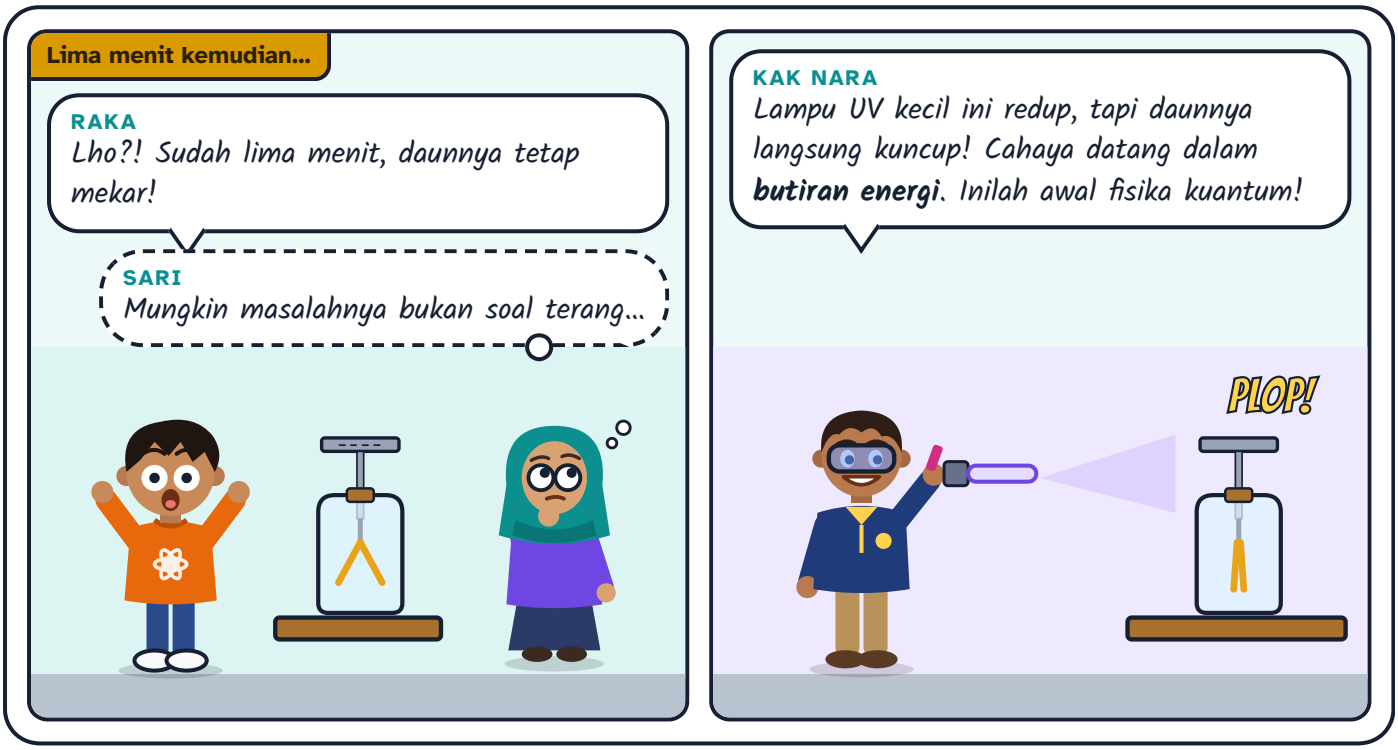
Kenapa cahaya merah seterang apa pun tidak sanggup melepaskan satu elektron dari pelat seng, sedangkan sinar UV yang redup langsung bisa? Jawabannya mengguncang fisika pada awal abad ke-20, dan kini menyalakan panel surya di atap rumah.

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



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**:

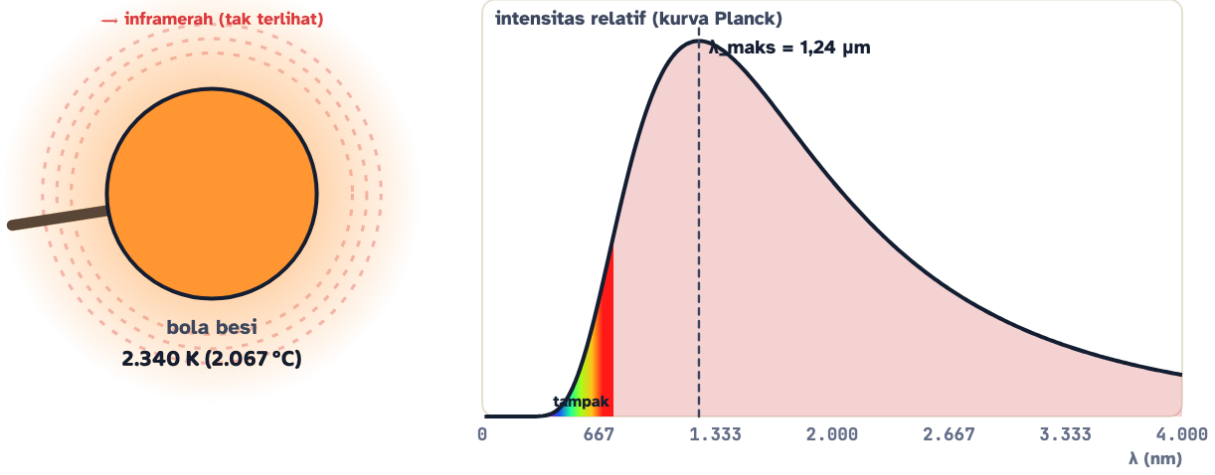
$$\lambda_{\text{maks}}\, T = 2{,}90 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,K}$$

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

LAB MINI **Panaskan besi: dari merah membara sampai putih**

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



Puncak λ_maks	Tampak berwarna	Daya pancar per m² (σT⁴)
1,24 μm	kuning-oranye	1,7 × 10⁶ W/m²

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 kuanta 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

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

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. $1\ \mathrm{eV} = 1{,}60 \times 10^{-19}$ 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: $hc = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\,s})(2{,}998 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}) = 1{,}986 \times 10^{-25}\ \mathrm{J\,m} \approx 1240\ \mathrm{eV\,nm}$

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

TRIK KAK NARA: ANGKA SAKTI 1240

Hafalkan $E\,(\mathrm{eV}) \times \lambda\,(\mathrm{nm}) \approx 1240$. 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	4×10^{-7} eV
Oven microwave	12 cm	1×10^{-5} 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. $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6{,}63 \times 10^{-34})(3{,}00 \times 10^{8})}{500 \times 10^{-9}} \approx 3{,}98 \times 10^{-19}$ J.

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

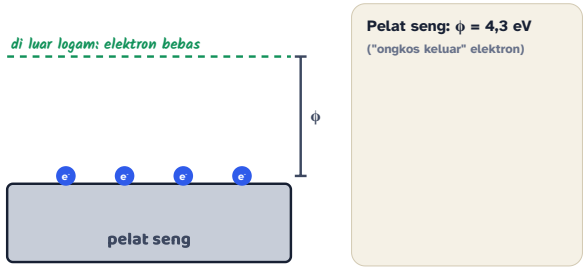
Cahaya yang mengenai logam dapat melepaskan elektron dari permukaannya. Peristiwa ini disebut **efek fotolistrik**, dan elektron yang lepas disebut **fotoelektron**. Dalam percobaan, logam dipasang di dalam tabung hampa sebagai **katode**, berhadapan dengan **anode**. Elektron yang sampai ke anode menghasilkan 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.

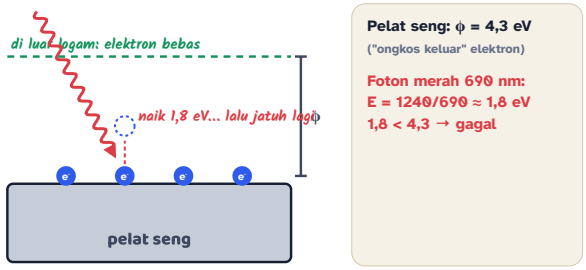
Menurut teori gelombang, cahaya terang seharusnya selalu bisa melepaskan elektron, asal ditunggu cukup lama. Einstein (1905) menjawab dengan model **foton**: setiap foton membawa energi hf dan memberikan **seluruh** energinya kepada **satu** elektron. Elektron butuh energi minimum ϕ, yang disebut **fungsi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

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

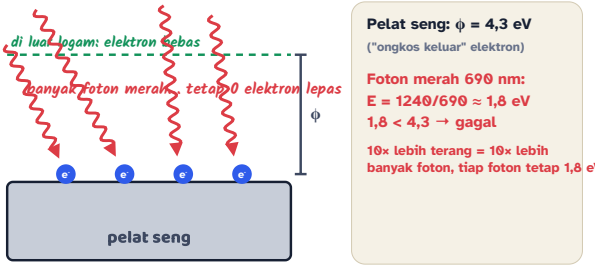
Rumus ini bercerita: hf adalah "uang saku" yang dibawa satu foton, ϕ adalah "ongkos keluar" dari logam (eV atau J), dan sisanya adalah energi kinetik elektron tercepat. Elektron yang berada lebih dalam butuh ongkos lebih besar, sehingga keluar lebih lambat. V_0 adalah **tegangan henti**: tegangan balik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



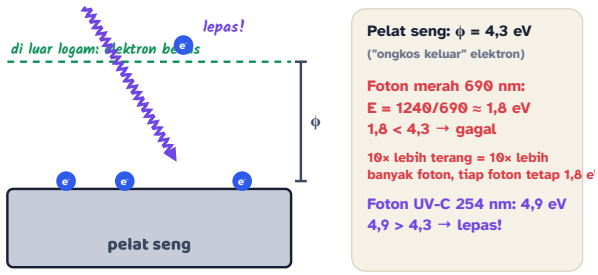
Langkah 1. Elektron di dalam pelat seng terikat. Untuk keluar, setiap elektron harus "membayar" energi minimal $\phi = 4{,}3$ eV, yaitu fungsi kerja seng.



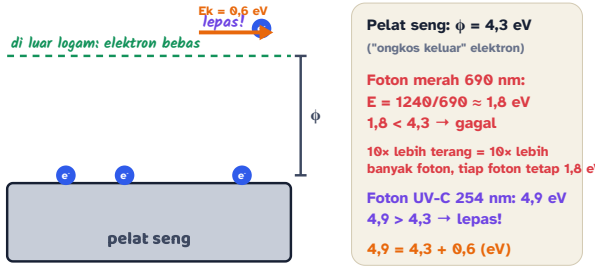
Langkah 2. Datang satu foton merah (690 nm). Energinya hanya 1,8 eV. Elektron terguncang sedikit, lalu kembali. Tidak ada yang lepas.



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!



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.



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

RUMUS HIDUP

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

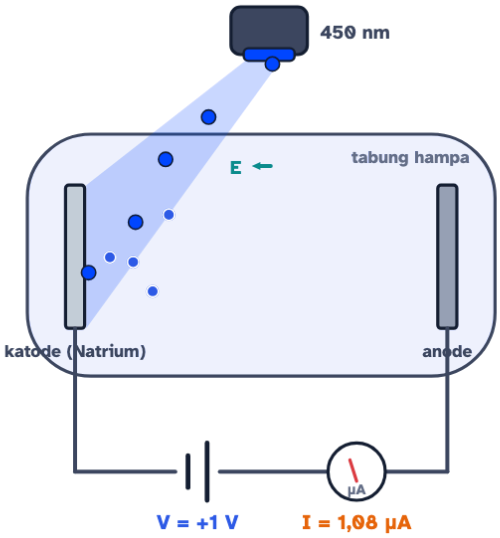
Foton **400** nm pada logam berfungsi kerja **2,3** eV menghasilkan elektron tercepat berenergi **0,8** eV, jadi tegangan hentinya **0,8** V. Kalau hasilnya 0, tidak ada elektron yang lepas!

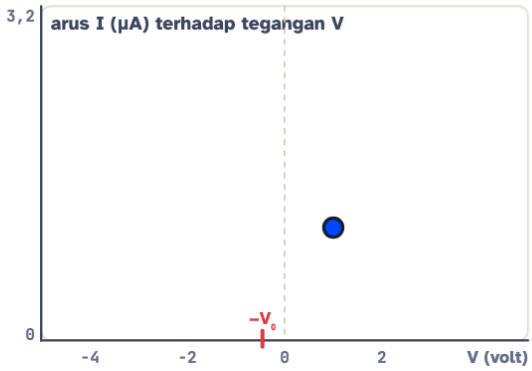
Cek satuan: $1\ \text{eV}$ adalah energi satu elektron yang dipercepat 1 volt $= 1{,}602 \times 10^{-19}$ J. Karena itu energi dalam eV sama dengan tegangan henti dalam volt.

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

LAB MINI Lab fotolistrik: warna, kecerahan, logam, dan tegangan

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





hf = 1240 / 450 = 2,76 eV

ϕ (Natrium) = 2,3 eV

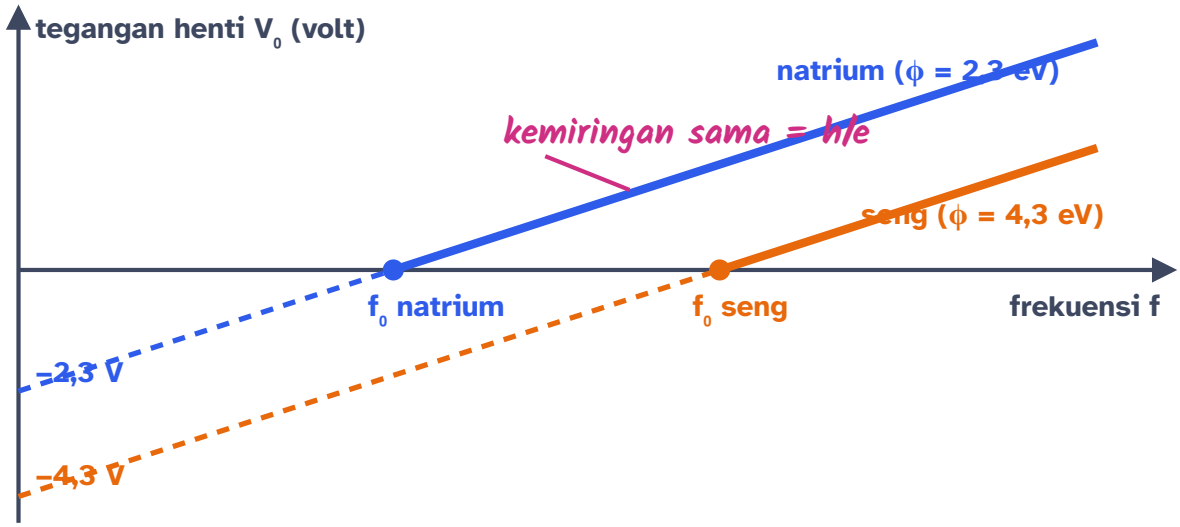
E_k maks = 2,76 − 2,3 = 0,46 eV → V_0 = 0,46 V

Energi foton hf	E_k maks	Tegangan henti V_0	Arus
2,76 eV	0,46 eV	0,46 V	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



Grafik 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 ≠ 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 ($\phi = 2{,}3$ eV). Tentukan energi kinetik maksimum fotoelektron, tegangan hentinya, dan kecepatan elektron tercepat.

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

$E_{k,\text{maks}} = 0{,}80$ **eV,** $V_0 = 0{,}80$ **V, dan** $v_{\text{maks}} \approx 530$ **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."

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.

MITOS

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

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".

LANJUT · IB & OLIMPIADE

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.

RUMUS HIDUP

Panjang gelombang de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{m\,v}$$

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.

Cek satuan: $\dfrac{\mathrm{J\,s}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m/s}} = \dfrac{\mathrm{kg\,m^2\,s^{-1}}}{\mathrm{kg\,m\,s^{-1}}} = \mathrm{m}$

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

Tebak Dulu!

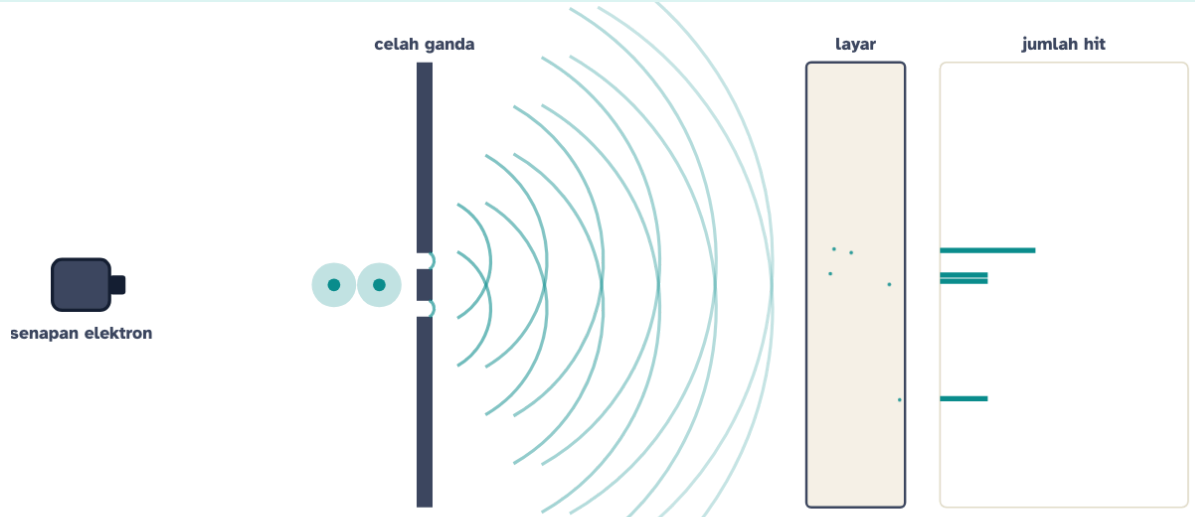
Elektron ditembakkan satu per satu ke dinding bercelah dua. Setiap elektron meninggalkan satu titik di layar. Setelah ribuan elektron, pola apa yang tampak di layar?

- 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 λL/d = 3,66 μm (diperbesar).

λ elektron (non-relativistik)	Jarak antarpita (L = 1 m)	Jumlah hit	Pola
5,48 pm	3,66 μm	5	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 $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{2m_e eV}} \approx \dfrac{1{,}23}{\sqrt{V}}$ 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 $\theta \approx 51°$. Mereka mengukur $50°$. Cocok! Sifat gelombang juga berarti posisi dan momentum tidak bisa diketahui tepat bersamaan: $\Delta x\, \Delta p \geq \dfrac{h}{4\pi}$ (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.

COBA SENDIRI **Mikroskop elektron 50 kV**

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: $E_k = eV = (1{,}60 \times 10^{-19})(5{,}0 \times 10^4) = 8{,}0 \times 10^{-15}$ J.
2. Momentum: $p = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{2(9{,}11 \times 10^{-31})(8{,}0 \times 10^{-15})} \approx 1{,}21 \times 10^{-22}$ kg·m/s.
3. $\lambda = h/p = 6{,}63 \times 10^{-34}/1{,}21 \times 10^{-22} \approx 5{,}5 \times 10^{-12}$ m $= 5{,}5$ pm.
4. Perbandingan: $530\ \mathrm{nm}/5{,}5\ \mathrm{pm} \approx 10^5$. Gelombang elektron sekitar seratus ribu kali lebih pendek.
5. Bola tenis: $\lambda = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34}}{0{,}058 \times 50} \approx 2{,}3 \times 10^{-34}$ m, jauh lebih kecil daripada inti atom.

$\lambda_{\text{elektron}} \approx 5{,}5$ **pm (dengan koreksi relativitas sedikit lebih kecil, ±5,4 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 fotovoltaik**, 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%.

COBA SENDIRI **Hujan foton di atap**

Sinar matahari siang berintensitas 1.000 W/m². Anggap panjang gelombang rata-rata fotonnya 600 nm. (a) Berapa foton yang menimpa 1 m² setiap detik? (b) Panel surya 1,7 m² berefisiensi 20%. Berapa daya listriknya?

1. Energi satu foton: $E = 1240/600 \approx 2{,}07$ eV $= 3{,}31 \times 10^{-19}$ J.
2. Jumlah foton: $N = \dfrac{1000}{3{,}31 \times 10^{-19}} \approx 3{,}0 \times 10^{21}$ foton per detik per m².
3. Daya listrik panel: $P = 0{,}20 \times 1000 \times 1{,}7 = 340$ W.

Sekitar tiga ribu miliar miliar foton menghujani setiap meter persegi atap setiap detik! Satu panel 1,7 m² 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."

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.

MITOS

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

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 · kuanta · tetapan Planck · elektronvolt · efek fotolistrik · fungsi kerja · tegangan henti · gelombang materi · dualisme gelombang-partikel · mikroskop elektron · efek fotovoltaik

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.

$$\lambda = \frac{h}{m\,v}$$

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

⚠️ **Jangan sampai terjebak**

- Intensitas ≠ 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.

BAB 29 · FISIKA MODERN

29 Membongkar Atom: dari Roti Kismis ke Tangga Cahaya

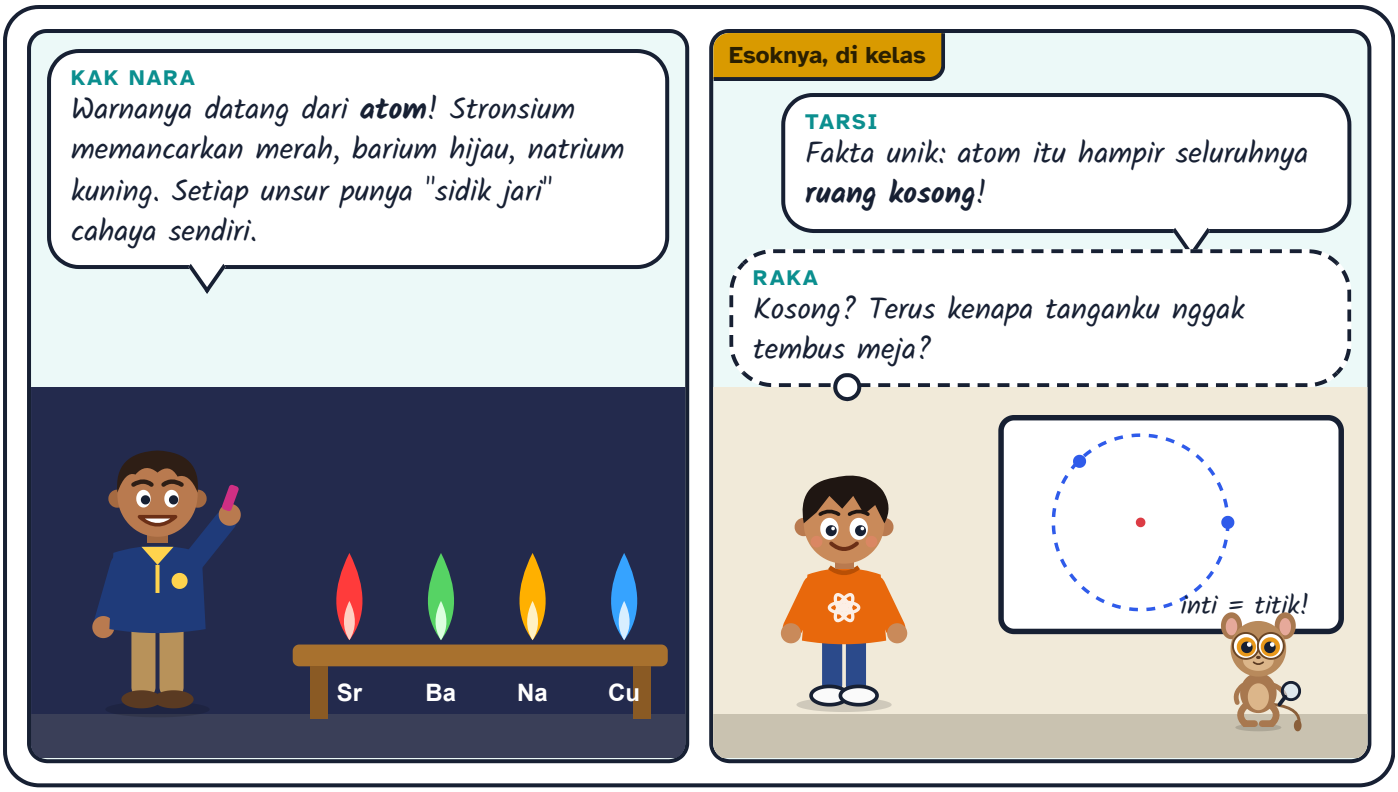
Kenapa lampu jalan sodium berwarna kuning, sedangkan kembang api bisa merah, hijau, dan biru? Jawabannya tersembunyi di dalam atom, benda super kecil yang ternyata hampir seluruhnya ruang kosong.

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



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!

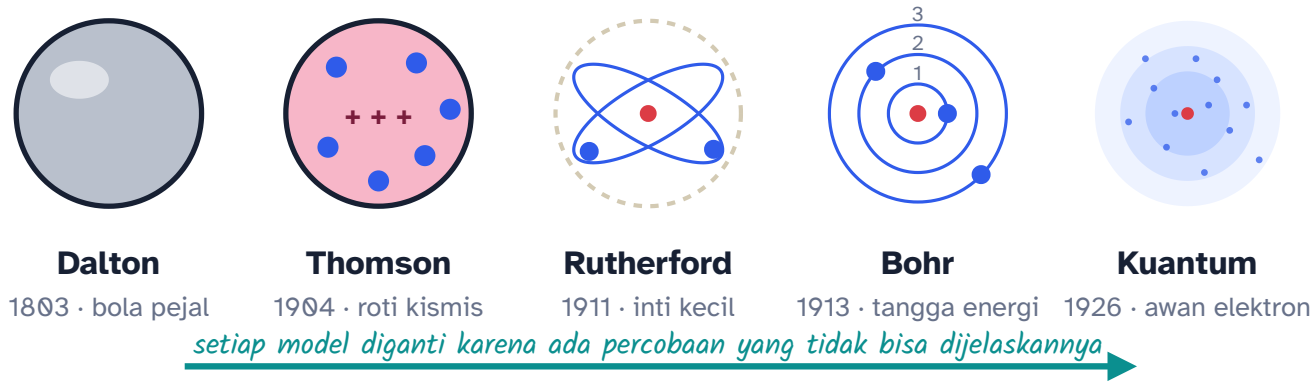
29.1 Thomson: atom seperti roti kismis

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.



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 1/1.836 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 selembar kertas tisu, lalu pelurunya berbalik dan mengenai si penembak! Model roti kismis tidak mungkin menghasilkan pantulan seperti itu.

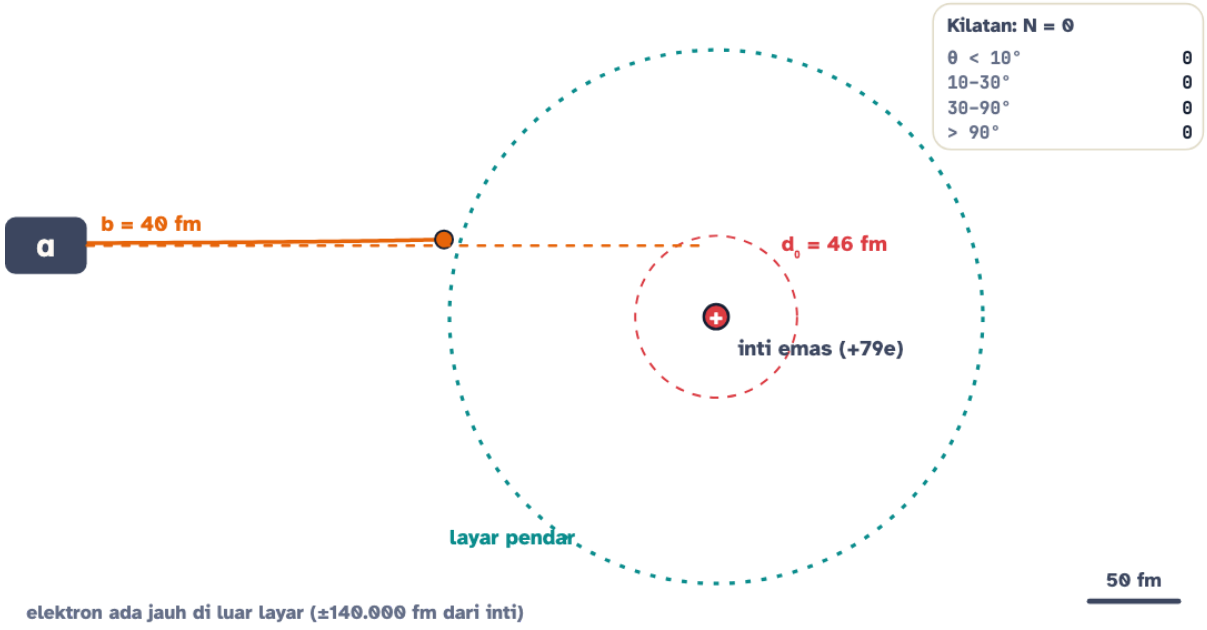
Tahun 1911, Rutherford menarik tiga kesimpulan dari hasil itu:

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.

LAB MINI Tembak inti atom dengan partikel alfa

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-29



Jarak bidik b	Sudut belok θ	Jarak terdekat ke inti	Memantul (θ > 90°)
40 fm	59,3°	69 fm	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**!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

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:

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

Trik hitung cepat: $ke^2 = 1{,}44$ MeV·fm (1 fm = 10^{-15} m). Untuk alfa 5 MeV dan emas ($Z = 79$): $d_0 = 2 \times 79 \times 1{,}44/5 \approx 46$ fm, lebih besar dari jari-jari inti emas (±7 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 kuanta 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 $h/2\pi$: $mvr = n\dfrac{h}{2\pi}$, dengan $n = 1, 2, 3, \ldots$ 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.

RUMUS HIDUP

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.

- n Tingkat (bilangan kuantum utama)
- Z Nomor atom (ion berelektron tunggal)
- E_n Energi elektron eV

ENERGI ELEKTRON

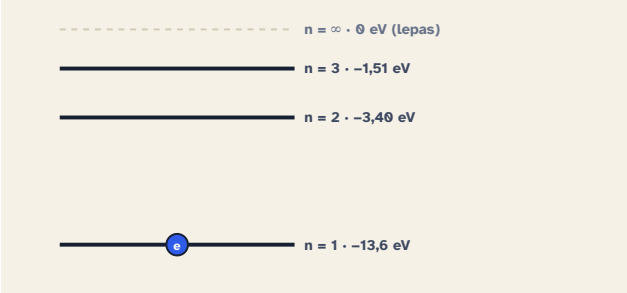
-3,4

eV

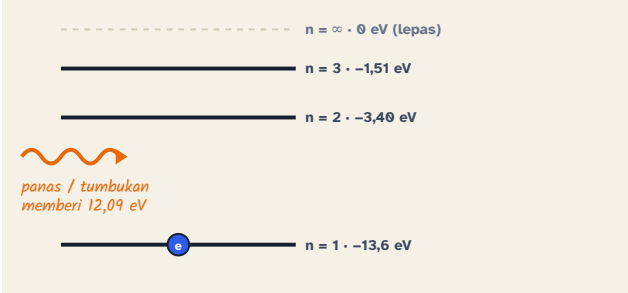
Elektron di tingkat n = **2** (Z = **1**) memiliki energi **-3,4** eV. Untuk melepaskannya dari atom (ionisasi) diperlukan energi sebesar nilai itu tanpa tanda minus.

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

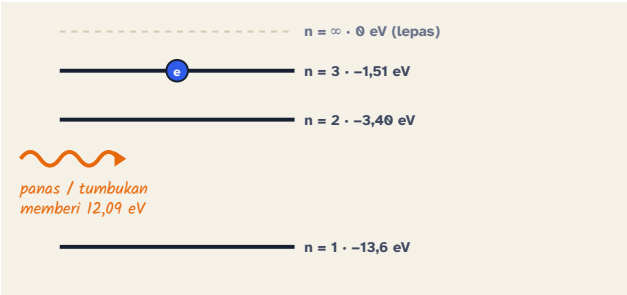
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-BOHR-ENERGI



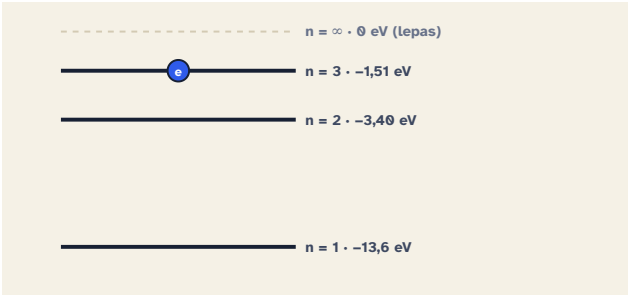
Langkah 1. Atom hidrogen dalam **keadaan dasar**: elektron di tingkat $n = 1$, energinya $-13{,}6$ eV. Ia senang di sini dan tidak memancarkan apa-apa.



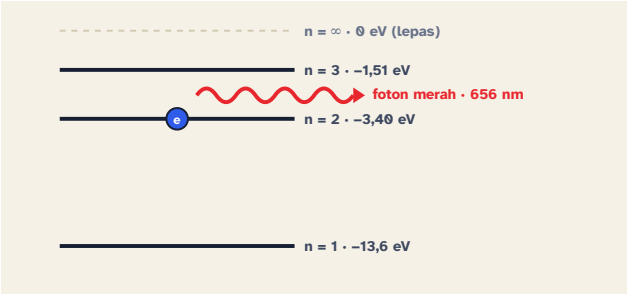
Langkah 2. Atom dipanaskan atau ditabrak atom lain. Datang "paket energi" sebesar $-1{,}51 - (-13{,}6) = 12{,}09$ eV.



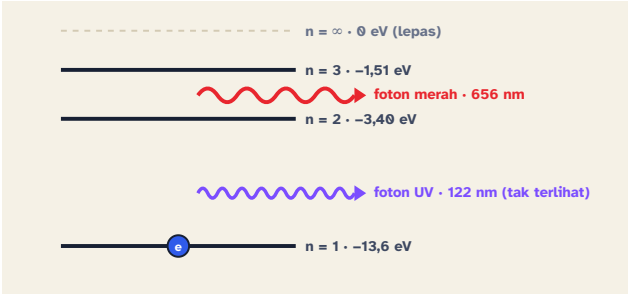
Langkah 3. Elektron menyerap energi itu dan **melompat** ke tingkat $n = 3$. Atom kini dalam **keadaan tereksitasi**.



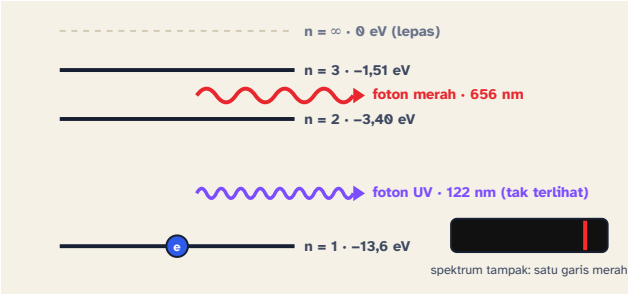
Langkah 4. Keadaan tereksitasi tidak betah lama. Biasanya dalam sekitar seperseratus juta detik, elektron akan turun lagi.



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 → 620 nm (oranye-merah). Foton 3 eV → 413 nm (ungu). Foton 10 eV → 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. $E_2 = -\frac{13{,}6}{2^2} = -\frac{13{,}6}{4} = -3{,}4$ eV.
2. Elektron lepas (terionisasi) jika energinya mencapai 0 eV. Energi yang perlu ditambahkan: $0 - (-3{,}4) = 3{,}4$ eV.

$E_2 = -3{,}4$ 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 → 2**

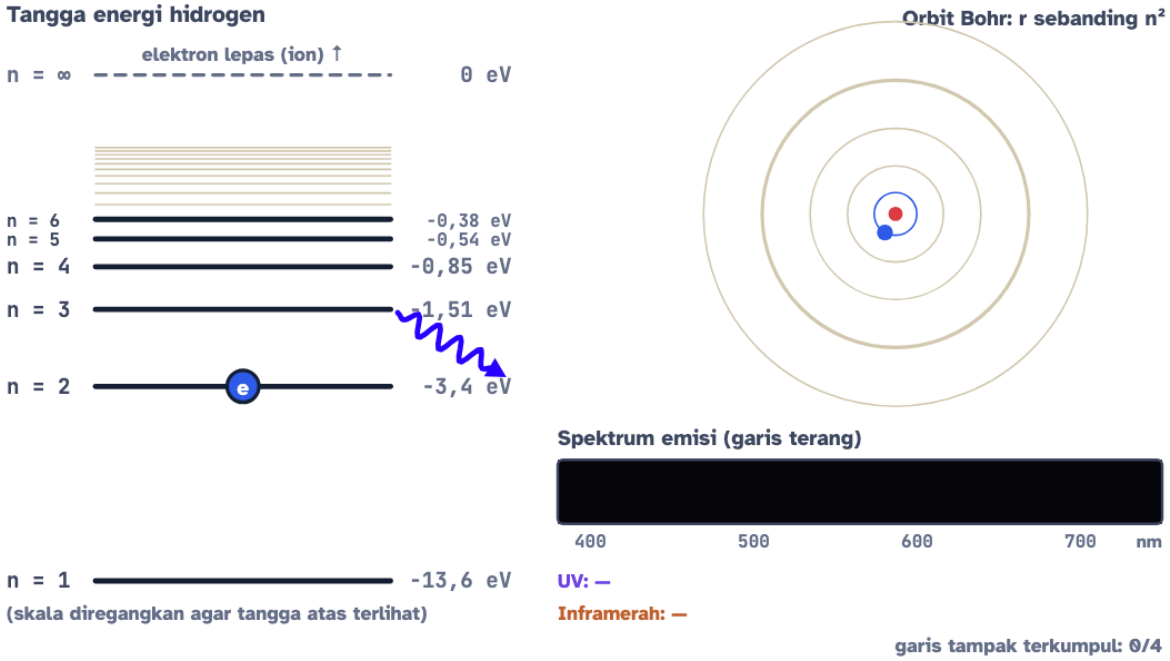
Elektron atom hidrogen turun dari $n = 3$ ke $n = 2$. Hitung energi dan panjang gelombang foton yang dipancarkan. Apa warnanya?

1. $E_3 = -13{,}6/9 = -1{,}51$ eV dan $E_2 = -3{,}40$ eV.
2. Energi foton: $\Delta E = E_3 - E_2 = -1{,}51 - (-3{,}40) = 1{,}89$ eV.
3. Pakai angka sakti: $\lambda = 1240/1{,}89 \approx 656$ nm.

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

LAB MINI Tangga energi Bohr: lompat, pancarkan, kumpulkan garis

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-29



Lompatan	Energi foton	Panjang gelombang	Deret	Warna
n = 5 → n = 2	2,86 eV	434,1 nm	Balmer (dipancarkan)	biru keunguan

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:

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

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.

RUMUS HIDUP

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.

- 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→3, 4→2, 4→1, 3→2, 3→1, 2→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 → 1.
3. $\Delta E = 13{,}6\left(1 - \frac{1}{16}\right) = 13{,}6 \times \frac{15}{16} = 12{,}75$ eV.
4. $\lambda = 1240/12{,}75 \approx 97{,}3$ nm.

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

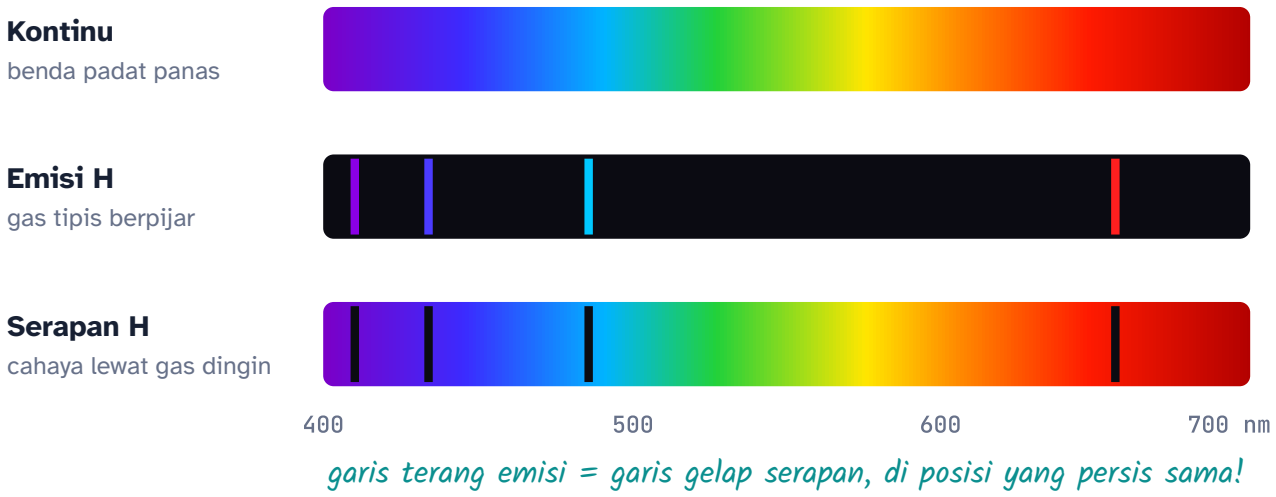
$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{mke^2} = n^2 a_0, \qquad a_0 \approx 0{,}0529 \text{ nm},$$

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

Kecepatan elektron di orbit pertama $v_1 = \alpha c \approx 2{,}19 \times 10^6$ 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:



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

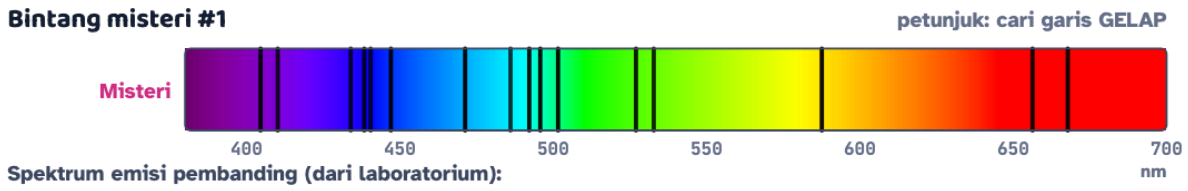
FISIKA INDONESIA

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 cokelat 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.

LAB MINI

Detektif spektrum: unsur apa di bintang itu?

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-29



← *centang unsur di bawah kanvas untuk menampilkan sidik jarinya*

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."

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.

MITOS

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

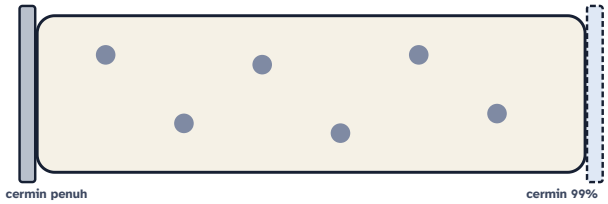
FAKTA

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.

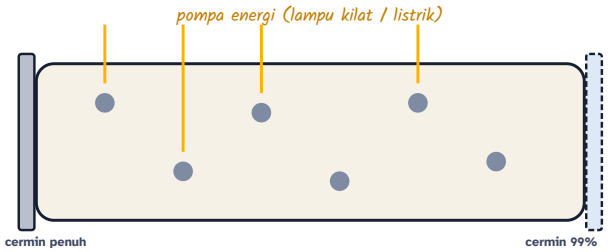
29.6 Laser: pasukan foton kembar

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**.

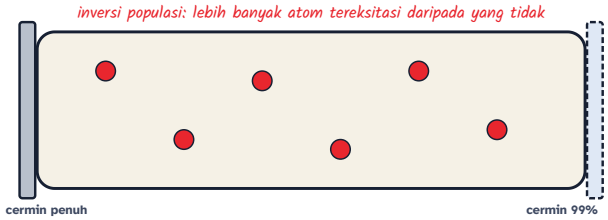
LASER adalah singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, artinya penguatan cahaya lewat emisi terstimulasi. Laser pertama dibuat Theodore Maiman pada tahun 1960 dari kristal batu delima (rubi) dan memancarkan cahaya merah 694 nm.



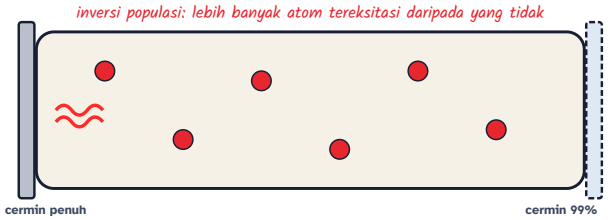
Langkah 1. Di dalam tabung laser ada banyak atom (abu-abu = keadaan dasar). Kedua ujung tabung dipasangi cermin. Cermin kanan sedikit tembus cahaya.



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

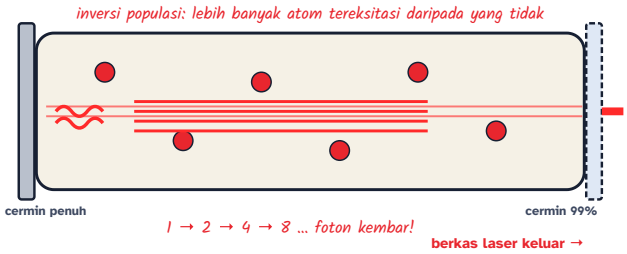


Langkah 3. Atom tertahan di tingkat tereksitasi yang agak "awet" (tingkat *metastabil*). Kini atom yang tereksitasi lebih banyak daripada yang tidak. Keadaan langka ini disebut **inversi populasi**.



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 longsoran: 1, 2, 4, 8, ...



Langkah 6. Cermin memantulkan foton bolak-balik sehingga longsoran 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 ±0,00000084 nm!

Cek satuan: 1 nm = 10^{-9} 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

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 mengilap 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!

BAB 30 · FISIKA MODERN

30 Relativitas Khusus: Saat Waktu Bisa Melar

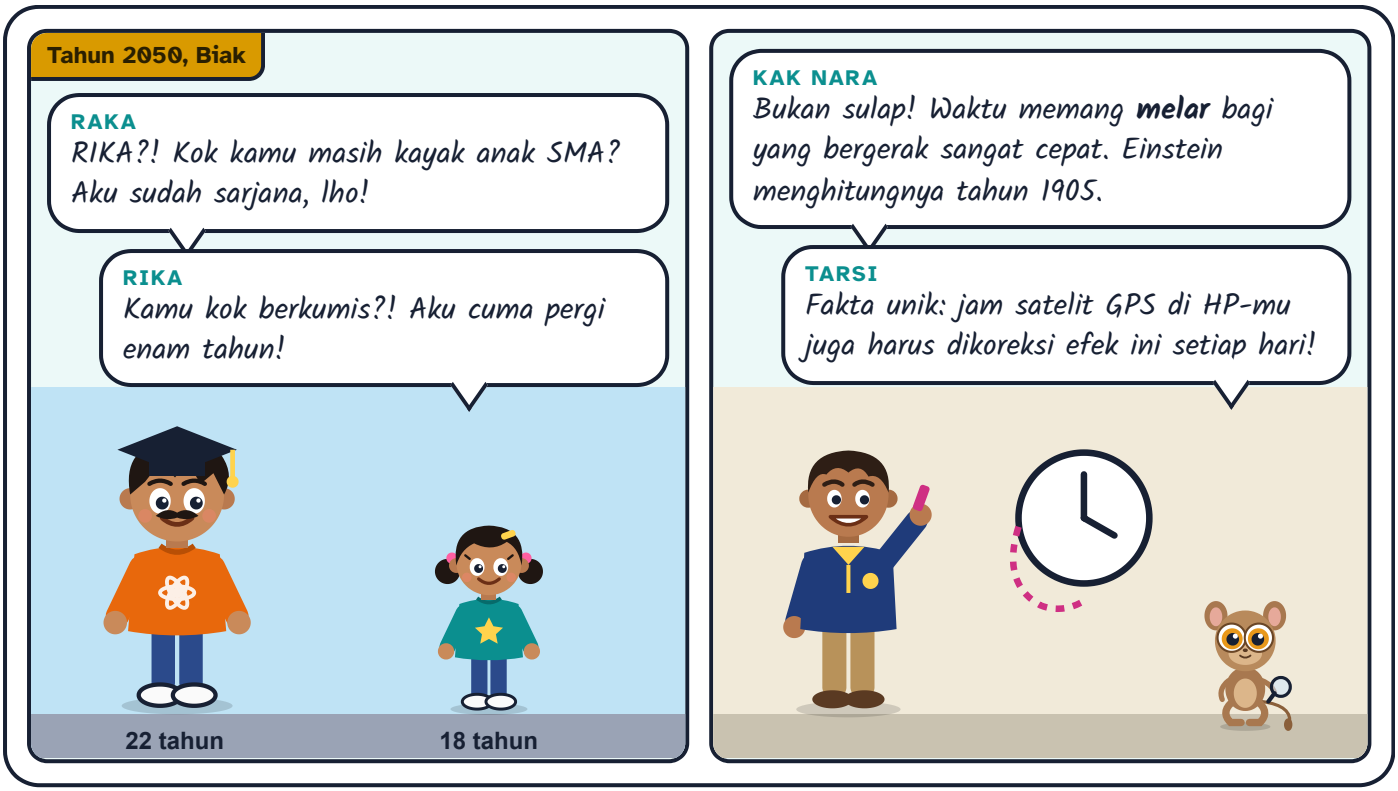
Dua anak kembar berpisah. Yang satu terbang ke bintang dengan roket super cepat, yang lain tetap di Bumi. Saat bertemu lagi, usia mereka berbeda! Ini bukan cerita fiksi ilmiah, melainkan akibat langsung dari satu fakta aneh tentang cahaya.

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



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 $c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} \approx 3 \times 10^8$ 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 seberkas 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.

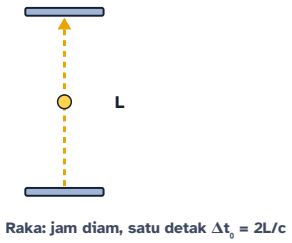
AWAS JEBAKAN: "RELATIVITAS" BUKAN BERARTI "SEMUANYA RELATIF"

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".

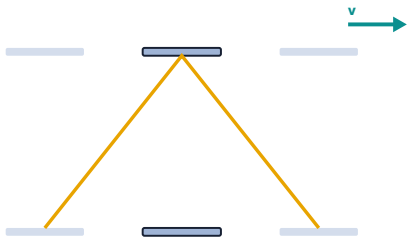
30.3 Dilatasi waktu: jam cahaya di kereta super cepat

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 $\Delta t_0 = 2L/c$.

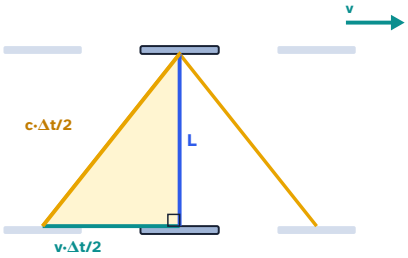
Sekarang Sari melihat kereta itu melaju dengan kecepatan v. Ikuti animasinya untuk melihat apa yang dilihat Sari.



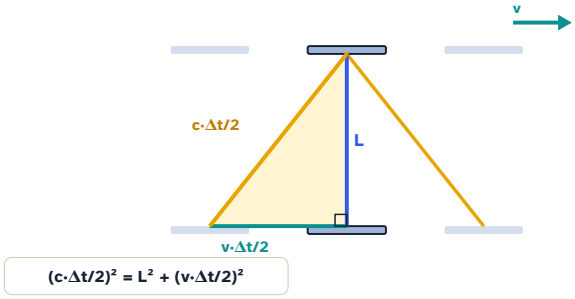
Langkah 1. Di kereta, Raka melihat foton naik-turun lurus sejauh L. Satu detak: $\Delta t_0 = 2L/c$. Waktu yang diukur oleh jam yang diam terhadap pengamatnya disebut **waktu diri** (*proper time*).



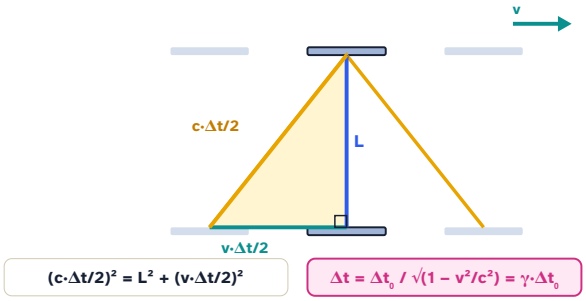
Langkah 2. Sari di peron melihat kereta bergerak. Selama foton naik dan turun, cermin sudah bergeser ke kanan. Jadi menurut Sari, foton menempuh lintasan **miring** berbentuk zigzag.



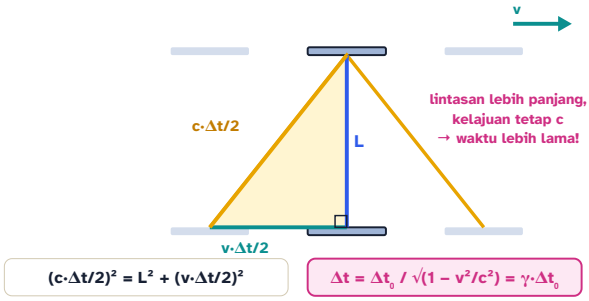
Langkah 3. Ambil setengah detak (menurut Sari lamanya $\Delta t/2$). Terbentuk segitiga siku-siku: alasnya jarak geser kereta $v\,\Delta t/2$, tingginya L, dan sisi miringnya jarak tempuh foton $c\,\Delta t/2$. Ingat: menurut Sari pun, foton tetap melaju c!



Langkah 4. Pakai teorema Pythagoras pada segitiga itu.



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



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.

RUMUS HIDUP **Faktor Lorentz**

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

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

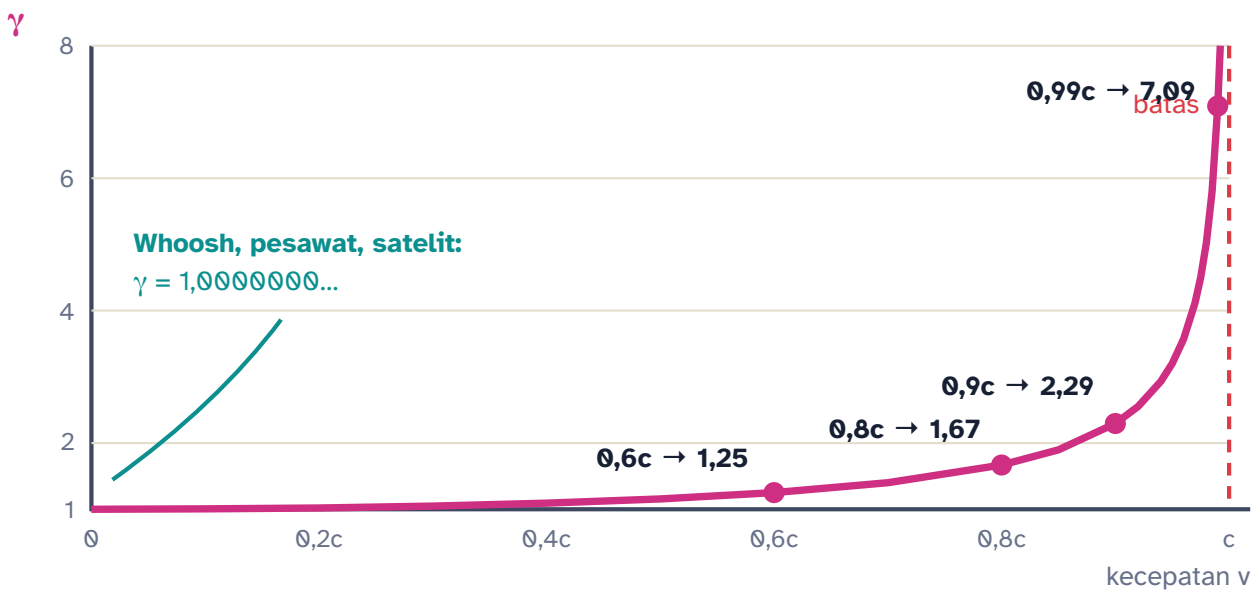
FAKTOR LORENTZ

1,667

Pada v = **0,8**c, γ = **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.

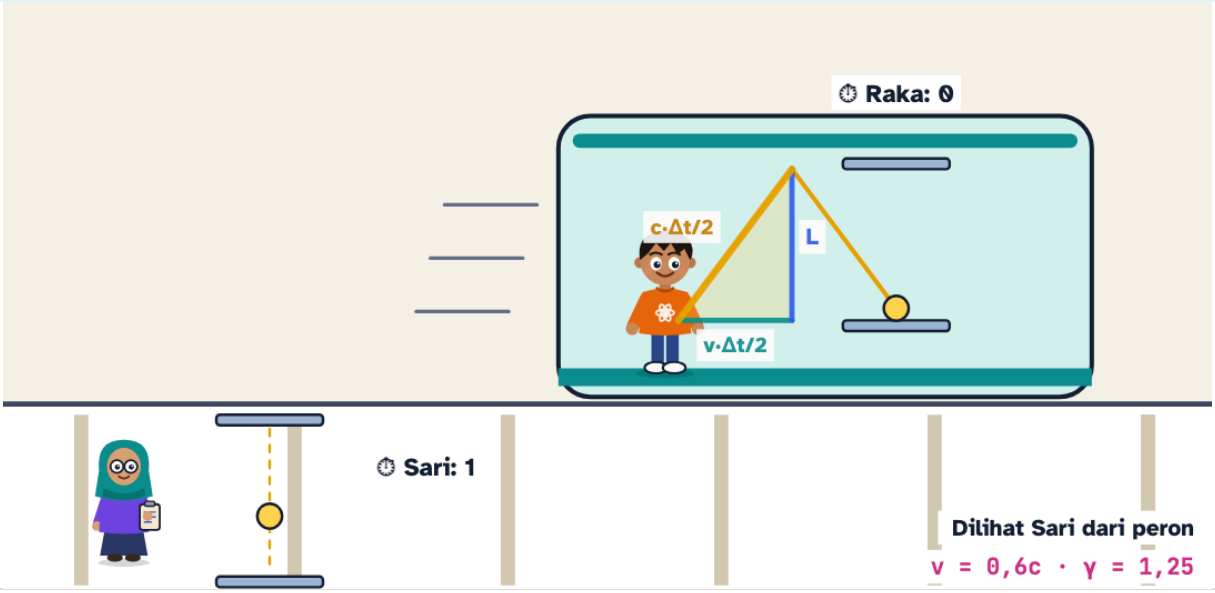
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-GAMMA



Faktor Lorentz γ hampir datar di angka 1 sampai sekitar separuh kecepatan cahaya, lalu melesat ke tak hingga saat $v \to c$.

LAB MINI **Jam cahaya di kereta super cepat**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-30



Faktor γ	Detak jam Sari	Detak jam Raka	Periode jam yang bergerak
1,25	1 detak	0 detak (jamnya 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**.

RUMUS HIDUP **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).

- 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

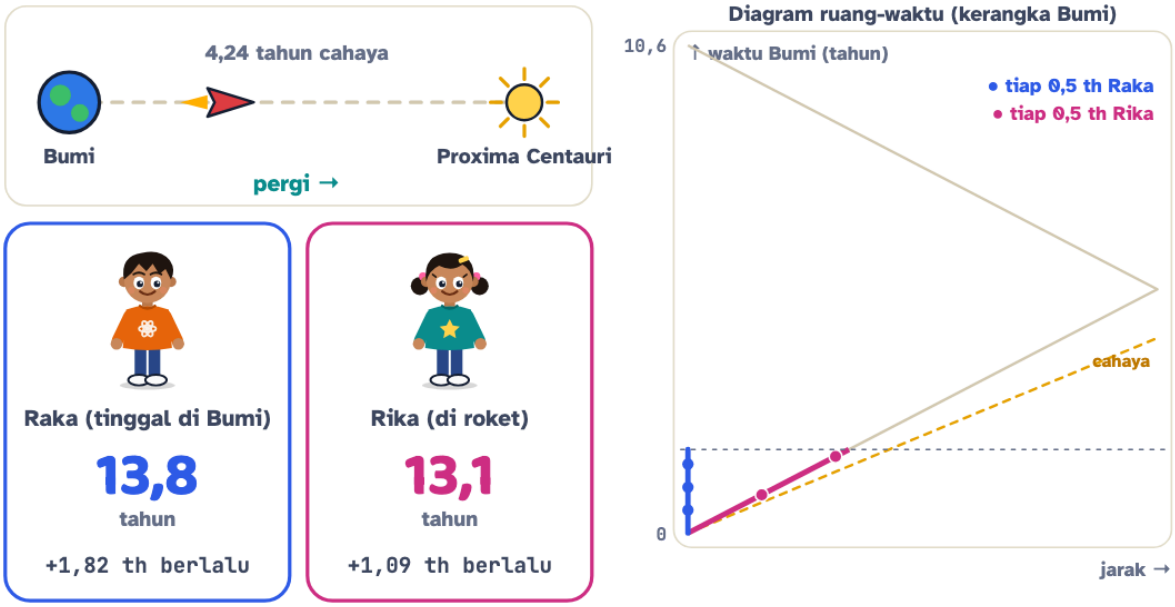
Rika mengalami **6** tahun di roket berkecepatan **240.000** km/s. Di Bumi, Raka mengalami **10,0123** tahun.

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

LAB MINI **Perjalanan si kembar ke bintang**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-30



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?

KERJAKAN BERSAMA **Usia si kembar sepulang dari Proxima**

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 ±22,6 tahun, Rika ±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".

RUMUS HIDUP **Kontraksi panjang**

$$L = L_0\sqrt{1-\beta^2}$$

Panjang benda yang bergerak terukur lebih pendek, dengan faktor 1/γ, 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 **0,6**c terukur hanya **160** m oleh pengamat di peron.

Satuan Nusantara: ≈ 1,2 × tinggi Monas · ≈ 1,5 × panjang lapangan sepak bola · ≈ 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

KERJAKAN BERSAMA **Kereta 200 meter**

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. $L = 200 \times 0{,}8 = 160$ m.

160 m. Penumpang di dalam kereta tetap mengukur keretanya 200 m. Justru merekalah yang melihat peron memendek!

LANJUT · IB & OLIMPIADE

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:

$$x' = \gamma(x - vt), \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right).$$

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 ≠ 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:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \dfrac{u'v}{c^2}}.$$

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 ±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.

COBA SENDIRI **Dua pesawat saling menjauh**

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 (9×10^{16} m²/s²), massa sedikit saja setara dengan energi raksasa. Satu gram massa setara 9×10^{13} J, kira-kira 25 juta kWh. Itu cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik belasan ribu rumah selama setahun!

RUMUS HIDUP **Kesetaraan massa dan energi**

$$E = m\,c^2$$

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: ≈ 21 × 1 ton TNT · ≈ 2.643 × 1 liter bensin

Cek satuan: $\mathrm{kg} \cdot (\mathrm{m/s})^2 = \mathrm{kg\,m^2/s^2} = \mathrm{J}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI 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 $v \to c$, $\gamma \to \infty$, 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.

KERJAKAN BERSAMA **Energi dari satu gram**

Hitung energi yang setara dengan massa 1 gram, dalam joule dan dalam kWh (1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J).

1. $m = 1$ g $= 1 \times 10^{-3}$ kg.
2. $E = mc^2 = 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13}$ J.
3. $E = 9 \times 10^{13} / 3{,}6 \times 10^6 = 2{,}5 \times 10^7$ kWh.

9×10^{13} 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 $p = \gamma m v$. 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."

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).

MITOS

"Kalau terus didorong, roket akhirnya bisa melewati kecepatan cahaya."

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 μs

di mata kita: 34,8 μs

jam muon melambat ×γ

Faktor γ	Jarak rata-rata sebelum meluruh	Ramalan sampai tanah	Hasil simulasi
15,82	10,4 km	23,6 %	0 dari 6 (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 ±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

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

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/γ, hanya pada arah geraknya.

$$E = m\,c^2$$

Kesetaraan massa dan energi. Massa dan energi adalah dua wujud dari hal yang sama. Kurs tukarnya 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.

BAB 31 · FISIKA MODERN

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 $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ 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 TENGKORAK INI?

KOMIK · 4 PANEL

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 ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$:

- Z = **nomor atom** = jumlah proton. Nilai ini menentukan jenis unsur.
- A = **nomor massa** = jumlah proton + neutron.
- Jumlah neutron $N = A - Z$.

Contoh: ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ 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	${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$
Isobar	nomor massa A	${}^{14}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$

Isoton	jumlah neutron N	${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$ (keduanya 7 neutron)

TRIK KAK NARA: P-B-N

Iso**top** → proton sama (huruf **p**). Iso**bar** → nomor **massa** sama (bayangkan "barbel" yang berat). Iso**ton** → **n**eutron sama (huruf **n**).

Jari-jari inti kira-kira $R \approx 1{,}2\ \mathrm{fm} \times A^{1/3}$. Artinya volume inti sebanding dengan jumlah nukleonnya: nukleon tersusun rapat seperti kelereng dalam kantong. Akibatnya, kerapatan semua inti hampir sama, yaitu sekitar $2{,}3 \times 10^{17}$ kg/m³. 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.

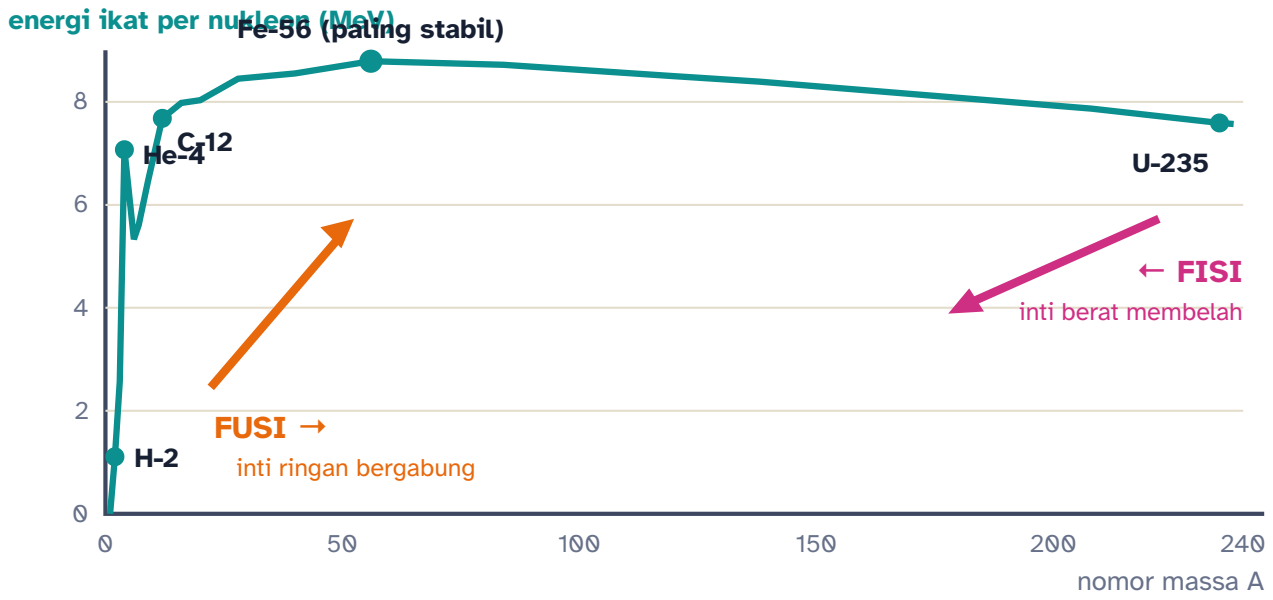
Timbanglah inti helium-4 dengan sangat teliti. Massanya **lebih kecil** daripada jumlah massa 2 proton dan 2 neutron penyusunnya! Selisihnya disebut **defek massa** Δm. Massa itu tidak hilang. Ia berubah menjadi energi yang dilepaskan saat nukleon bergabung, sesuai $E = \Delta m\, c^2$ dari Bab 30. Energi 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: $2(1{,}007276) + 2(1{,}008665) = 4{,}031882$ u.
2. Defek massa: $\Delta m = 4{,}031882 - 4{,}001506 = 0{,}030376$ u.
3. Energi ikat: $E = 0{,}030376 \times 931{,}5 \approx 28{,}3$ MeV.
4. Per nukleon: $28{,}3/4 \approx 7{,}07$ MeV.

$\Delta m = 0{,}0304$ **u, energi ikat 28,3 MeV, atau 7,07 MeV per nukleon. Sebagai pembanding, memutus ikatan kimia hanya butuh beberapa eV. Energi inti jutaan kali lebih besar!**



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 c² 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

$4{,}28 \times 10^8$

J

1×10^{20} reaksi, masing-masing kehilangan **0,029** u, melepaskan energi **$4{,}28 \times 10^8$** J.

Satuan Nusantara: ≈ 10% dari 1 ton TNT · ≈ 13 × 1 liter bensin · ≈ 119 × 1 kWh token listrik

Cek satuan: 1 u × c^2 = $1{,}66 \times 10^{-27}$ kg × $(3 \times 10^8)^2 \approx 1{,}49 \times 10^{-10}$ J ≈ 931,5 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).

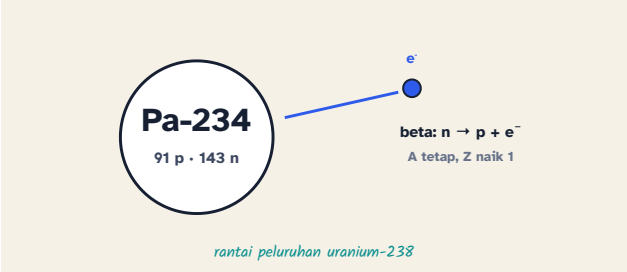
Sinar	Sebenarnya	Muatan	Daya ionisasi	Daya tembus	Dihentikan oleh
Alfa α	inti helium ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$	+2	sangat kuat	sangat lemah: ±4 cm di udara	selembar kertas, kulit luar
Beta β^-	elektron cepat ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$	–1	sedang	sedang: beberapa meter di udara	aluminium beberapa mm
Gamma γ	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:** ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\alpha$. Contoh: ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\alpha$.
- **Peluruhan beta minus:** sebuah neutron berubah menjadi proton dan elektron (plus antineutrino yang nyaris tak terdeteksi): ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}$. Contoh: ${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}$.
- **Peluruhan gamma:** inti yang "kelebihan energi" melepaskan foton tanpa berubah jenis: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}^* \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + \gamma$.

Langkah 1. Uranium-238 adalah inti besar yang tidak stabil. Waktu paruhnya 4,5 miliar tahun, kira-kira seumur Bumi.

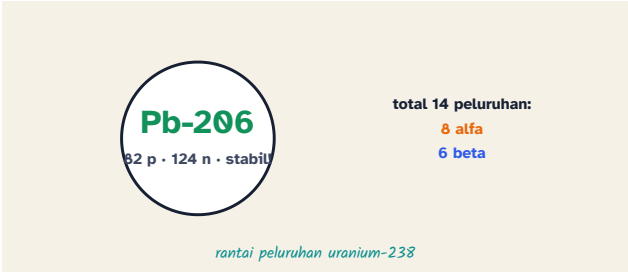
Langkah 2. Peluruhan alfa: U-238 melepaskan partikel alfa (2 proton + 2 neutron). Nomor massa turun 4 dan nomor atom turun 2, sehingga inti berubah menjadi torium-234.



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.

Langkah 4. Satu peluruhan beta lagi: Pa-234 menjadi uranium-234. Uranium lagi, tetapi isotop yang berbeda!

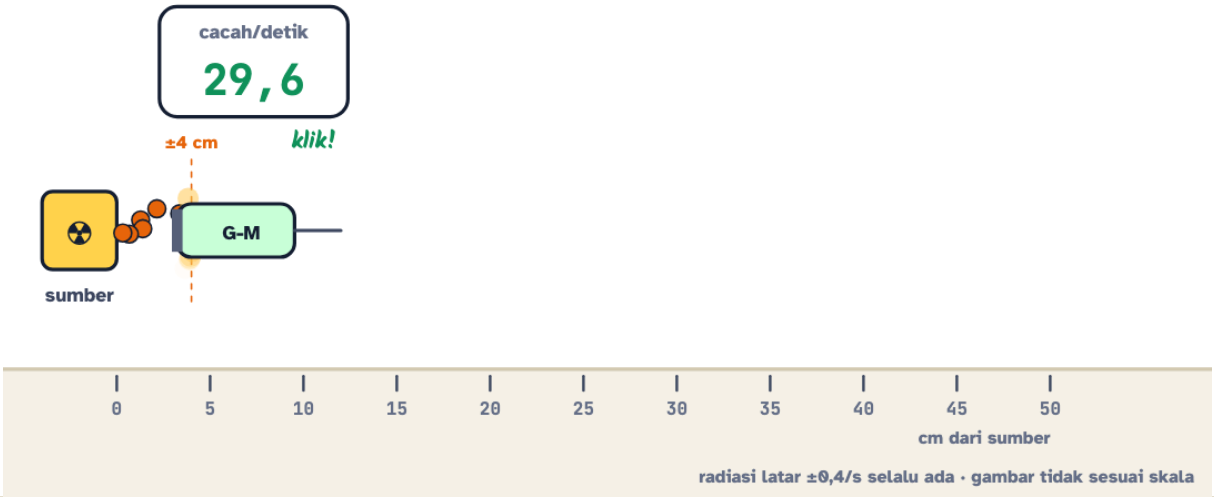
Langkah 5. Setelah peluruhan, inti sering masih "bergetar" kelebihan energi. Ia melepaskannya sebagai **sinar gamma** tanpa berubah jenis.



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 menaikkannya kembali.

LAB MINI **Detektor Geiger & perisai radiasi**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-31



Cacahan terukur	Harapan rata-rata	Pengamatan
29,6 per detik	30,4 per detik	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".

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

RUMUS HIDUP

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.

- 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

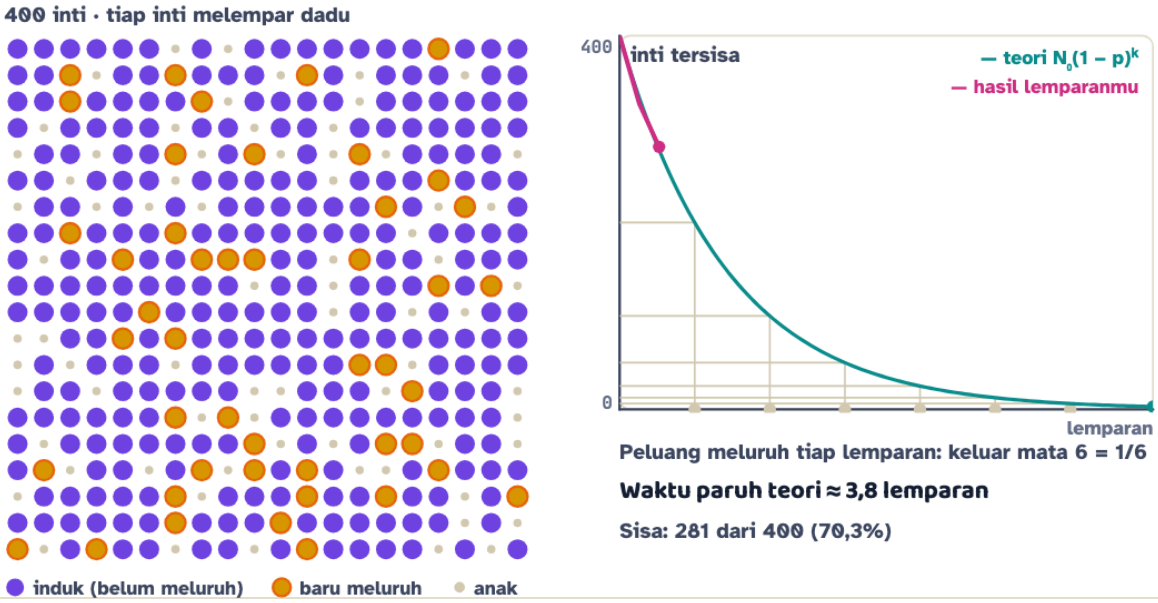
Dari **80** mg, setelah **24** hari dengan waktu paruh **8** hari, tersisa **10** mg.

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

LAB MINI **Peluruhan dadu: ribuan inti, satu kurva**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-31



Lemparan ke-	Inti induk tersisa	Meluruh di lemparan ini	Inti yang kamu tandai
2	281	46	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% → 50% → 25% → 12,5% → 6,25% → ... 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.

RUMUS HIDUP **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.

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} = 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. $800 \rightarrow 400 \rightarrow 200 \rightarrow 100$ 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 ½, setelah dua tersisa ¼, setelah tiga ⅛, 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: $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = -\lambda N$. Integralkan:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \qquad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \qquad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}.$$

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 → anak → 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.

KERJAKAN BERSAMA **Arang dari gua**

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. 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 (±1,25 miliar tahun) yang meluruh menjadi argon-40, atau uranium yang meluruh menjadi timbal di kristal zirkon. Yang ditanggali 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

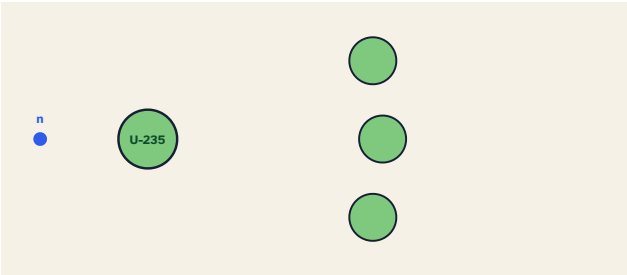
Perunut radioaktif dapat melacak kebocoran pipa bawah tanah, dan sinar gamma dipakai untuk "memotret" sambungan las pipa minyak dan gas.

31.6 Fisi dan reaktor nuklir

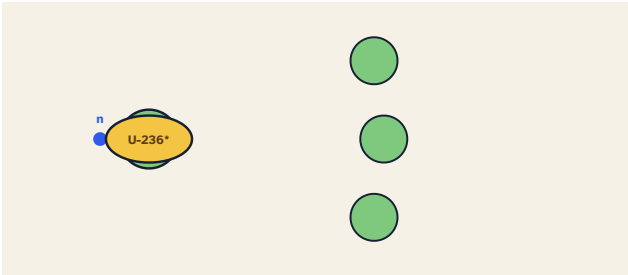
Tahun 1938, Otto Hahn dan Fritz Strassmann menembaki uranium dengan neutron dan menemukan barium, unsur yang jauh lebih ringan. Lise Meitner dan Otto Frisch menjelaskan apa yang terjadi: inti uranium **terbelah** menjadi dua. Peristiwa ini disebut **fisi**. Contoh salah satu reaksinya:

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + ^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow ^{141}_{56}\mathrm{Ba} + ^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,^{1}_{0}\mathrm{n} + \pm 200\ \mathrm{MeV}.$$

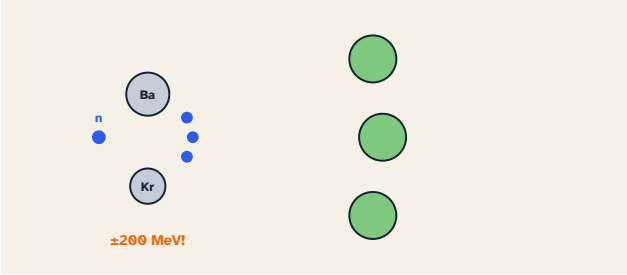
Kuncinya ada pada neutron-neutron baru yang lahir dari setiap fisi. Mereka bisa membelah inti uranium lain, yang menghasilkan neutron lagi, dan seterusnya: **reaksi berantai**.



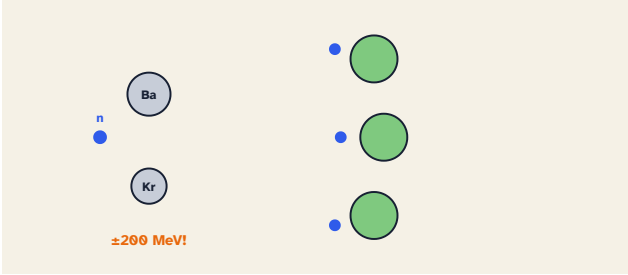
Langkah 1. Sebuah neutron lambat mendekati inti uranium-235. Neutron tidak bermuatan, jadi tidak ditolak oleh inti.



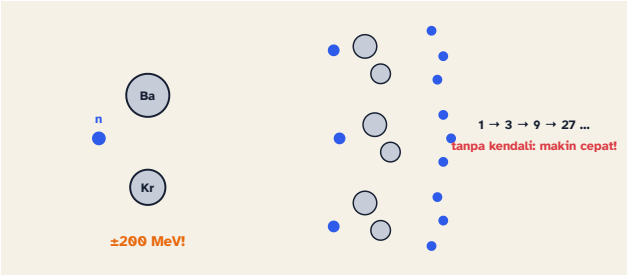
Langkah 2. Inti menyerap neutron dan menjadi uranium-236 yang sangat tidak stabil. Inti itu bergoyang dan memanjang seperti tetesan air.



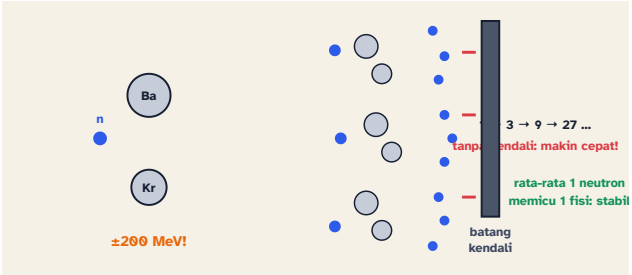
Langkah 3. Inti terbelah menjadi dua inti sedang (misalnya barium dan kripton), sambil melepaskan 2–3 neutron baru dan energi sekitar 200 MeV. Massa hasil fisi sedikit lebih kecil daripada massa awal; selisihnya menjadi energi.



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.

COBA SENDIRI **Energi dari satu gram uranium-235**

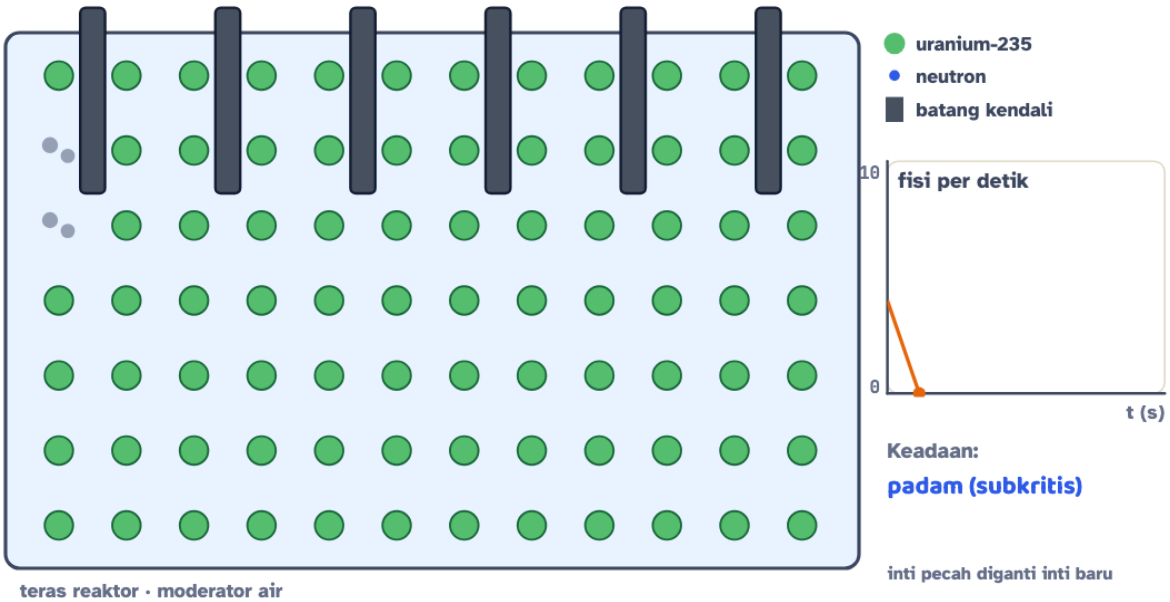
Setiap fisi U-235 melepaskan sekitar 200 MeV. Berapa energi (dalam joule dan kWh) jika seluruh inti dalam 1 gram U-235 membelah? Bandingkan dengan batu bara (±29 MJ per kg). ($N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol⁻¹, 1 MeV = $1{,}60 \times 10^{-13}$ J)

1. Jumlah inti: $N = \frac{1}{235} \times 6{,}02 \times 10^{23} \approx 2{,}56 \times 10^{21}$.
2. Energi: $2{,}56 \times 10^{21} \times 200\ \mathrm{MeV} = 5{,}12 \times 10^{23}$ MeV $\approx 8{,}2 \times 10^{10}$ J.
3. Dalam kWh: $8{,}2 \times 10^{10} / 3{,}6 \times 10^{6} \approx 2{,}3 \times 10^{4}$ kWh.
4. Setara batu bara: $8{,}2 \times 10^{10} / 2{,}9 \times 10^{7} \approx 2.800$ kg.

Sekitar $8{,}2 \times 10^{10}$ J atau 23.000 kWh, setara pembakaran ±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	Fisi total	Energi dilepas	Keadaan reaktor
0	2	400 MeV	padam (subkritis)

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."

FAKTA

Tidak bisa. Bahan bakar reaktor daya hanya berisi ±3–5% 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.

MITOS

"Uranium mengeluarkan energi karena terbakar."

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:

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{0}_{+1}\mathrm{e} + 2\nu + \pm 26{,}7\ \mathrm{MeV}.$$

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 $U = ke^2/r \approx 1{,}44\ \mathrm{MeV}\backslash\mathrm{cdotp}\mathrm{fm}/1\ \mathrm{fm} \approx 1{,}4$ 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)	±0,0001 mSv
Rontgen gigi	±0,005 mSv
Rontgen dada	±0,02 mSv
Terbang ±9 jam (sinar kosmik di ketinggian)	±0,04 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."

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.

MITOS

"Semua radiasi berasal dari buatan manusia dan selalu berbahaya."

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 $^{14}_{6}\mathrm{C}$ 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 $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ 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.

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

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!

BAB 32 · FISIKA MODERN

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 cerdik 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

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 dipasangi 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

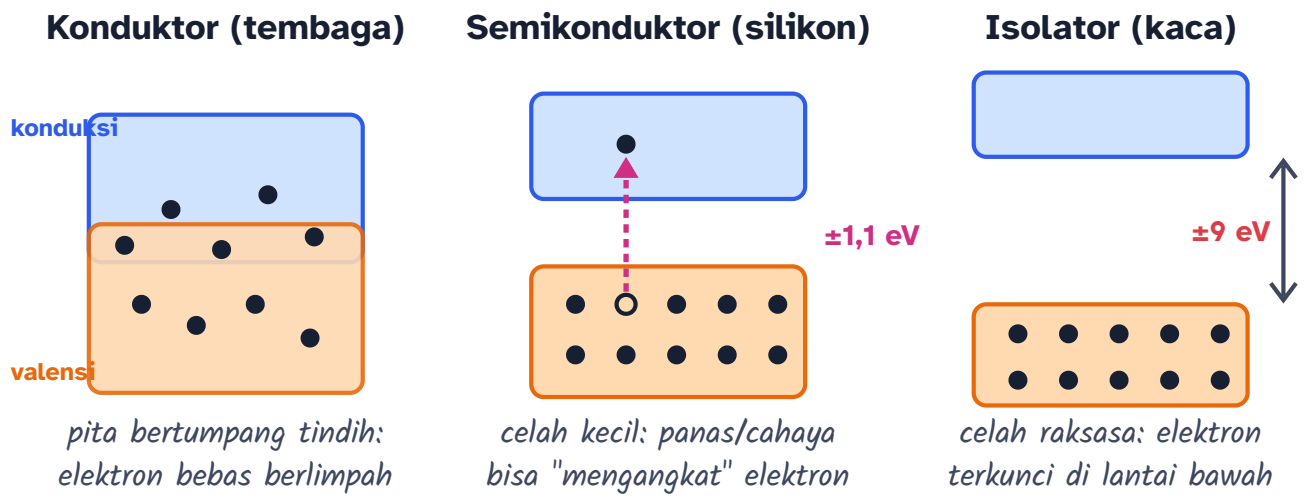
Kabel tembaga mengalirkan listrik dengan mudah. Plastik pembungkusnya hampir tidak mengalirkan listrik sama sekali. Di antara keduanya ada bahan "ajaib" bernama **semikonduktor**, misalnya **silikon** (dimurnikan dari pasir kuarsa, SiO_2) dan germanium. Kehebatannya: daya hantarnya bisa **diatur** dengan 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:



Biru = pita konduksi ("lantai atas"), oranye = pita valensi ("lantai bawah"). Lingkaran kosong di silikon adalah tempat yang ditinggalkan elektron: **lubang**.

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 (±)	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."

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.

MITOS

"Cip komputer terbuat dari logam supaya bisa menghantarkan listrik."

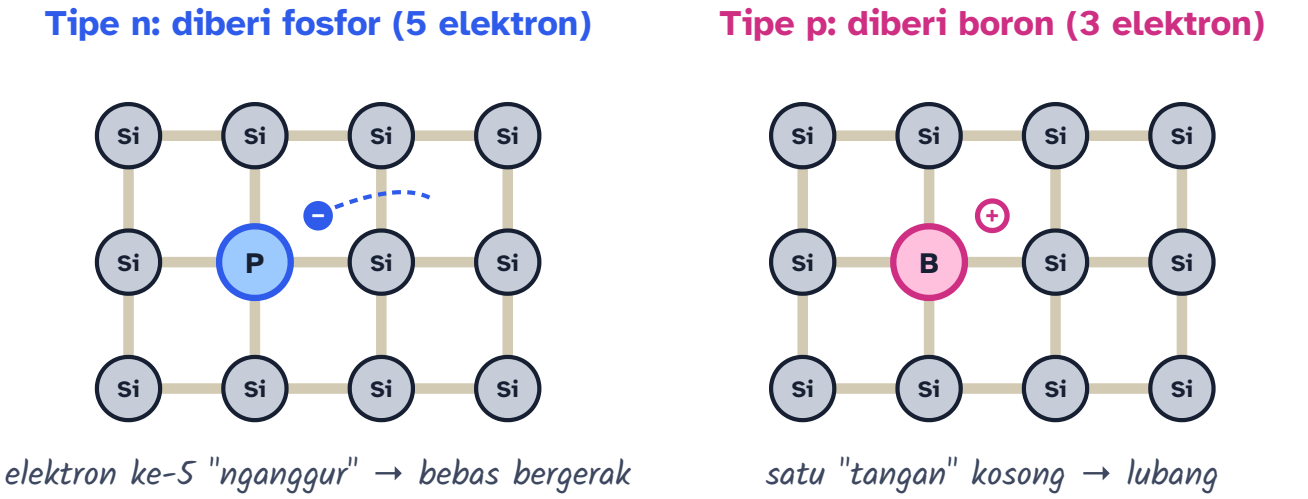
FAKTA

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?



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.

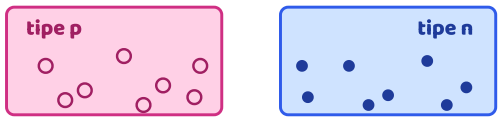
💡 **SEJUMPUT SAJA CUKUP**

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.

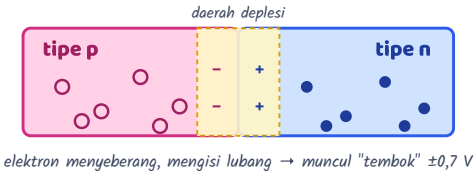
32.3 Dioda: pintu putar satu arah, dan rahasia charger HP

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

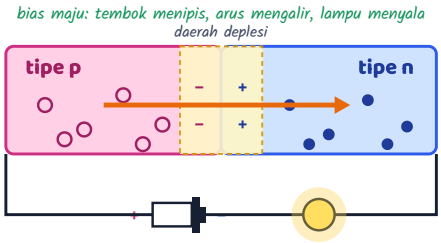
didorong dari arah sebaliknya. Ikuti animasinya.



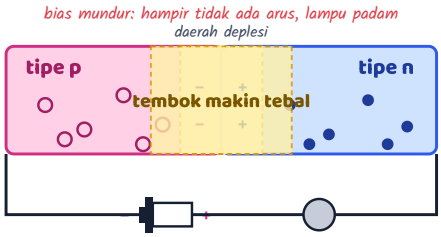
Langkah 1. Dua keping semikonduktor: tipe p penuh **lubang** (lingkaran kosong), tipe n penuh **elektron bebas** (titik biru).



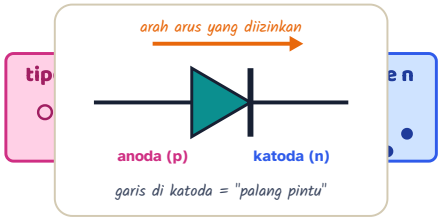
Langkah 2. Saat ditempelkan, elektron di dekat sambungan menyeberang dan mengisi lubang. Terbentuk **daerah deplesi** tanpa pembawa muatan bebas, dengan "tembok" beda potensial sekitar **0,7 V** untuk silikon.



Langkah 3. Bias maju: kutub + baterai ke sisi p, kutub – ke sisi n. Jika tegangannya melebihi ±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 ±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*).

RUMUS HIDUP

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.

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

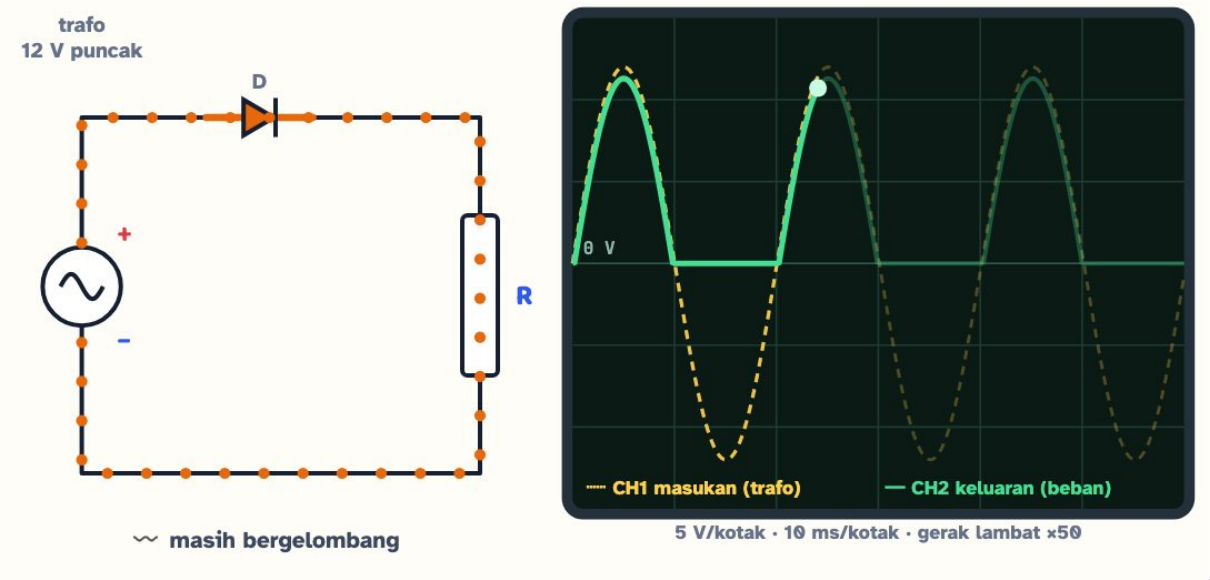
Trafo **9** V rms punya puncak $\sqrt{2}$ kali lebih besar. Dikurangi 0,7 V untuk setiap dioda (**2** buah) → keluaran ≈ **11,33** V DC.

Cek satuan: $\mathrm{V} - \mathrm{V} = \mathrm{V}$. Angka 0,7 V berlaku untuk dioda silikon; dioda germanium hanya ±0,3 V.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI 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



Puncak keluaran	Rata-rata (DC)	Riak (puncak-ke-puncak)	Frekuensi
11,3 V	3,48 V	11,3 V	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: $V_{\text{maks}} = \sqrt{2} \times 9 = 12{,}7$ V.
2. Pada jembatan, arus melewati 2 dioda: hilang $2 \times 0{,}7 = 1{,}4$ V.
3. Kapasitor besar terisi hingga hampir puncak: $V_{dc} \approx 12{,}7 - 1{,}4 = 11{,}3$ 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!

32.4 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): $E = \dfrac{hc}{\lambda}$, atau versi praktisnya $\lambda\,(\mathrm{nm}) \approx \dfrac{1240}{E\,(\mathrm{eV})}$. LED merah dengan celah ±1,9 eV memancarkan cahaya ±650 nm. LED biru dengan celah ±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.

RUMUS HIDUP

Resistor pelindung LED

$$R = \frac{V_s - V_{LED}}{I}$$

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 ≈ **200** Ω, lalu ambil nilai standar terdekat yang sedikit lebih besar.

Cek satuan: $\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = \Omega$. 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

KERJAKAN BERSAMA

LED merah di port USB

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: $15\ \mathrm{mA} = 0{,}015$ 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 (±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."

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.

MITOS

"Panel surya butuh panas matahari, jadi makin panas makin banyak listriknya."

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.

RUMUS HIDUP **Transistor sebagai penguat arus**

$$I_C = \beta\, I_B$$

Arus basis yang mungil mengatur arus kolektor yang puluhan sampai ratusan kali lebih besar.

β Penguatan arus kali | I_B Arus basis mA | I_C Arus kolektor mA

ARUS KOLEKTOR
20
mA

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, menyala-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 mA. Berapa arus kolektornya? Cukupkah untuk menyalakan LED yang butuh 15 mA?

1. $I_C = \beta I_B = 100 \times 0{,}15\ \mathrm{mA} = 15\ \mathrm{mA}$.
2. Arus 15 mA pas untuk LED biasa.

15 mA, cukup. Arus basis yang hanya 0,15 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: $1011_2 = 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 11$.

RUMUS HIDUP **Biner (8 bit) → desimal**

$$N = \sum_{k=0}^{7} b_k \cdot 2^k = 128b_7 + 64b_6 + \cdots + 2b_1 + b_0$$

Setiap bit yang menyala menyumbang nilai tempatnya. Jumlahkan saja!

- b_7 Bit ke-7 (nilai 128)
- b_6 Bit ke-6 (nilai 64)
- b_5 Bit ke-5 (nilai 32)
- b_4 Bit ke-4 (nilai 16)
- b_3 Bit ke-3 (nilai 8)
- b_2 Bit ke-2 (nilai 4)
- b_1 Bit ke-1 (nilai 2)
- b_0 Bit ke-0 (nilai 1)
- N Bilangan desimal `desimal`

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

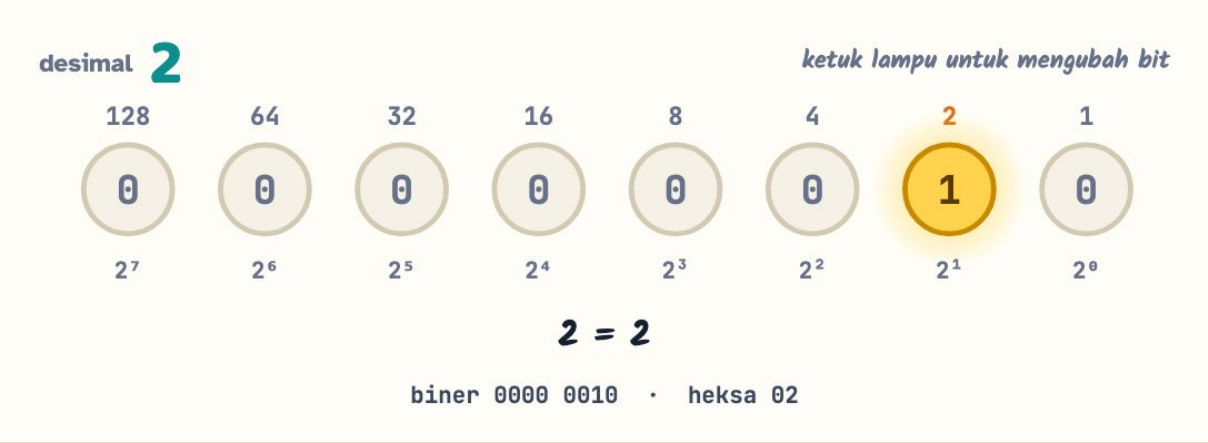
Bagi bilangan desimal dengan 2 berulang-ulang dan catat sisanya. Baca sisanya **dari bawah ke atas**. Contoh untuk 13: 13 : 2 = 6 sisa **1**; 6 : 2 = 3 sisa **0**; 3 : 2 = 1 sisa **1**; 1 : 2 = 0 sisa **1**. Jadi $13 = 1101_2$.

✏️ **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 tebakanmu 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-32



Desimal	Biner	Heksadesimal	Huruf (kode ASCII)	Target tercapai
2	0000 0010	02	—	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

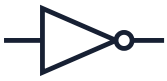
"Komputer sangat pintar karena memahami angka 0 sampai 9 lebih cepat dari kita."

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**.

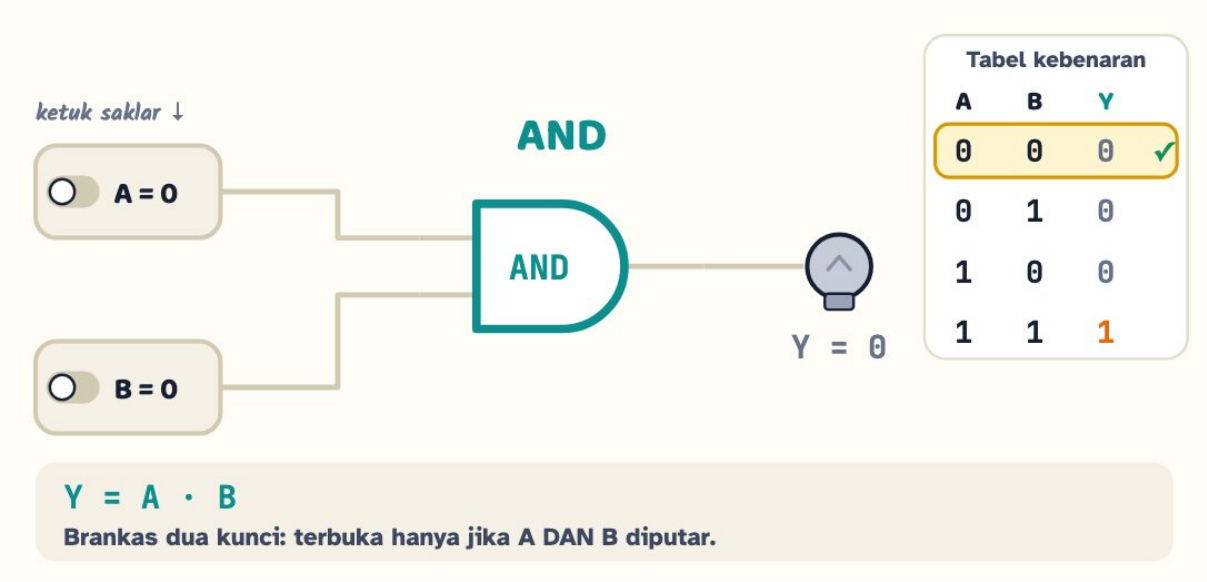
Simbol	Gerbang	Ekspresi	A B = 00	01	10	11	Analogi
	**NOT** (BUKAN)	$Y = \overline{A}$	A = 0 → Y = **1**; A = 1 → Y = **0**				si pembangkang
	AND (DAN)	$Y = A \cdot B$	0	0	0	**1**	brankas dua kunci
	OR (ATAU)	$Y = A + B$	0	**1**	**1**	**1**	bel dua tombol
	NAND	$Y = \overline{A \cdot B}$	**1**	**1**	**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



Masukan	Keluaran Y	Baris tabel dicoba
A = 0, B = 0	0 (lampu padam)	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

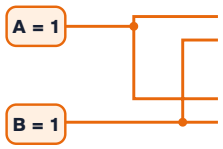
Kalau ibumu bertanya "mau teh atau kopi?", biasanya artinya pilih **salah satu**, bukan dua-duanya. Itu XOR! Dalam logika, **OR** berarti "salah satu *atau keduanya*": jika A = 1 dan B = 1, keluaran OR tetap 1. Banyak siswa tertukar di sini.

TAMU DARI MASA LALU

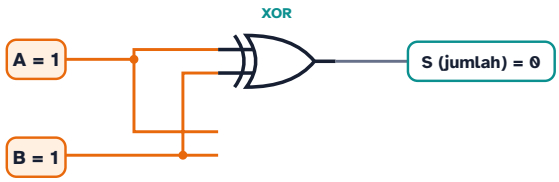
Pada 1854, guru matematika Inggris **George Boole** menulis buku tentang "hukum-hukum pikiran" dan menyatakan logika (benar/salah) dengan aljabar. Hampir seratus tahun kemudian, pada 1937, mahasiswa bernama **Claude Shannon** menunjukkan dalam tesisnya bahwa rangkaian saklar listrik dapat menjalankan 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

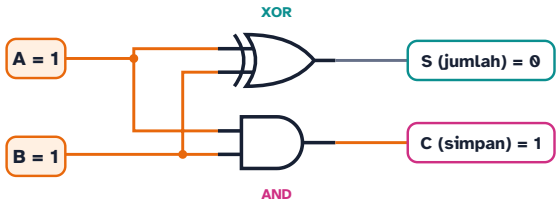
Hanya dengan dua gerbang, komputer sudah bisa menjumlahkan dua bit. Rangkaian ini disebut **penjumlah setengah** (*half adder*).



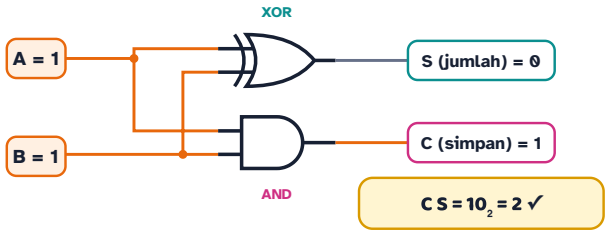
Langkah 1. Kita ingin menghitung 1 + 1 dengan saklar saja. Masukan A = 1 dan B = 1 dicabangkan ke dua gerbang.



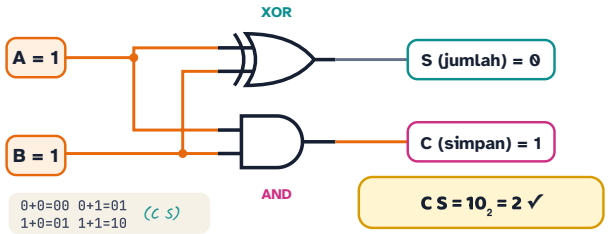
Langkah 2. Gerbang **XOR** memberi angka **jumlah** (S): 1 ⊕ 1 = 0. Seperti 5 + 5 = 10 di desimal, angka satuannya 0.



Langkah 3. Gerbang **AND** memberi angka **simpanan** (C, *carry*): 1 · 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!



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

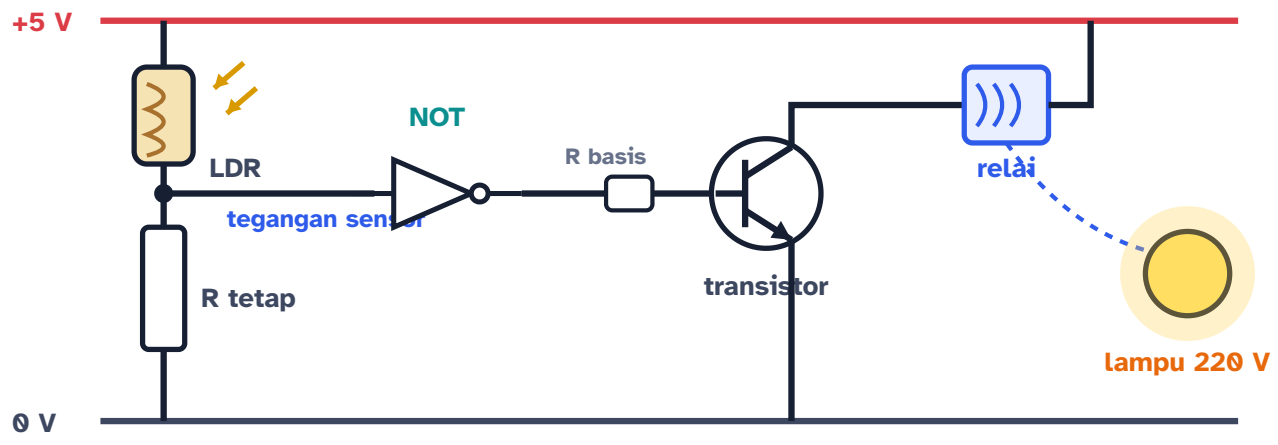
HUKUM DE MORGAN DAN KEAJAIBAN NAND

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

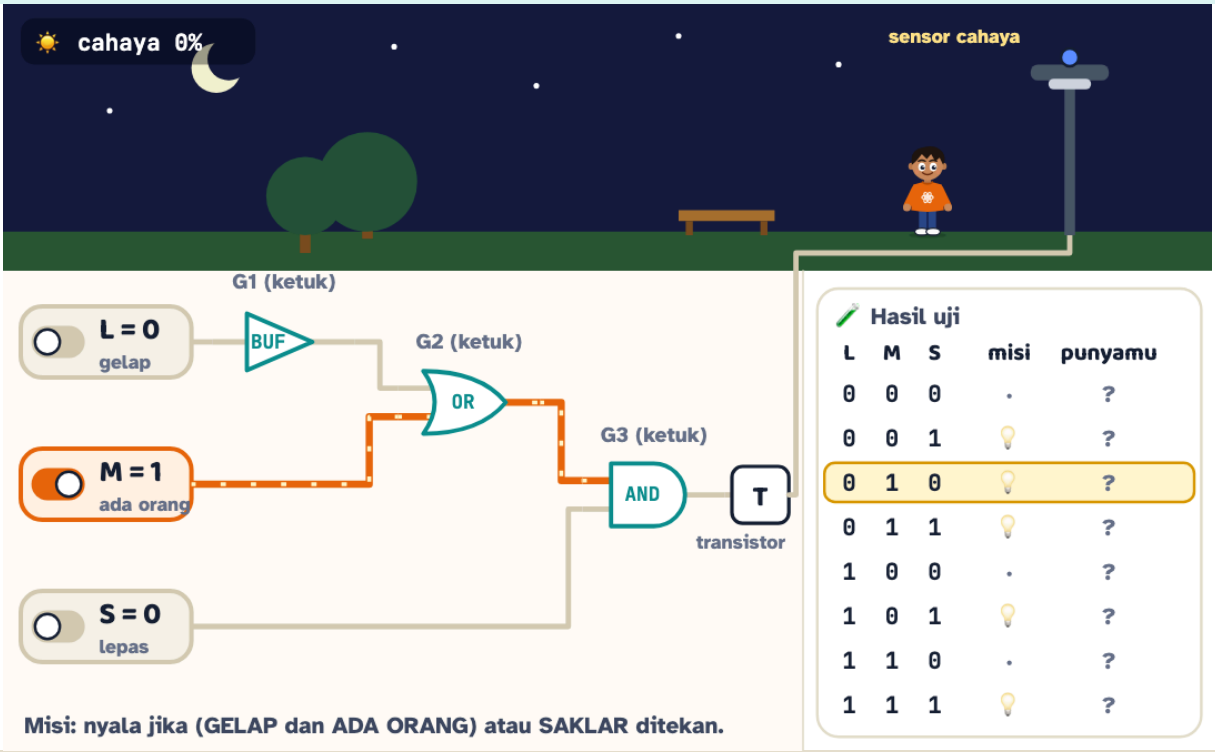


Saat gelap, hambatan LDR naik, tegangan sensor turun (0). Gerbang NOT membaliknya menjadi 1, transistor terbuka, relai tertarik, dan lampu 220 V menyala. Relai memisahkan listrik kecil (5 V) dari listrik rumah yang berbahaya.

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	Lampu rangkaianmu	Seharusnya	Status
L=0 M=1 S=0	padam	NYALA	✗ 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 8 kemungkinan** untuk memeriksa rancanganmu. Tekan ▶ **Jalankan** untuk melihat sehari semalam di taman.

COBA SENDIRI **Penyiram tanaman pintar untuk kebun sekolah**

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) → P = 0; (0, 1) → 0; (1, 0) → **1**; (1, 1) → 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 $w_1 A + w_2 B$ lalu mengeluarkan 1 jika hasilnya ≥ 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

$$V_{dc} \approx \sqrt{2}\, V_{rms} - 0{,}7\, n$$

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.

$$N = \sum_{k=0}^{7} b_k \cdot 2^k = 128 b_7 + 64 b_6 + \cdots + 2 b_1 + b_0$$

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 aurumgen.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.

BAB 33 · INDONESIA & SEMESTA

33 Bumi yang Bergerak: Fisika Gempa, Tsunami & Gunung Api

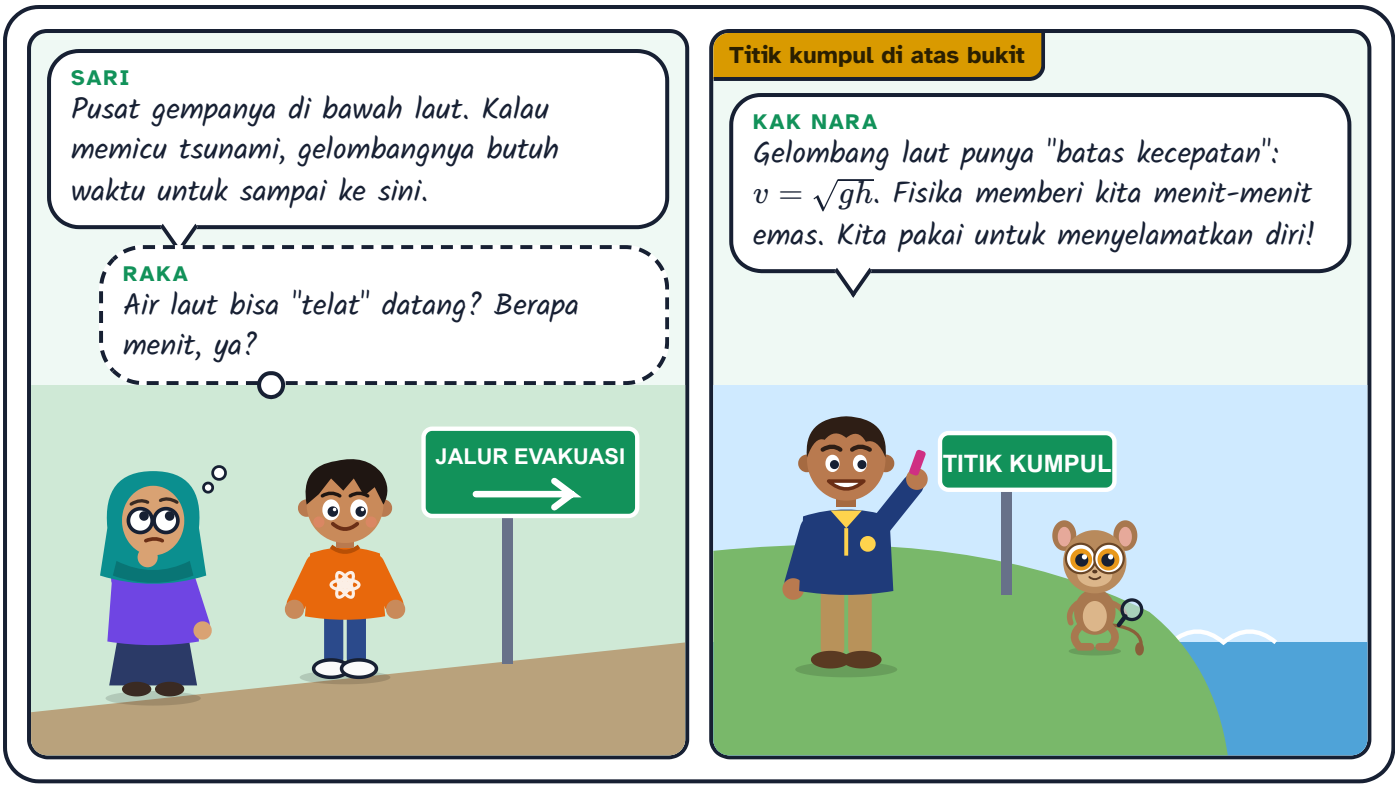
Indonesia duduk di atas pertemuan lempeng-lempeng raksasa. Fisika membantu kita memahami guncangannya, menghitung "waktu emas" sebelum tsunami tiba, dan menyelamatkan nyawa.

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



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.

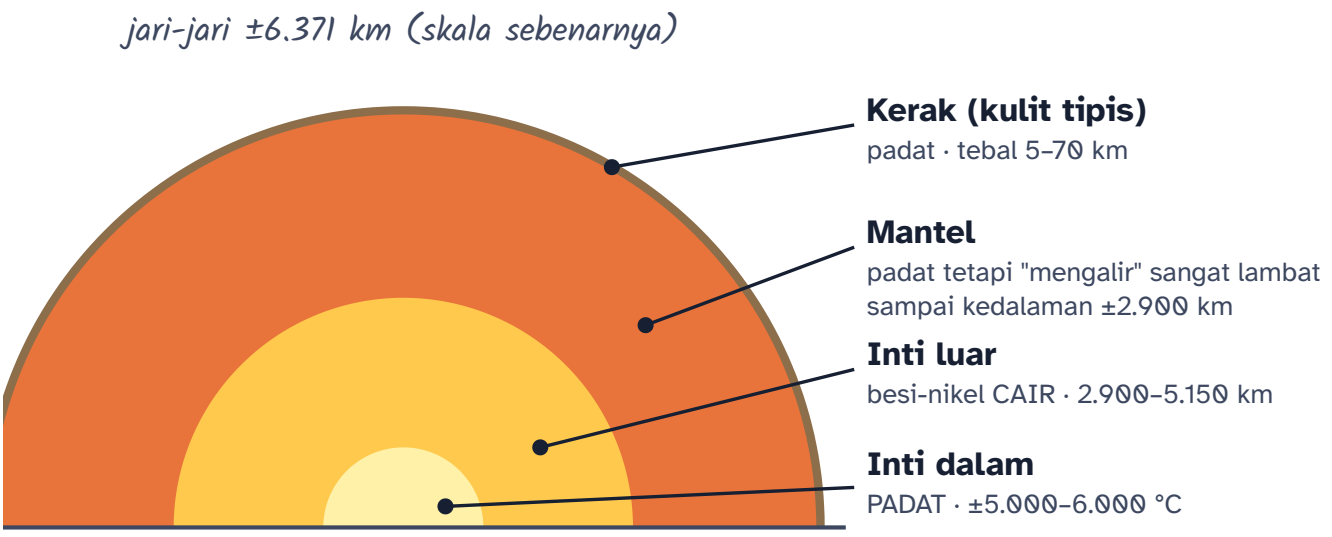
Jawabannya: hampir secepat pesawat jet. Dengan $v = \sqrt{gh} = \sqrt{9{,}8 \times 4000} \approx 198$ m/s, atau sekitar 710 km/jam! Tetapi saat mendekati pantai yang dangkal, tsunami **melambat** drastis (dan meninggi). Selisih waktu inilah yang memberi kesempatan untuk evakuasi, terutama bila sumber gempanya 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.



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 mengapung

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 fisikanya, bukan takut.

TAMU DARI MASA LALU

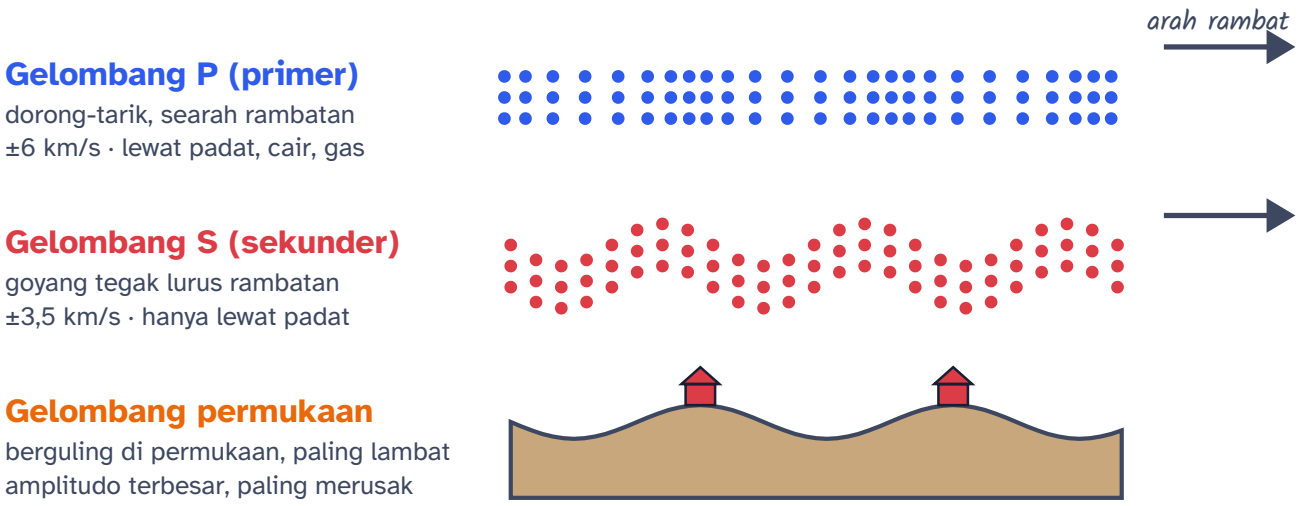
Pada 1912, ahli meteorologi Jerman **Alfred Wegener** memperhatikan pantai Amerika Selatan dan Afrika yang cocok seperti potongan puzzle. Ia menduga semua benua dulu menyatu, lalu "berlayar" saling menjauh. Banyak ilmuwan menertawakannya karena ia tidak bisa menjelaskan tenaga penggeraknya. Baru pada 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 ditekuk** 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 permukiman umumnya lebih merusak daripada gempa dalam yang bermagnitudo sama.



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 (±)	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 ±104° dan ±140°.

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:

$$\Delta t = t_S - t_P = d\left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P}\right) \quad \Longrightarrow \quad d = \Delta t\,\frac{v_P\,v_S}{v_P - v_S}$$

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

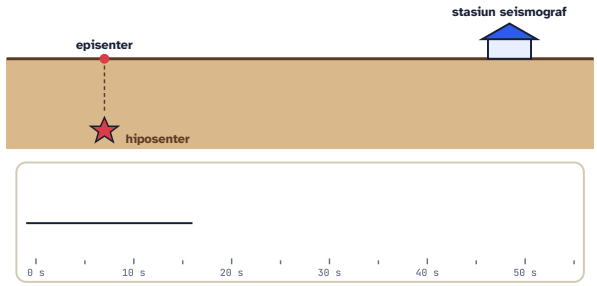
Jeda S–P **12** s, dengan v_P = **6** km/s dan v_S = **3,5** km/s → pusat gempa sekitar **100,8** km dari stasiun.

Cek satuan: $\mathrm{s} \times \frac{(\mathrm{km/s})^2}{\mathrm{km/s}} = \mathrm{km}$

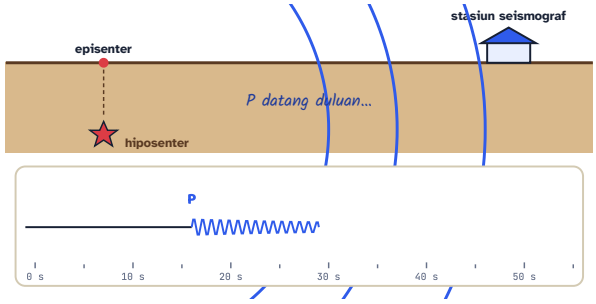
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-JARAK-EPISENTER

TRIK KAK NARA: KALI DELAPAN

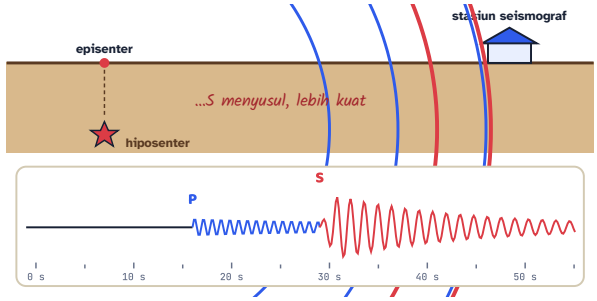
Untuk kecepatan khas kerak bumi ($v_P \approx 6$ km/s, $v_S \approx 3{,}5$ km/s), faktor $\frac{v_P v_S}{v_P - v_S} \approx 8{,}4$ km/s. Jadi: **jarak (km) ≈ 8 × jeda S–P (detik)**. Kalau kamu merasakan hentakan kecil lalu guncangan besar 5 detik kemudian, pusat gempa sekitar 40 km darimu.



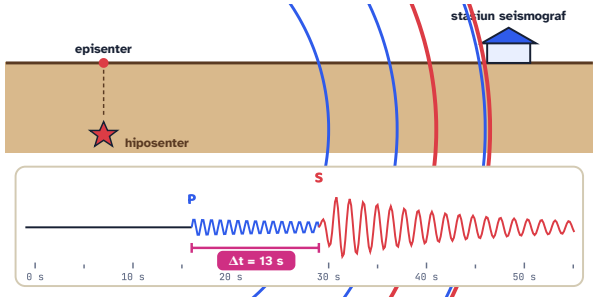
Langkah 1. Batuan patah di **hiposenter**, sekitar 20 km di bawah tanah. Sebuah stasiun seismograf BMKG menunggu di permukaan.



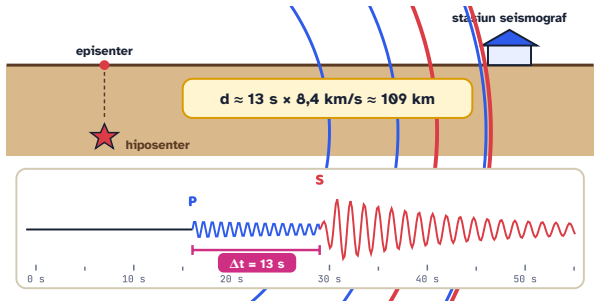
Langkah 2. Gelombang **P** yang cepat tiba lebih dulu. Seismograf mencatat getaran kecil.



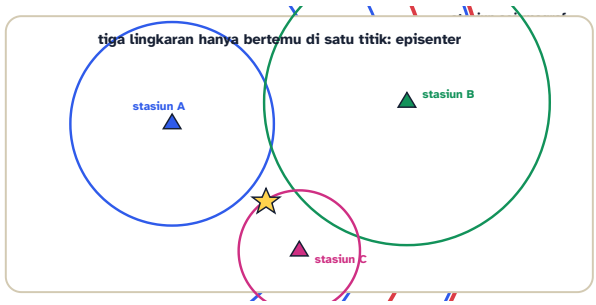
Langkah 3. Beberapa detik kemudian gelombang **S** tiba. Simpangannya jauh lebih besar.



Langkah 4. Ukur jedanya pada skala waktu: dari P sampai S kira-kira **13 detik**.



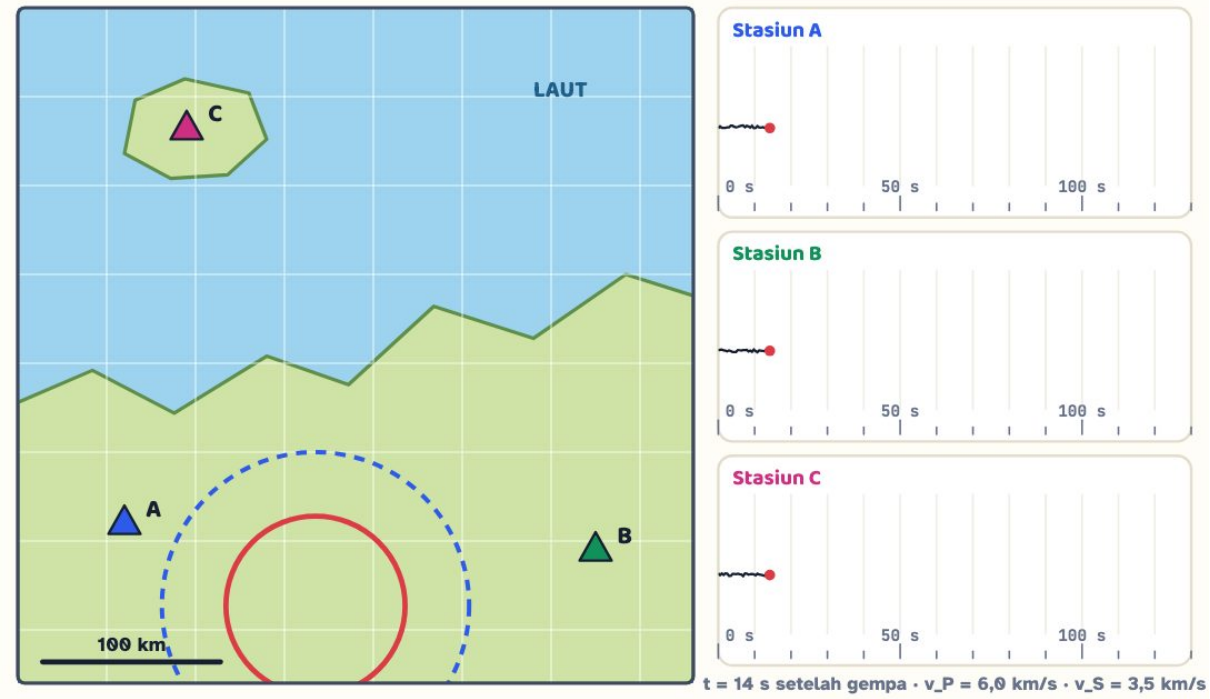
Langkah 5. Hitung jarak: $d \approx 13 \times 8{,}4 \approx 109$ km. Tetapi satu stasiun hanya tahu **jaraknya**, bukan arahnya. Pusat gempa bisa di mana saja pada lingkaran berjari-jari 109 km.



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



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 $v_P = 6{,}0$ km/s dan $v_S = 3{,}5$ km/s, berapa jarak stasiun ke pusat gempa?

1. Faktor kecepatan: $\dfrac{v_P v_S}{v_P - v_S} = \dfrac{6{,}0 \times 3{,}5}{2{,}5} = 8{,}4$ km/s.
2. $d = 12 \times 8{,}4 = 100{,}8$ km.

Sekitar 100 km. Dengan trik "kali delapan": $12 \times 8 = 96$ 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** (Mw) 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	±1/32.000–1/1.000	terjadi setiap hari, biasanya tidak terasa
M 4–5	±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 ≠ 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 $M_0 = \mu A D$ (kekakuan geser × luas patahan × 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."

FAKTA

Belum ada yang bisa. Ilmuwan dapat memetakan zona rawan dan
peluang
gempa dalam puluhan tahun, tetapi tidak tanggal dan jamnya. Waspadai pesan berantai "ramalan gempa"; percayai informasi resmi BMKG.

MITOS

"Banyak gempa kecil bagus, karena energinya terbuang sedikit-sedikit sehingga gempa besar batal."

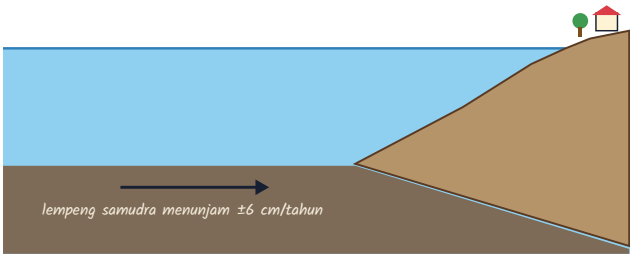
FAKTA

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.

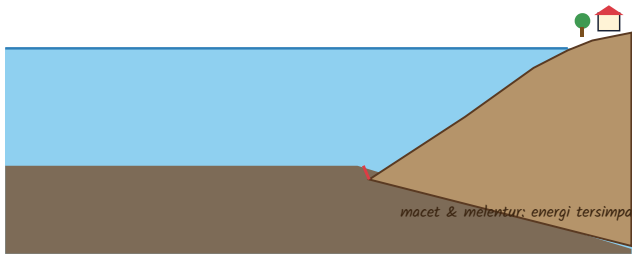
33.5 Tsunami: gelombang yang mengangkut seluruh laut

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.

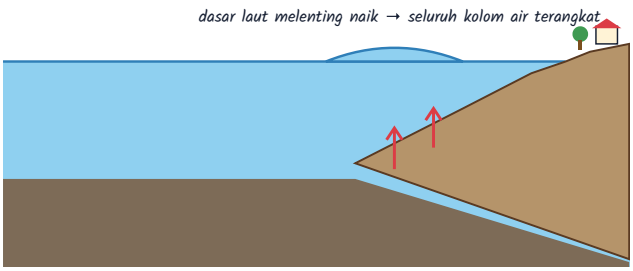
Bahasa sederhana · Tsunami adalah gelombang laut raksasa yang muncul ketika dasar laut tiba-tiba bergerak. Di laut dalam, tsunami melaju sangat cepat tetapi rendah. Di dekat pantai, ia melambat dan menjadi tinggi. Jika merasakan gempa kuat di pantai, segera pergi ke tempat yang tinggi.



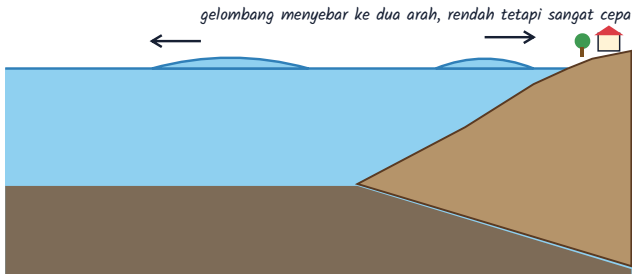
Langkah 1. Lempeng samudra terus menyusup ke bawah lempeng benua, sekitar 6 cm per tahun.



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.

RUMUS HIDUP

Cepat rambat tsunami

$$v = \sqrt{g\,h}$$

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: ≈ 58% dari bunyi di udara · ≈ 2 × kereta cepat Whoosh (350 km/jam) · ≈ 18 × ojek di jalan kota (±40 km/jam)

Cek satuan: $\sqrt{\mathrm{m/s^2 \cdot m}} = \sqrt{\mathrm{m^2/s^2}} = \mathrm{m/s}$

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

Kedalaman	Kecepatan	Setara dengan
7.000 m	262 m/s ≈ 940 km/jam	pesawat jet
4.000 m	198 m/s ≈ 710 km/jam	pesawat jet yang sedikit lebih pelan
1.000 m	99 m/s ≈ 360 km/jam	kereta cepat Whoosh (±350 km/jam)
200 m	44 m/s ≈ 160 km/jam	mobil balap
50 m	22 m/s ≈ 80 km/jam	mobil di jalan tol
10 m	9,9 m/s ≈ 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.

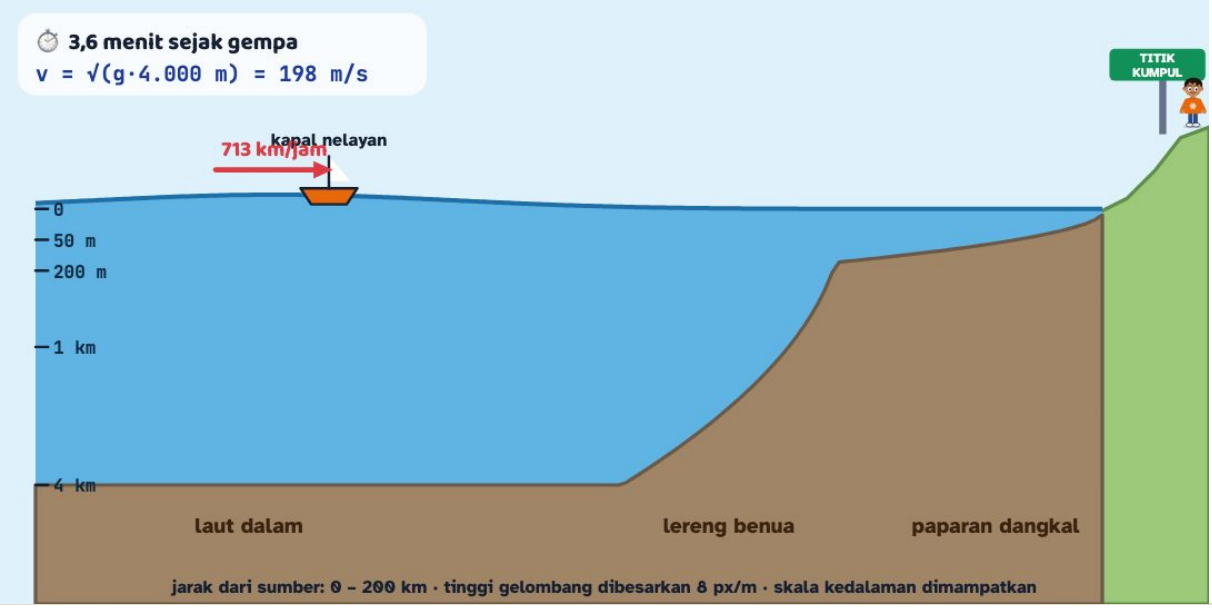
Hampir tidak terasa! Di laut dalam, tinggi tsunami mungkin hanya sekitar satu meter, dan panjang gelombangnya ratusan kilometer. Kapal naik setinggi satu meter selama belasan menit, terlalu landai untuk dirasakan. Karena itu, bila peringatan tsunami berbunyi, kapal yang sudah di laut dalam lebih aman 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



Jarak ke pantai	Kedalaman laut	Kecepatan	Tinggi gelombang
155,2 km	4.000 m	198 m/s = 713 km/jam	1 m

Waktu sejak gempa	Perkiraan tiba di pantai
3,6 menit	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? ($g = 9{,}8$ m/s²)

1. Bagian dalam: $v_1 = \sqrt{9{,}8 \times 4000} = 198$ m/s, sehingga $t_1 = 120\,000/198 \approx 606$ s.
2. Bagian dangkal: $v_2 = \sqrt{9{,}8 \times 100} = 31{,}3$ m/s, sehingga $t_2 = 30\,000/31{,}3 \approx 958$ s.
3. Total: $606 + 958 \approx 1564$ s ≈ 26 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

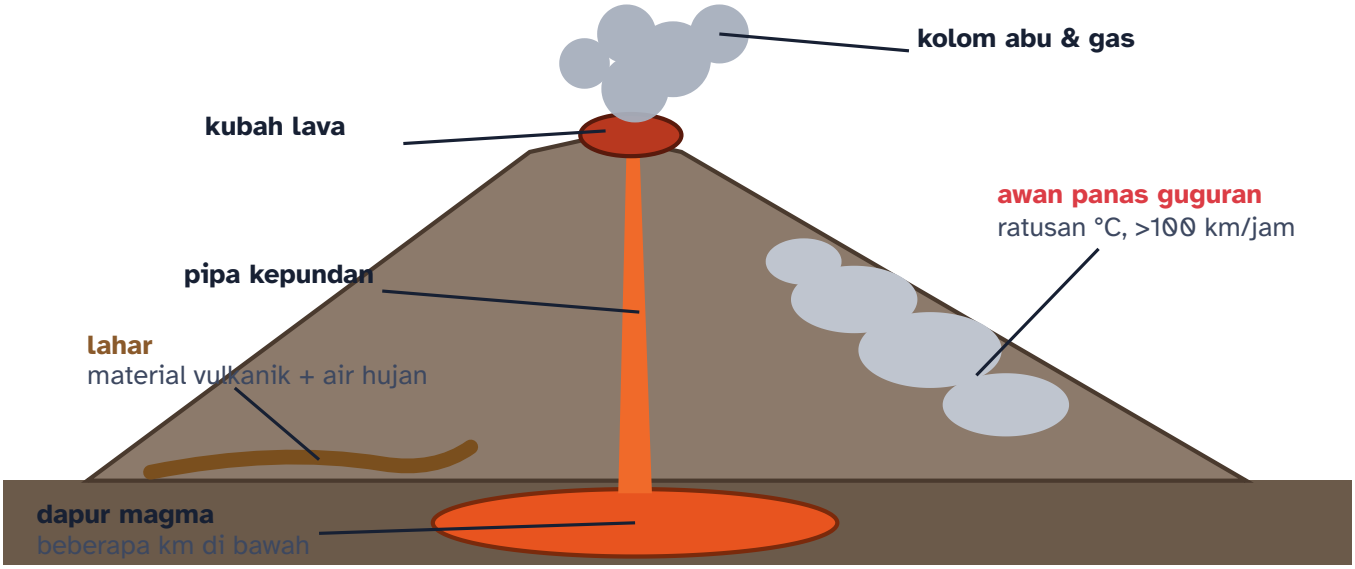
HUKUM GREEN

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 gimbal") 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/m³. Berapa tekanan batuan pada atap dapur magma, dan berapa kali tekanan udara (1 atm ≈ $1{,}0 \times 10^5$ Pa)? ($g = 9{,}8$ m/s²)

1. Gunakan tekanan hidrostatis (Bab 13): $P = \rho g h = 2700 \times 9{,}8 \times 5000$.
2. $P \approx 1{,}3 \times 10^8$ Pa.
3. Dibanding tekanan udara: $1{,}3 \times 10^8 / 1{,}0 \times 10^5 \approx 1.300$ 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

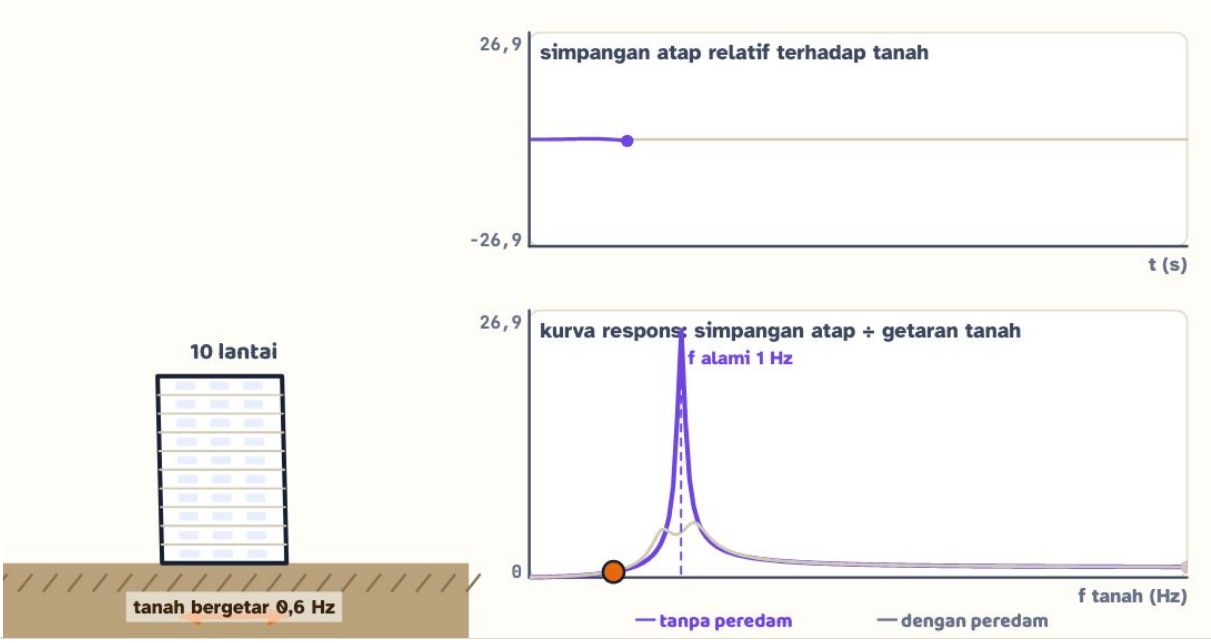
Gempa jarang membunuh secara langsung. Yang membahayakan adalah **bangunan yang runtuh**, tsunami, dan longsor. Karena itu, mitigasi berarti dua hal: membuat bangunan dan lingkungan lebih kuat, serta membuat kita tahu apa yang harus dilakukan.

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.

LAB MINI **Meja getar: gedung, resonansi, dan bandul peredam**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-33



Frekuensi alami gedung	f tanah / f gedung	Simpangan atap (relatif)
1 Hz (T = 1 s)	0,6	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 → 0,3 s; 8 lantai → 0,8 s; 25 lantai → 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.

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**. Waspadai 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 ≈ 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."

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.

MITOS

"Tsunami hanya satu gelombang. Setelah air surut kembali, kita bisa turun ke pantai."

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!

$$v = \sqrt{g\,h}$$

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 CO_2, gas yang memerangkap panas di atmosfer. Bab 34 akan membandingkan sumber-sumber energi dan menghitung jejak karbon kita.

BAB 34 · FISIKA UNTUK INDONESIA & SEMESTA

34 Selimut Bumi Makin Tebal: Energi, Iklim, dan Aksi Kita

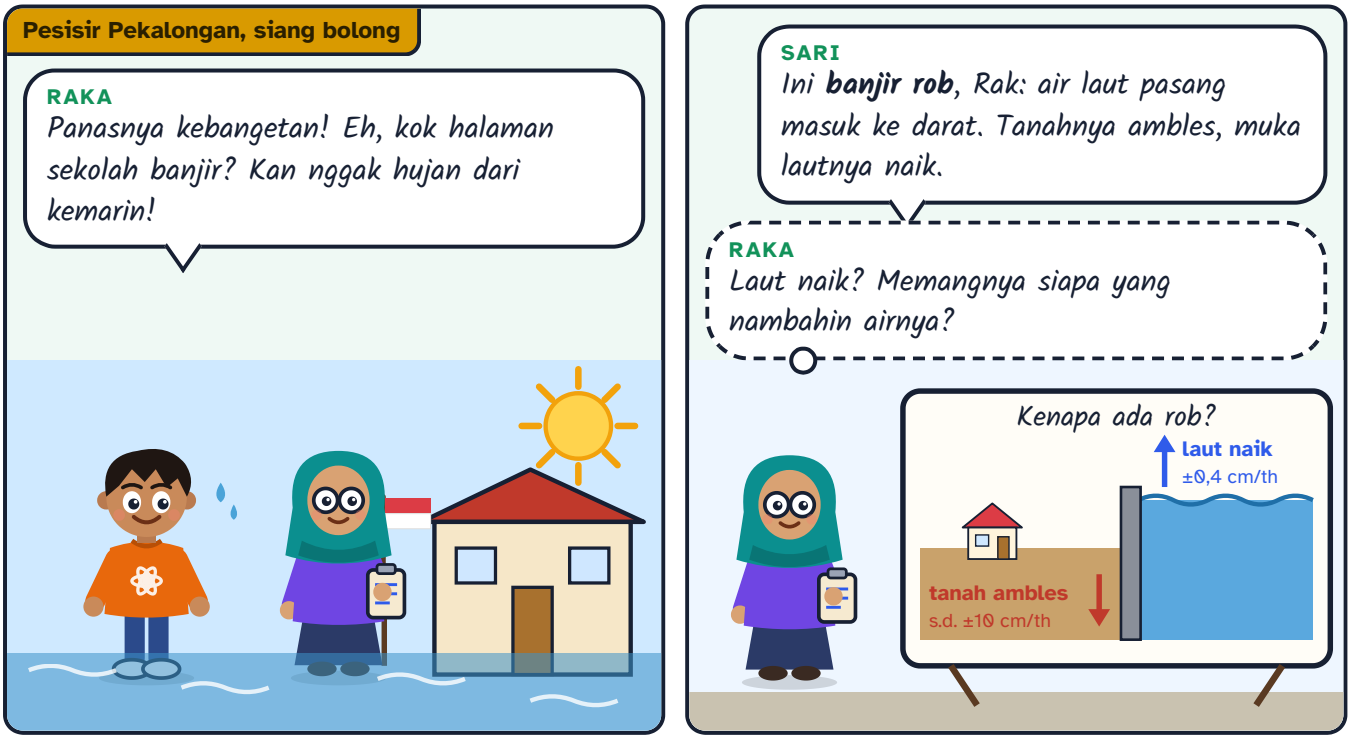
Halaman sekolah kebanjiran padahal tidak hujan, siang terasa makin terik. Apa hubungannya dengan knalpot motor dan lampu kamarmu? Kabar baiknya: fisika juga menunjukkan jalan keluarnya, dan Indonesia kaya Matahari, angin, serta panas bumi.

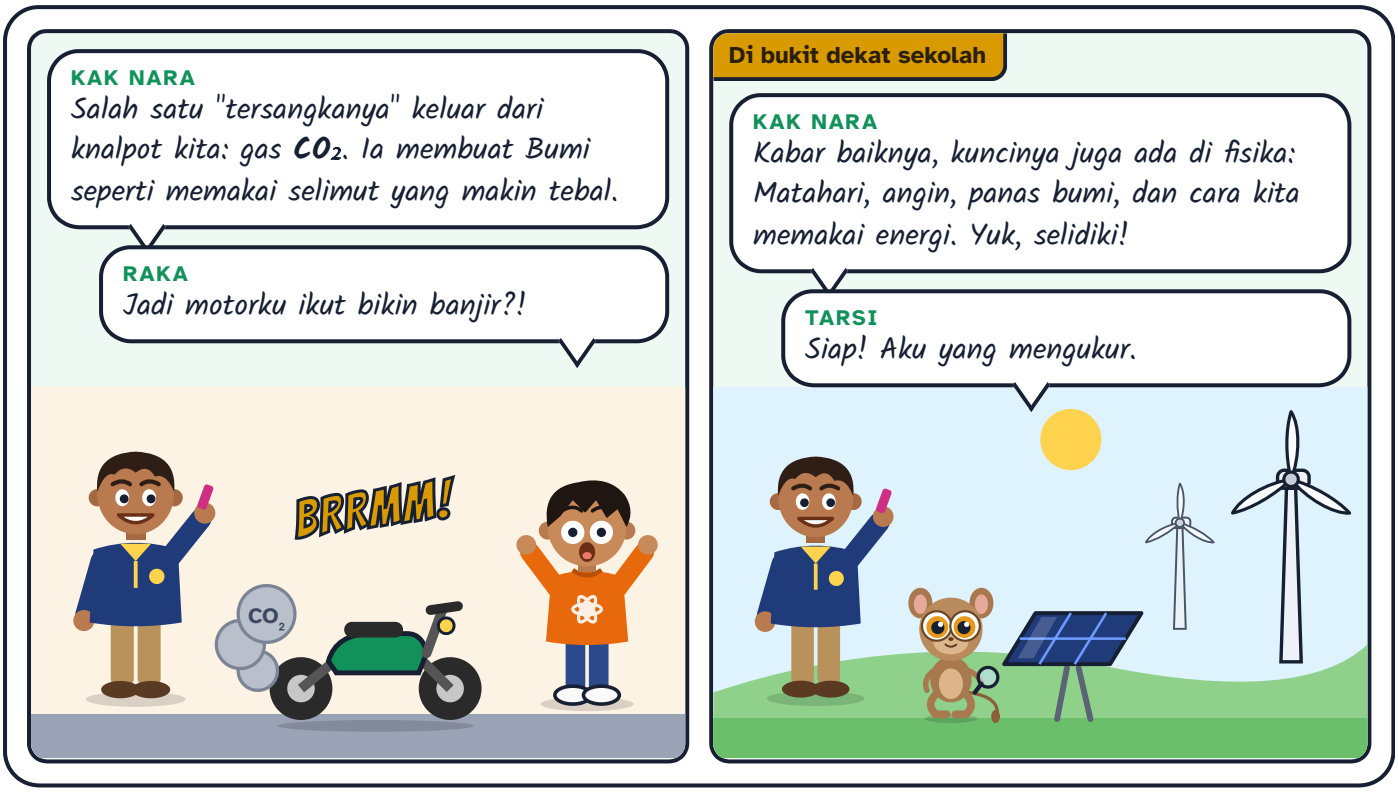
Setelah bab ini, kamu bisa

- 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





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 memanas.
- 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.

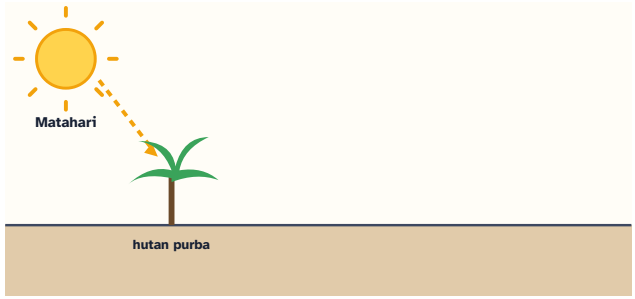
Karena itu kita mengukur **efisiensi**: berapa bagian energi masukan yang berubah menjadi energi berguna.

$$\eta = \frac{E_{\text{berguna}}}{E_{\text{masukan}}} \times 100\%$$

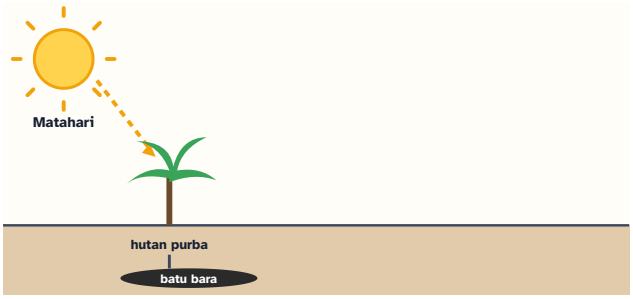
Bahasa sederhana · Gampangnya: energi itu seperti uang jajan yang ditukar-tukar. Uangnya tidak hilang, tetapi setiap kali ditukar ada "biaya" yang berubah jadi panas. Lampu pijar membuang banyak uang jajannya jadi panas, sedangkan lampu LED jauh lebih hemat.

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.

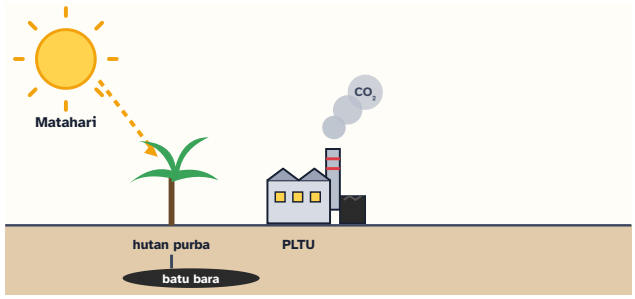
Langkah 1. Di inti Matahari, energi nuklir (fusi) berubah menjadi **cahaya** yang melesat ke Bumi.



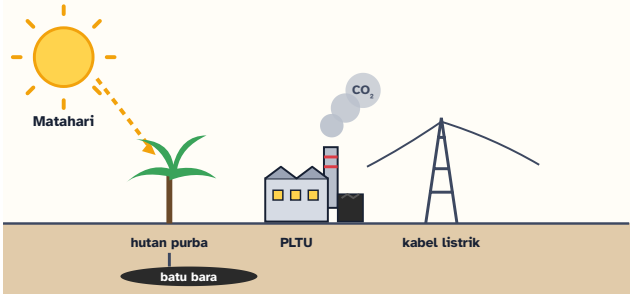
Langkah 2. Jutaan tahun lalu, tumbuhan purba menangkap cahaya itu lewat fotosintesis: energi cahaya menjadi **energi kimia**.



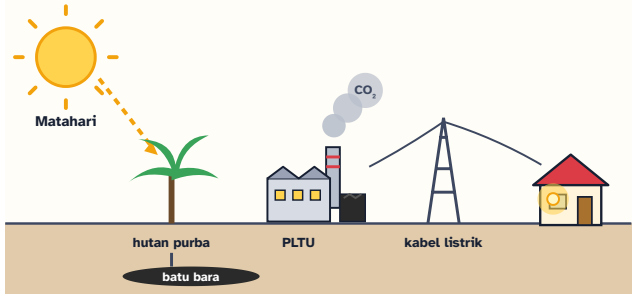
Langkah 3. Tumbuhan mati, terkubur, dan tertekan selama jutaan tahun menjadi **batu bara**. Energi kimianya tersimpan, seperti baterai purba.



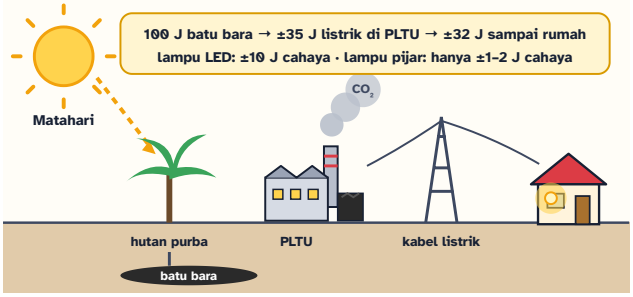
Langkah 4. Di PLTU, batu bara dibakar: energi kimia → **kalor** → uap bertekanan → turbin berputar (**kinetik**). Karbon yang dulu diikat tumbuhan lepas lagi sebagai **CO_2**.



Langkah 5. Generator mengubah putaran menjadi **energi listrik**, lalu kabel mengirimnya ke kota (Bab 25).



Langkah 6. Di rumahmu, lampu mengubah listrik menjadi **cahaya** dan kalor. Perjalanan selesai!



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: $60\ \mathrm{W} \times 6\ \mathrm{jam} \times 30 = 10\,800\ \mathrm{Wh} = 10{,}8\ \mathrm{kWh}$.
2. Energi lampu LED: $9 \times 6 \times 30 = 1\,620\ \mathrm{Wh} = 1{,}62\ \mathrm{kWh}$.
3. Selisih: $10{,}8 - 1{,}62 = 9{,}18\ \mathrm{kWh}$, dikali tarif: $9{,}18 \times 1\,445 \approx \mathrm{Rp}13\,265$.

Hemat ±Rp13.000 per lampu setiap bulan, dan PLTU tidak perlu membakar batu bara untuk 9 kWh itu (±7 kg CO_2 lebih sedikit).

TRIK KAK NARA: "WATT KALI JAM, BAGI SERIBU"

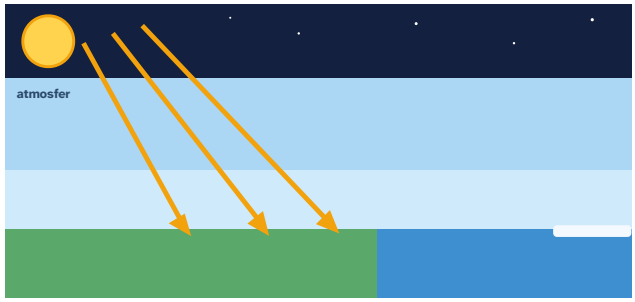
Energi listrik dalam kWh = daya (W) × lama (jam) ÷ 1000. Kipas 40 W menyala 5 jam: $40 \times 5 \div 1000 = 0{,}2$ kWh. Satu kWh itulah yang dihitung meteran PLN dan token prabayar.

34.2 Efek rumah kaca: selimut tak terlihat

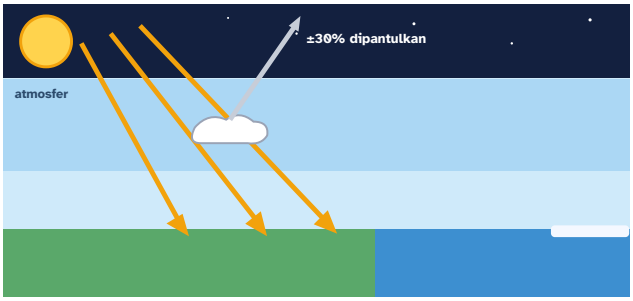
Bumi menerima energi dari Matahari dan membuangnya ke angkasa. Kalau energi masuk = energi keluar, suhu Bumi tetap. Inilah **neraca energi** Bumi. Di bagian atas atmosfer, Matahari memberi **1.361 W/m²** (disebut *konstanta surya*). Karena Bumi bulat dan berputar, rata-rata seluruh permukaan hanya menerima 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).

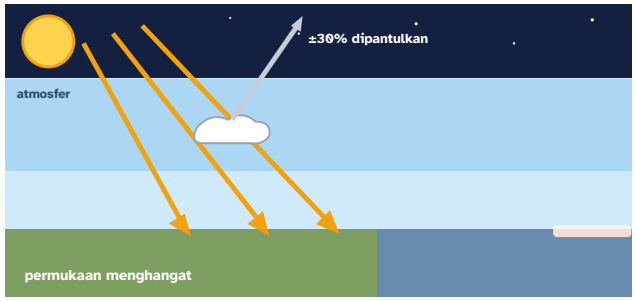
Langkah 1. Matahari memancarkan energi, sebagian besar berupa cahaya tampak (gelombang pendek) yang mudah menembus udara.



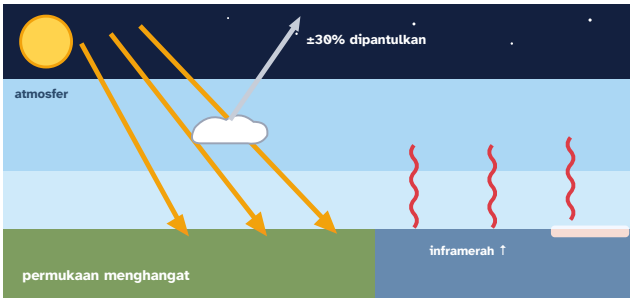
Langkah 2. Cahaya itu tiba di Bumi: rata-rata ±340 W/m² untuk setiap meter persegi permukaan.



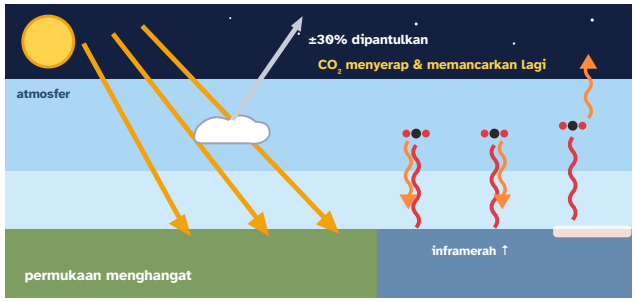
Langkah 3. Awan, es, dan permukaan terang memantulkan ±30% kembali ke angkasa. Itulah albedo.



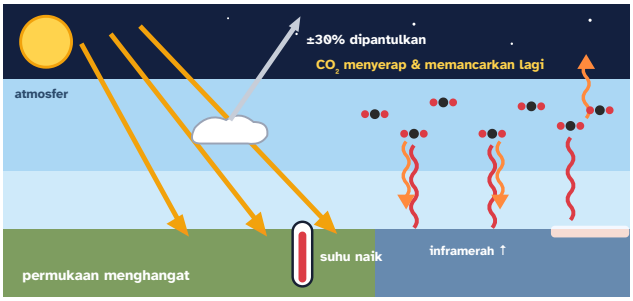
Langkah 4. Sisanya diserap daratan dan lautan, sehingga permukaan menghangat.



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 CO_2 → selimut makin tebal → 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, $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W m⁻² 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 $S_0 = 1\,361$ W/m² 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 ±−18 °C, padahal rata-rata sungguhan ±15 °C. Selisihnya adalah 'hadiah' dari selimut gas rumah kaca!

Cek satuan: $S_0 = 1\,361\ \mathrm{W/m^2}$ adalah intensitas Matahari di jarak Bumi. $\left(\frac{\mathrm{W/m^2}}{\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}}\right)^{1/4} = \mathrm{K}$, 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 SA, albedo 0,25): hasilnya ±−63 °C, mirip suhu Mars sungguhan karena atmosfernya sangat tipis. Lalu coba **Venus** (d = 0,72 SA, albedo 0,76): hasilnya ±−43 °C, padahal permukaan Venus ±460 °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 $S = 1\,361$ W/m² dan $\alpha = 0{,}30$, berapa suhu Bumi seandainya tidak ada efek rumah kaca?

1. Energi yang diserap per m²: $\dfrac{1\,361 \times 0{,}70}{4} \approx 238$ W/m².
2. $T^4 = \dfrac{238}{5{,}67 \times 10^{-8}} \approx 4{,}2 \times 10^9\ \mathrm{K}^4$.
3. $T = (4{,}2 \times 10^9)^{1/4} \approx 255\ \mathrm{K} \approx -18$ °C.

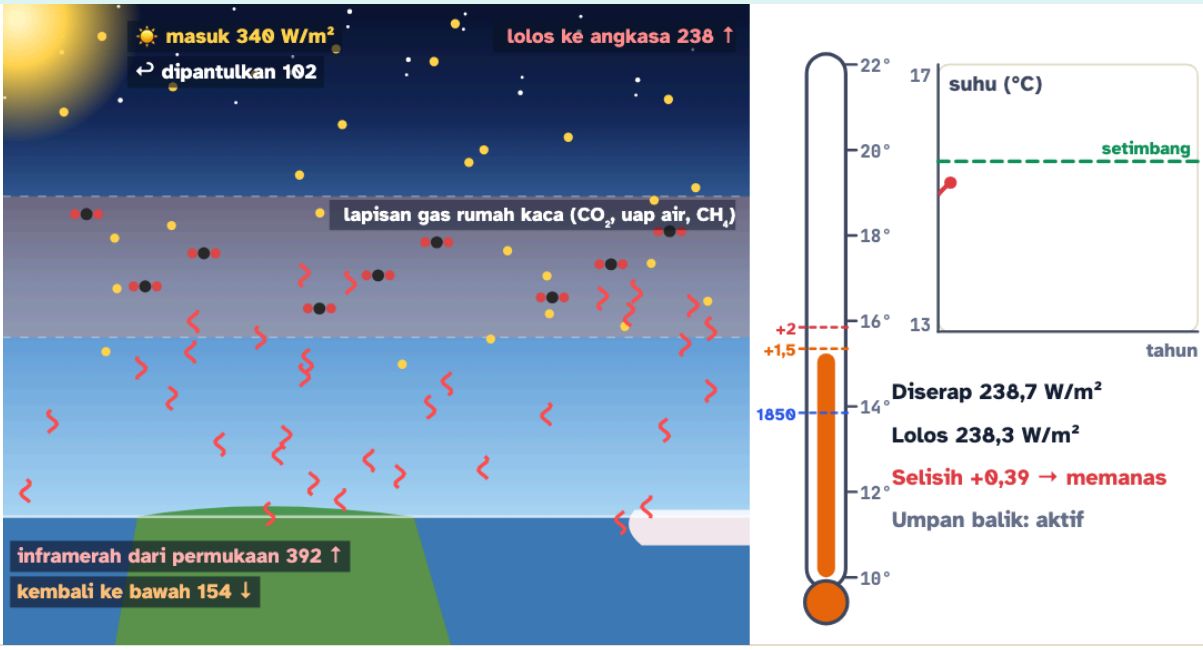
Tanpa selimut, Bumi membeku pada ±−18 °C. Kenyataannya rata-rata ±15 °C. Efek rumah kaca alami menambah ±33 °C dan membuat kehidupan mungkin!

⚠️ **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.

LAB MINI Neraca energi Bumi: atur CO_2 dan albedo

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-34



Suhu rata-rata	Suhu setimbang	Kenaikan sejak ±1850	Ketidakseimbangan energi
15,24 °C	15,55 °C	1,39 °C	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 CO_2 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

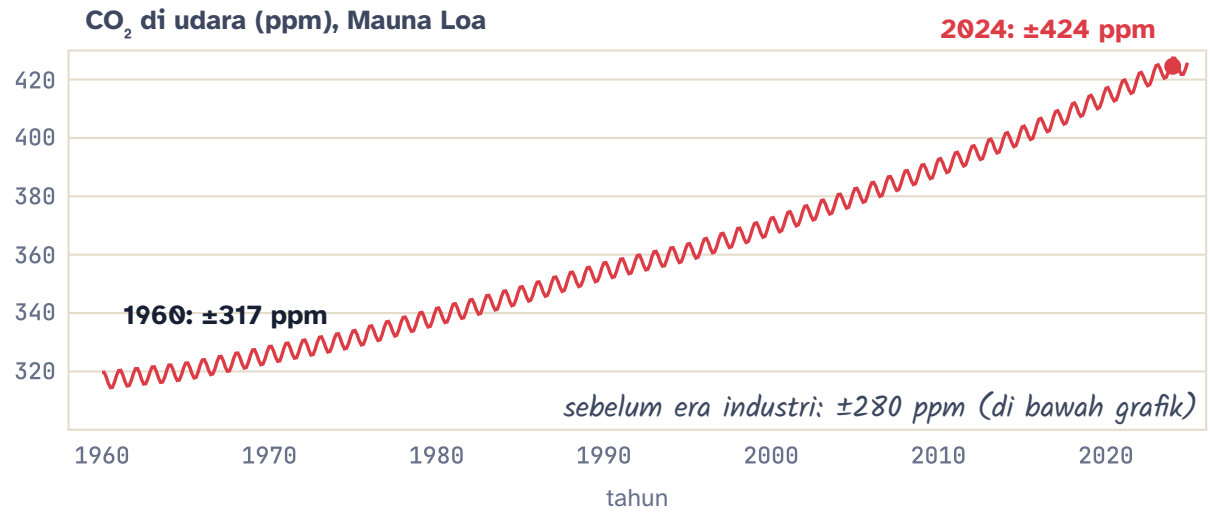
Anggap atmosfer satu lapisan yang menyerap bagian ε (emisivitas) inframerah dari permukaan dan bersuhu T_a. Neraca lapisan: $\varepsilon\sigma T_s^4 = 2\varepsilon\sigma T_a^4$, sehingga $T_a^4 = T_s^4/2$. Neraca di puncak atmosfer: $\frac{S}{4}(1-\alpha) = (1-\varepsilon)\sigma T_s^4 + \varepsilon\sigma T_a^4 = \sigma T_s^4\left(1-\frac{\varepsilon}{2}\right)$. Hasilnya $T_s = T_e\left(\dfrac{2}{2-\varepsilon}\right)^{1/4}$, dengan $T_e \approx 255$ K. Agar $T_s = 288$ K, diperlukan $\varepsilon \approx 0{,}78$. Jika $\varepsilon = 1$, $T_s = 2^{1/4}T_e \approx 303$ 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 CO_2 paling panas. Tahun 1859, **John Tyndall** mengukur bahwa CO_2 dan uap air menyerap inframerah. Tahun 1896, **Svante Arrhenius** menghitung dengan tangan bahwa melipatgandakan CO_2 akan menghangatkan Bumi beberapa derajat. Sejak 1958, **Charles Keeling** mengukur CO_2 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 lingkar pohon.



Kurva Keeling (disederhanakan dari data pengukuran). Gelombang kecil tiap tahun terjadi karena hutan belahan utara menyerap CO_2 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
CO_2 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 ≠ CO_2

Asap hitam dari knalpot atau cerobong adalah **pencemaran udara**: partikel halus (PM2,5), jelaga, dan gas beracun yang merusak paru-paru. CO_2 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 CO_2 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 "menggeser" 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."

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.

MITOS

"Lubang ozon adalah penyebab pemanasan global."

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: $\mathrm{C} + \mathrm{O}_2 \rightarrow \mathrm{CO}_2$. 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 ±0,74 kg, tetapi saat dibakar menghasilkan **±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 ±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."

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.

MITOS

"Mobil listrik pasti bebas emisi."

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 ±20% energi cahaya menjadi listrik. Indonesia berada di khatulistiwa, sehingga rata-rata menerima ±4–5 kWh energi cahaya per m^2 setiap hari.

RUMUS HIDUP

Daya panel surya

$$P = \eta\, I\, A$$

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: ≈ 33% dari mesin motor bebek · ≈ 5 × rice cooker saat memasak · ≈ 200 × lampu LED

Cek satuan: $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} \times \mathrm{m}^2 = \mathrm{W}$. Efisiensi ditulis dalam persen, jadi dibagi 100.

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

KERJAKAN BERSAMA **PLTS di atap rumah Sari**

Atap rumah Sari dipasangi 6 panel surya, masing-masing seluas 2 m² dengan efisiensi 20%. Di kotanya, energi cahaya Matahari rata-rata 4,5 kWh per m² per hari. Berapa energi listrik per hari, dan berapa rupiah per bulan yang bisa dihemat (tarif ±Rp1.445/kWh)?

1. Luas total: $A = 6 \times 2 = 12$ m².
2. Energi listrik per hari: $E = \eta \times (\text{energi cahaya per m}^2) \times A = 0{,}20 \times 4{,}5 \times 12 = 10{,}8$ kWh.
3. Per bulan: $10{,}8 \times 30 = 324$ 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 (±20%), sehingga hasil nyata ±8–9 kWh per hari.

Sekitar 9–11 kWh per hari, cukup untuk sebagian besar kebutuhan rumah tangga hemat, dan menghindari ±250 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 (m³/s). PLTA Cirata di Jawa Barat berkapasitas ±1.000 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 $\frac{1}{2}mv^2$, 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

KERJAKAN BERSAMA **Satu turbin di Sidrap**

Satu turbin PLTB Sidrap memiliki baling-baling berdiameter 114 m. Jika angin rata-rata 7 m/s, massa jenis udara 1,2 kg/m³, dan efisiensi 35%, berapa daya rata-ratanya? Bandingkan dengan kapasitas maksimum turbin, 2,5 MW.

1. Luas sapuan: $A = \frac{\pi}{4}D^2 = \frac{\pi}{4}(114)^2 \approx 10\,207$ m².
2. $P = \frac{1}{2} \times 1{,}2 \times 10\,207 \times 7^3 \times 0{,}35 \approx 735\,000$ W $\approx 0{,}74$ MW.
3. Rasio terhadap kapasitas: $0{,}74/2{,}5 \approx 0{,}29$, yaitu ±29%.

Rata-rata ±0,74 MW. Angka ±29% itu disebut faktor kapasitas: turbin tidak selalu bekerja penuh karena angin naik-turun. PLTP bisa mencapai 80–90%, PLTS ±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 (±24 GW) dan kapasitas terpasangnya menempati peringkat kedua dunia. Masih banyak yang belum dimanfaatkan, mungkin menunggu insinyur seperti kamu!

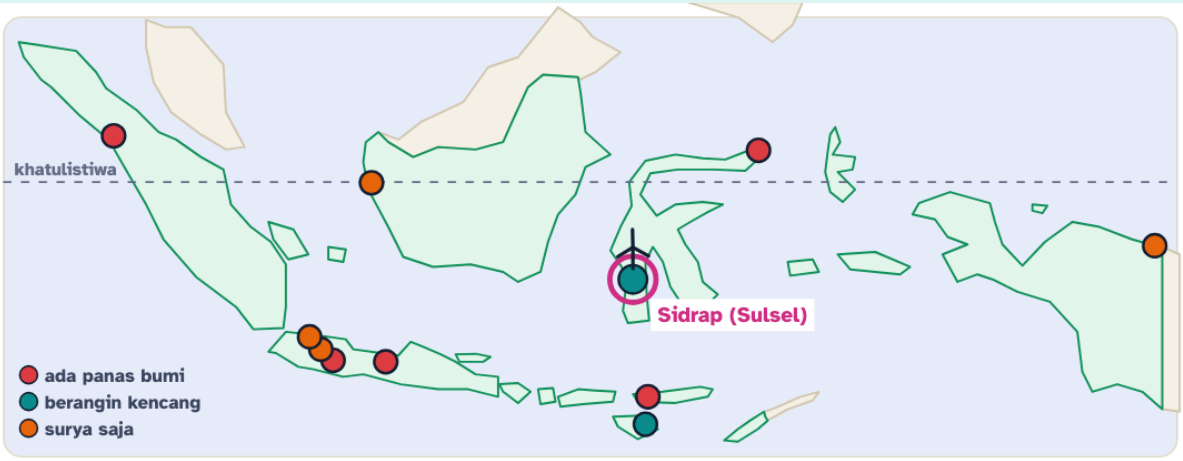
Biomassa dan biogas

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

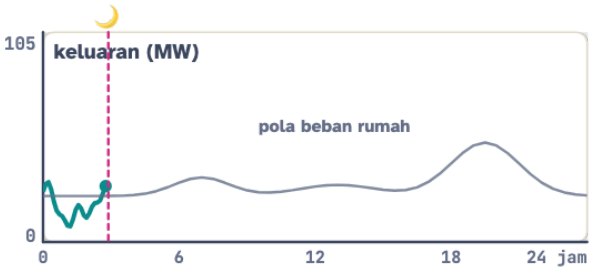


Potensi di lokasi ini (perkiraan):

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	Energi setahun	Cukup untuk	CO_2 dihindari
29 %	258 GWh	184.000 rumah	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.

Kompor 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

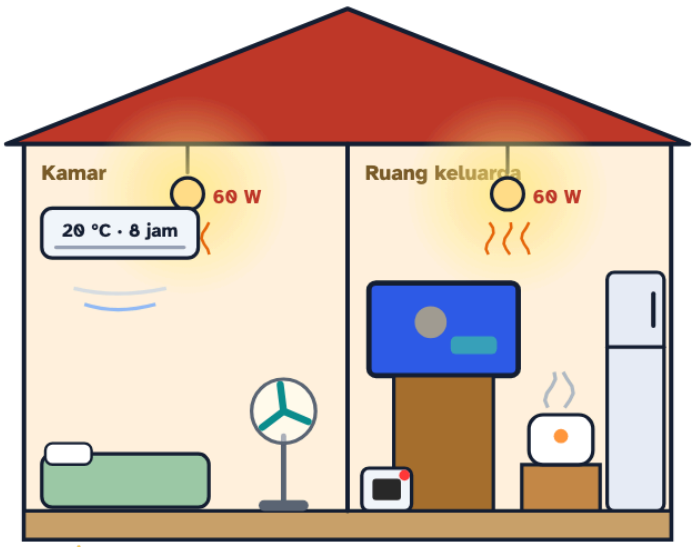
Di Kamojang dan Dieng, uap panas bumi memutar turbin siang dan malam tanpa membakar apa pun.

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 ±0,8 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	Tagihan per bulan	CO_2 per bulan	Hemat vs rumah boros
390 kWh	Rp564.000	312 kg	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 ±Rp1.445/kWh.

Transportasi juga penyumbang besar. Membakar satu liter bensin menghasilkan ±2,3 kg CO_2. Kendaraan yang irit dan **penuh penumpang** membagi jejak karbonnya ke banyak orang.

RUMUS HIDUP

Jejak karbon perjalanan

$$m_{CO_2} = \frac{d}{e} \times 2{,}3 \div n$$

Setiap liter bensin yang dibakar melepas ±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: ≈ 6,8 × satu apel · ≈ 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

KERJAKAN BERSAMA **Motor sendirian atau bus kota?**

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 → $0{,}44 \times 2{,}3 \approx 1{,}02$ kg CO_2, semuanya milik Raka.
2. Bus: bensin/solar $20/3 \approx 6{,}7$ L → $6{,}7 \times 2{,}3 \approx 15{,}3$ kg CO_2 untuk seluruh bus.
3. Dibagi 40 penumpang: $15{,}3/40 \approx 0{,}38$ kg per orang.

Bus penuh ±0,38 kg per orang, kurang dari separuh motor sendirian (±1,02 kg). Kunci efisiensi transportasi adalah berbagi kendaraan. (Untuk solar, angkanya ±2,7 kg CO_2 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.

COBA SENDIRI **Motor listrik vs motor bensin selama setahun**

Sari menempuh 20 km per hari selama 300 hari setahun. Motor bensin: 50 km/L, bensin Rp10.000/L, 2,3 kg CO_2/L. Motor listrik: 30 Wh/km, tarif Rp1.445/kWh, listrik 0,8 kg CO_2/kWh. Bandingkan biaya dan CO_2 per tahun.

1. Jarak setahun: $20 \times 300 = 6\,000$ km.
2. Motor bensin: $6\,000/50 = 120$ L → biaya Rp1.200.000, CO_2 $120 \times 2{,}3 = 276$ kg.
3. Motor listrik: $6\,000 \times 0{,}030 = 180$ kWh → biaya $180 \times 1\,445 \approx$ Rp260.000, CO_2 $180 \times 0{,}8 = 144$ kg.
4. Jika baterainya diisi dari PLTS atap, CO_2 saat dipakai mendekati nol.

Motor listrik ±4–5 kali lebih murah per tahun dan menghasilkan ±setengah CO_2, 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 CO_2 tumbuh secara **logaritmik**: gaya radiasi (tambahan energi yang tertahan) kira-kira $\Delta F \approx 5{,}35\ \ln(C/C_0)$ W/m². Melipatgandakan CO_2 memberi $\Delta F \approx 3{,}7$ W/m². Tanpa umpan balik, Bumi cukup menghangat ±1,1–1,2 °C untuk mengimbanginya (respons Planck). Umpan balik uap air dan es mencair memperbesarnya menjadi ±3 °C (perkiraan terbaik, rentang ±2,5–4 °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 CO_2 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** **CO_2 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 °C. Mengapa suhu rata-rata Bumi sebenarnya ±15 °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!

$$m_{CO_2} = \frac{d}{e} \times 2{,}3 \div n$$

Jejak karbon perjalanan. Setiap liter bensin yang dibakar melepas ±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

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 ±23,5°, 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.

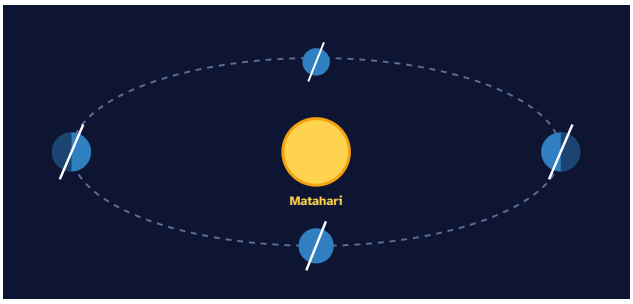
Jawabannya: kemiringan sumbu Bumi. Bukti bahwa jarak bukan penyebabnya: Bumi justru paling dekat ke Matahari pada awal Januari, saat Eropa sedang musim dingin! Lagi pula, ketika belahan utara musim panas, belahan selatan musim dingin pada saat yang sama, padahal jarak keduanya ke Matahari hampir sama. Yang menentukan adalah seberapa tegak sinar Matahari jatuh dan berapa jam siangnya.

35.1 Bumi, Bulan, Matahari: jam raksasa di langit

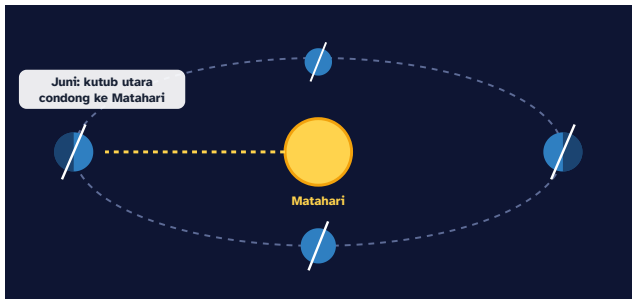
Rotasi Bumi (berputar pada porosnya sekali sehari) membuat siang dan malam. Bumi berputar ke arah timur, sehingga Matahari tampak terbit di timur. Dalam satu jam Bumi berputar 15°. Indonesia membentang ±46° bujur

(±95° 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.

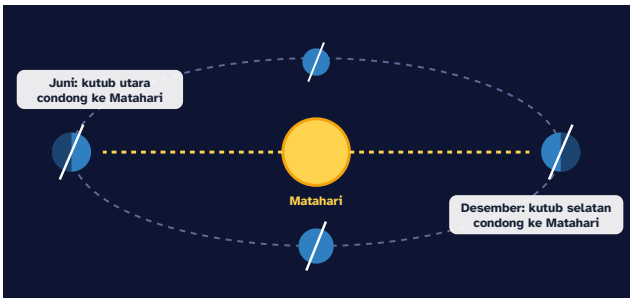
Revolusi Bumi (mengelilingi Matahari sekali setahun) dengan sumbu yang miring ±23,5° membuat **musim**. Ikuti animasinya.



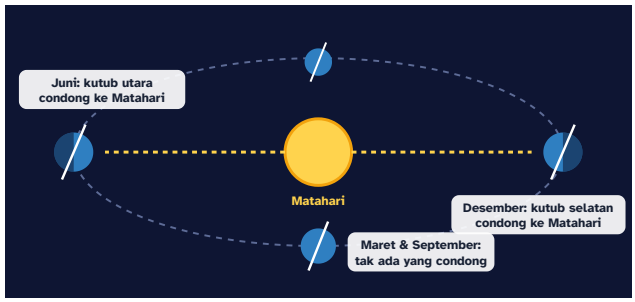
Langkah 1. Bumi mengelilingi Matahari sekali setahun. Sumbunya (garis putih) miring ±23,5° dan selalu menunjuk ke arah yang sama di langit.



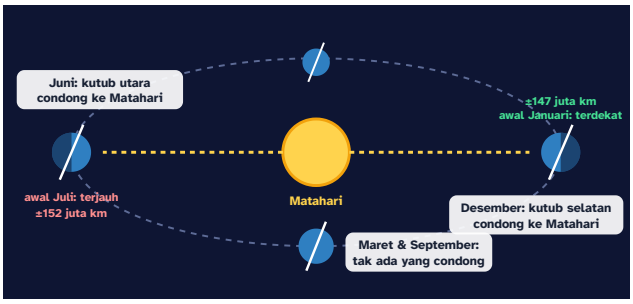
Langkah 2. Sekitar Juni, belahan utara condong ke Matahari: sinar jatuh lebih tegak dan siang lebih panjang. Musim panas di Eropa, musim dingin di Australia.



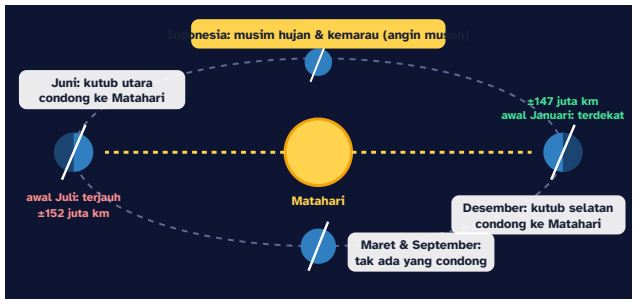
Langkah 3. Sekitar Desember, keadaannya terbalik: belahan selatan condong ke Matahari. Musim panas di Australia, musim dingin di Eropa.



Langkah 4. Sekitar 21 Maret dan 23 September, Matahari tepat di atas khatulistiwa. Di Pontianak, tengah hari tanpa bayangan!



Langkah 5. Jebakannya: Bumi paling dekat ke Matahari pada awal Januari (±147 juta km) dan paling jauh pada awal Juli (±152 juta km). Bedanya hanya ±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 ±29,5 hari: dasar kalender Hijriah.

Tebak Dulu!

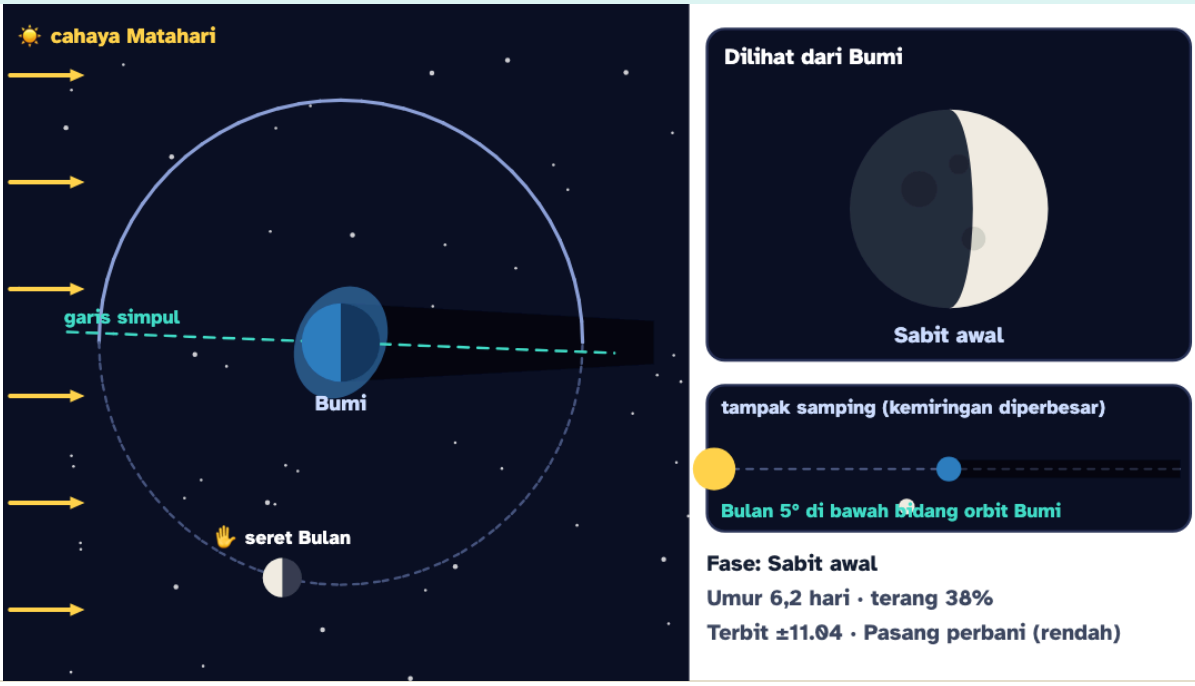
Mengapa bentuk Bulan berubah-ubah dari sabit sampai purnama?

- 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.

LAB MINI **Fase Bulan, gerhana, dan pasang surut: seret Bulan!**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-35



Fase	Umur Bulan	Bagian terang	Terbit sekitar
Sabit awal	6,2 hari	38 %	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 pasangnya paling tinggi?

Bidang orbit Bulan miring ±5° 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 kacamata gerhana, para peneliti mengukur korona Matahari, dan turis datang dari luar negeri. Totalitasnya hanya ±1,5–3 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 ±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 (±140,7° BT) pukul 05.30 WIT. Kira-kira pukul berapa Matahari terbit di Banda Aceh (±95,3° 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, ±$9{,}46 \times 10^{12}$ km. Ingat, tahun cahaya adalah satuan **jarak**, bukan waktu!

Benda	Jarak dari Matahari	Waktu tempuh cahaya Matahari	Diameter (× 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	±0,15 × Matahari

RUMUS HIDUP **Waktu tempuh cahaya**

$$t = \frac{d}{c}$$

Cahaya super cepat, tetapi alam semesta super luas. Melihat jauh berarti melihat masa lalu.

d Jarak km

t Waktu tempuh s

WAKTU TEMPUH

499

s

Cahaya butuh **499** detik untuk menempuh **1,496 × 10⁸** km. Lihat Satuan Nusantara di bawah sebagai pembanding!

Satuan Nusantara: ≈ 14% dari satu jam · ≈ 8,3 × satu menit · ≈ 1.663 × kedipan mata

Cek satuan: $\frac{\text{km}}{\text{km/s}} = \text{s}$, dengan $c \approx 299\,792$ km/s.

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

CONTOH **Delapan menit masa lalu**

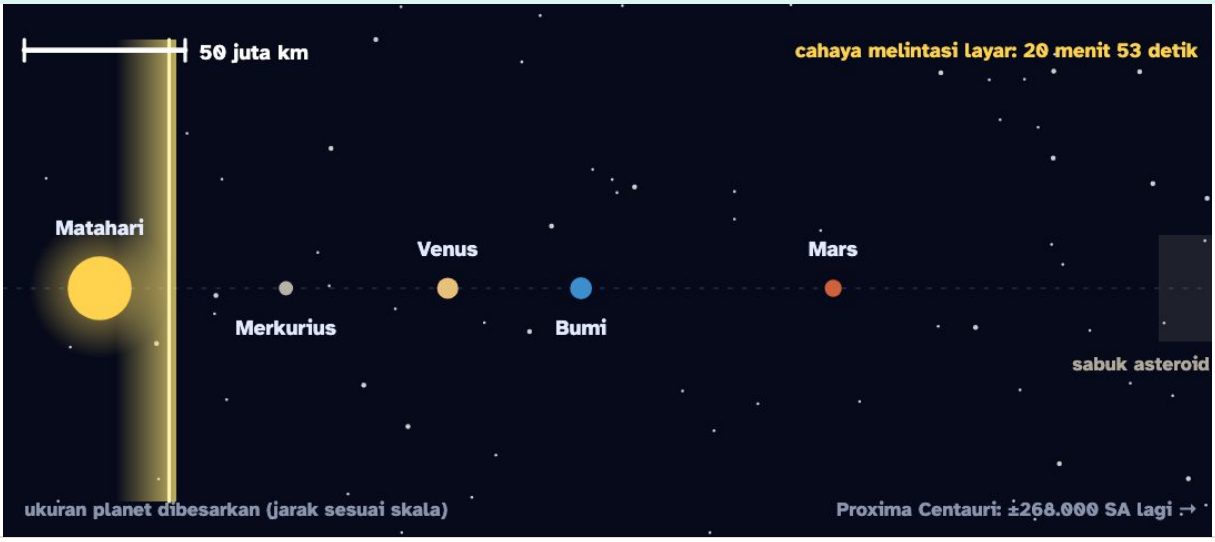
Jarak Bumi–Matahari $1{,}5 \times 10^{11}$ m dan cepat rambat cahaya 3×10^{8} m/s. Berapa lama cahaya Matahari sampai ke Bumi?

1. $t = \frac{d}{c} = \frac{1{,}5 \times 10^{11}}{3 \times 10^{8}} = 500$ s.
2. 500 s $= 8$ menit 20 detik.

8 menit 20 detik. Matahari yang kamu lihat adalah Matahari 8 menit yang lalu!

LAB MINI **Tata surya berskala: zoom, seret, dan kirim kilatan cahaya**

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-35



Lebar layar	Waktu sejak kilatan
2,51 SA = 375,8 juta km	1 menit 12 detik
Cahaya sudah menempuh	**Baru saja melewati**
21,6 juta km (0,144 SA)	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 13 **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.

$$4\,{}^{1}\mathrm{H} \;\rightarrow\; {}^{4}\mathrm{He} + 2e^{+} + 2\nu + \text{energi}$$

Massa satu inti helium ±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 ±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.

KERJAKAN BERSAMA **Menimbang daya Matahari dari Bumi**

Di jarak Bumi ($d = 1{,}5 \times 10^{11}$ m), setiap m² 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: $\dfrac{\Delta m}{\Delta t} = \dfrac{L}{c^2} = \dfrac{3{,}8 \times 10^{26}}{9 \times 10^{16}} \approx 4{,}3 \times 10^9$ kg/s.

Daya Matahari ±$3{,}8 \times 10^{26}$ W, setara ±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 ±20° 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 $b = \dfrac{L}{4\pi d^2}$ 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**.

RUMUS HIDUP

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.

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: $b = 2{,}898 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,K} = 2{,}898 \times 10^{6}\ \mathrm{nm\,K}$, jadi $\frac{\mathrm{nm\,K}}{\mathrm{nm}} = \mathrm{K}$.

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: "**O**h, **B**etapa **A**syiknya **F**isika: **G**ampang, **K**ok, **M**antap!" 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.

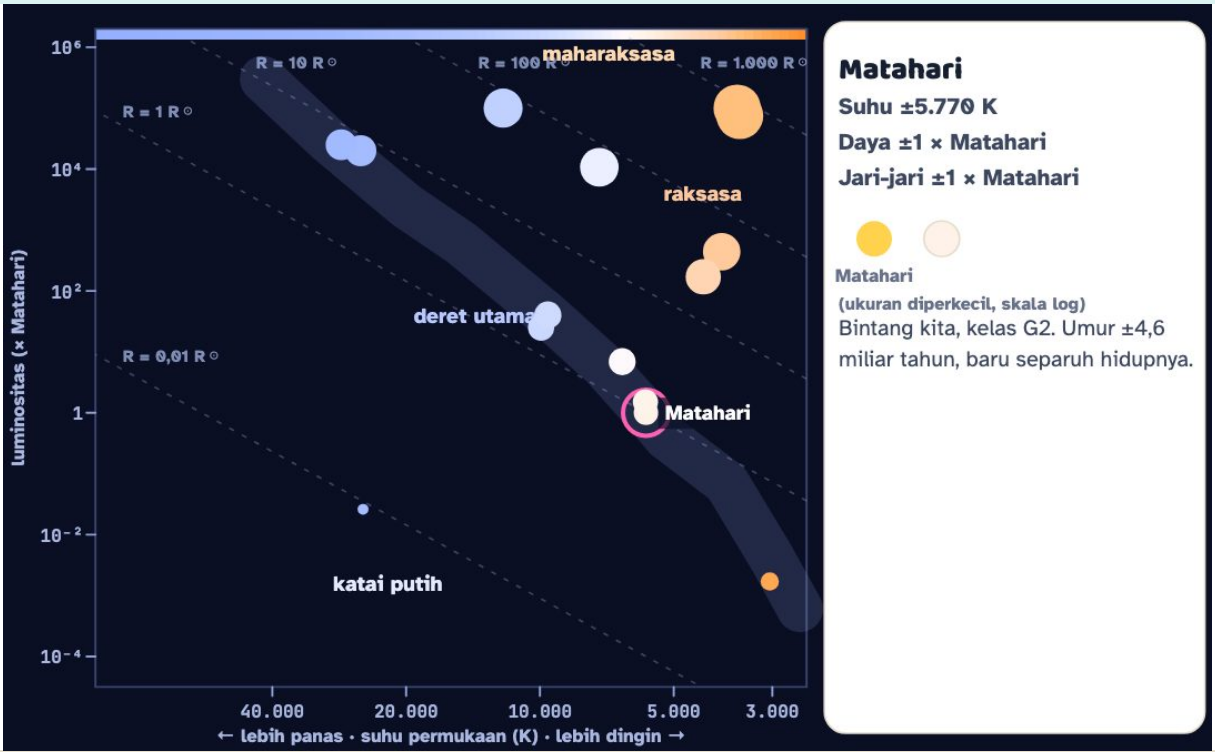
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-ASTRO-LUMINOSITAS

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	Suhu	Luminositas	Jari-jari
Matahari	5.772 K	1 × Matahari	1 × 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?

KERJAKAN BERSAMA **Betelgeuse si merah**

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: $\lambda_{\text{maks}} = \dfrac{2{,}9 \times 10^{-3}}{3\,600} \approx 8{,}1 \times 10^{-7}$ m $= 810$ nm (inframerah dekat).

2. Rigel: $\lambda_{\text{maks}} = \dfrac{2{,}9 \times 10^{-3}}{12\,000} \approx 2{,}4 \times 10^{-7}$ m $= 240$ 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!

COBA SENDIRI **Dua bintang sama terang**

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. $\dfrac{R_A}{R_B} = \left(\dfrac{T_B}{T_A}\right)^2 = \left(\dfrac{1}{2}\right)^2 = \dfrac{1}{4}$.

$R_A : R_B = 1 : 4$. **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."

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.

MITOS

"Bintang Utara (Polaris) adalah bintang paling terang dan selalu jadi penunjuk arah."

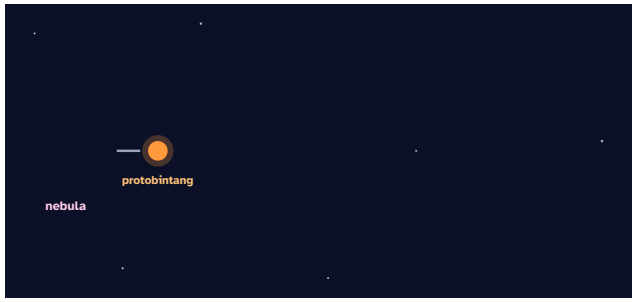
FAKTA

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.

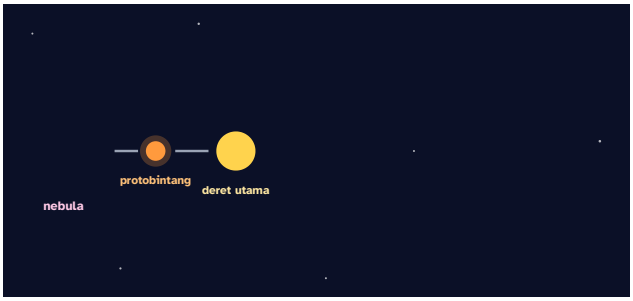
35.5 Siklus hidup bintang

Bintang lahir, hidup, dan mati. Yang menentukan nasibnya hampir hanya satu hal: **massanya**.

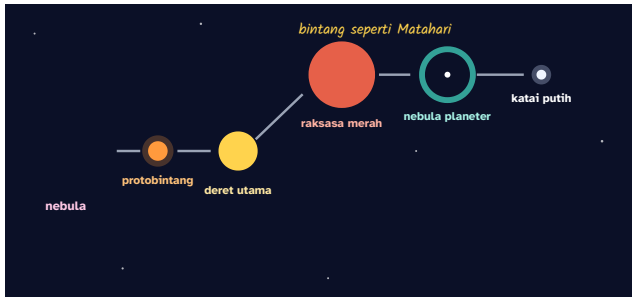
Langkah 1. Bintang lahir di **nebula**, awan raksasa gas dan debu. Bagian yang sedikit lebih padat mulai runtuh karena gravitasinya sendiri.



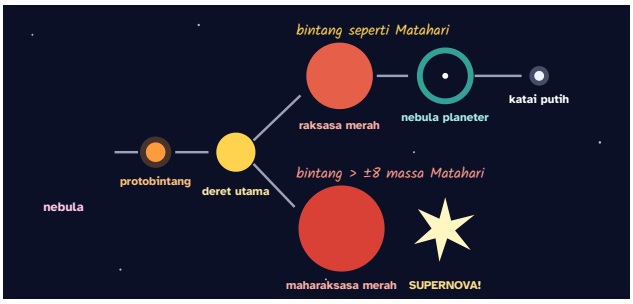
Langkah 2. Gas yang runtuh memanas menjadi **protobintang**. Ketika intinya mencapai ±10 juta K, fusi hidrogen menyala.



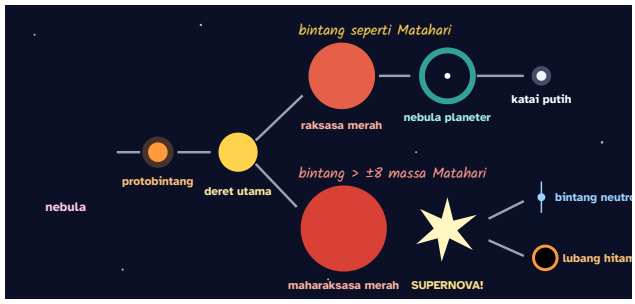
Langkah 3. Bintang memasuki **deret utama**: gravitasi ke dalam seimbang dengan tekanan ke luar. Bintang menghabiskan ±90% hidupnya di sini.



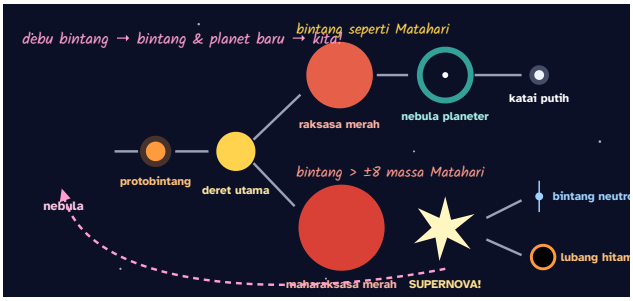
Langkah 4. Bintang seperti Matahari kehabisan hidrogen di intinya, lalu mengembang menjadi **raksasa merah**. Lapisan luarnya terlepas menjadi **nebula planeter**, dan intinya tersisa sebagai **katai putih** seukuran Bumi.



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!

RUMUS HIDUP **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!

$M/M_\odot$ 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: $R_s = \dfrac{2GM}{c^2}$. 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 ±1,4 massa Matahari (batas Chandrasekhar). Idenya sempat ditertawakan, tetapi kemudian terbukti dan ia meraih Nobel 1983. Tahun 1967, mahasiswi **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, ±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!

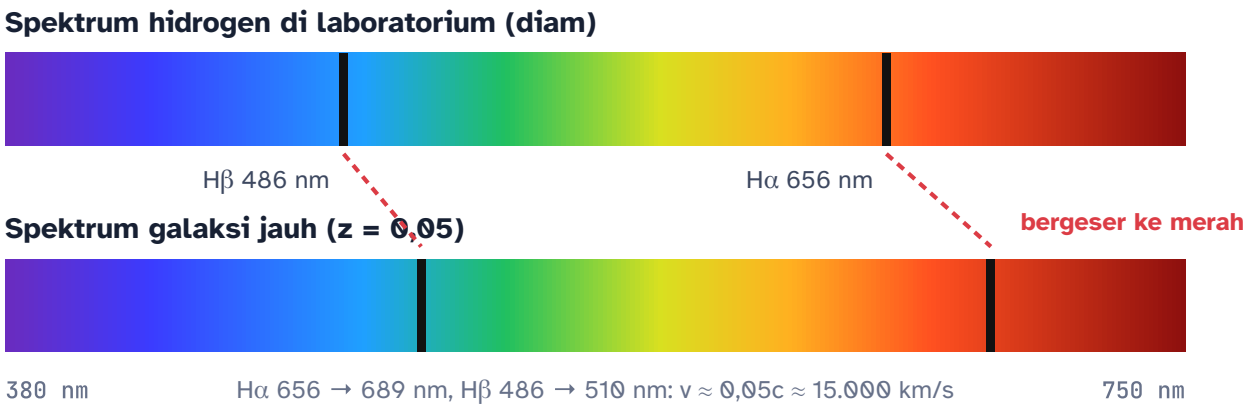
35.6 Galaksi dan alam semesta yang mengembang

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 ±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:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c}$$



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**.

RUMUS HIDUP **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.

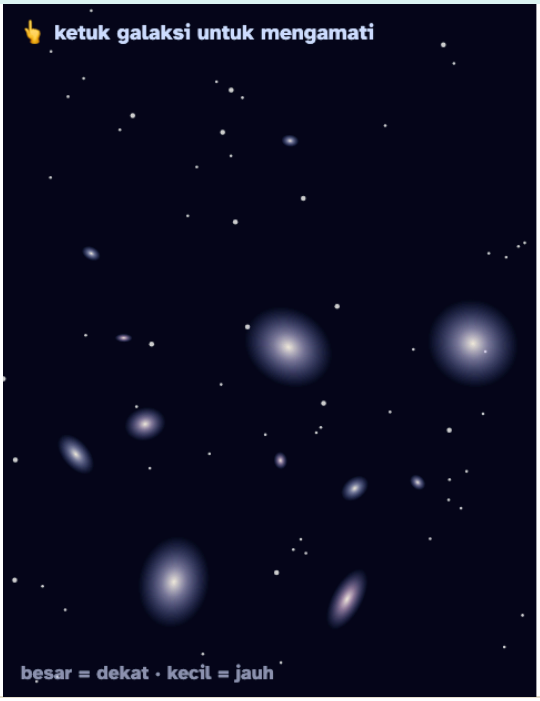
Cek satuan: $\dfrac{\mathrm{km/s}}{\mathrm{Mpc}} \times \mathrm{Mpc} = \mathrm{km/s}.$

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 ±13,8 miliar tahun lalu: **Big Bang**.

LAB MINI Detektif Hubble: ukur galaksi, temukan umur alam semesta

LAB MINI INTERAKTIF · COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-35



Galaksi diukur	H_0 garismu	Umur ≈ $1/H_0$	H_0 terbaik dari data
0	50 km/s/Mpc	19,6 miliar tahun	butuh ≥3 galaksi

Ketuk galaksi untuk mengamati spektrumnya. Pergeseran garis Hα 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 Hα (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. $z = \dfrac{669{,}4 - 656{,}3}{656{,}3} = \dfrac{13{,}1}{656{,}3} \approx 0{,}020.$

2. $v \approx zc = 0{,}020 \times 3 \times 10^5 \approx 6\,000$ km/s.

3. $d = \dfrac{v}{H_0} = \dfrac{6\,000}{70} \approx 86$ Mpc ≈ 280 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 $H_0 = 70$ km/s/Mpc dalam miliar tahun (1 Mpc $= 3{,}086 \times 10^{19}$ km, 1 tahun $= 3{,}156 \times 10^7$ s).

1. $$\frac{1}{H_0} = \frac{3{,}086 \times 10^{19}\ \mathrm{km}}{70\ \mathrm{km/s}} \approx 4{,}41 \times 10^{17}\ \mathrm{s}.$$

2. Dibagi detik per tahun: $\dfrac{4{,}41 \times 10^{17}}{3{,}156 \times 10^7} \approx 1{,}40 \times 10^{10}$ 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, ±2,7 K, dengan puncak di panjang gelombang ±1 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 (±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."

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.

MITOS

"Di luar angkasa tidak ada gravitasi."

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 ±5% isi alam semesta. Sekitar 27% adalah **materi gelap** yang tak terlihat tetapi gravitasinya terasa, dan ±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. Fisikanya menarik: hilal sangat tipis (bagian yang tersinari ±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°. 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 (±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

$$x = a \times 10^{n}\ \mathrm{m}$$

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 × beras per orang, lalu dibagi massa sebutir beras.

Bab 2 · #4

Konversi km/jam → m/s

$$v_{\mathrm{m/s}} = \frac{v_{\mathrm{km/jam}}}{3{,}6}$$

Cukup bagi dengan 3,6, karena 1 km/jam = 1.000 m ÷ 3.600 s = 1/3,6 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

$$\mathrm{KR} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

Seberapa besar 'keraguan' dibanding hasil ukurnya. Makin kecil persennya, makin teliti pengukuranmu.

Bab 3 · #7

Resultan dua vektor

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + 2\,A\,B\cos\theta}$$

Searah (θ = 0°) paling besar, berlawanan (θ = 180°) paling kecil, tegak lurus (θ = 90°) 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)

$$v = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(k\,t^2\right) = 2\,k\,t$$

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 × lamanya).

Bab 4 · #2

Perpindahan pada GLBB

$$s = v_0\,t + \tfrac{1}{2}\,a\,t^2$$

Jarak = bagian 'seandainya tetap secepat awal' + bonus dari percepatan, yang tumbuh sebanding dengan kuadrat waktu.

Bab 4 · #3

Jarak henti kendaraan

$$d = v\,t_r + \frac{v^2}{2\,a}$$

Jarak henti = jarak selama bereaksi (belum direm) + jarak pengereman. Bagian kedua tumbuh sebanding kuadrat kecepatan!

Bab 4 · #4

Kecepatan jatuh bebas

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

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° − θ 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

$$x = v\sqrt{\frac{2\,h}{g}}$$

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 ⇔ 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× → percepatan 4×!

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

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{g\,r}{\mu_s}}$$

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)

$$v = \sqrt{{v_0}^2 + 2g\,h}$$

Energi potensial yang 'dicairkan' saat turun setinggi h berubah menjadi tambahan energi kinetik. Massa tidak berpengaruh!

Bab 8 · #22

Daya saat naik tangga

$$P = \frac{m\,g\,h}{t}$$

Daya = energi yang dipakai untuk naik (mgh) dibagi waktu. Naik secepat kilat = daya besar.

Bab 9 · #23

Gaya rata-rata saat benda dihentikan

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m\,v}{\Delta t}$$

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 (menggelinding tanpa selip)

$$v = \sqrt{\frac{2g\,h}{1+k}}$$

Mirip v = √(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 × massa pertama × 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

$$F = k\,x$$

Gaya pegas = konstanta pegas × 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 hidrostatis

$$P_h = \rho\,g\,h$$

Tekanan zat cair = massa jenis × gravitasi × kedalaman. Di air laut, setiap 10 m menambah ±1 atmosfer.

Bab 13 · #3

Dongkrak hidraulik

$$F_2 = F_1\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

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

$$v = \sqrt{2\,g\,h}$$

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)

$$v_t = \frac{2\,r^2\,(\rho_b - \rho_f)\,g}{9\,\eta}$$

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

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

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

$$P = \frac{n\,R\,T}{V}$$

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

$$\overline{E_k} = \tfrac{3}{2}\,k\,T$$

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(°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

$$y = A \sin\left(2\pi \left(f\,t - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

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

$$s = v\,t, \qquad v \approx 331 + 0{,}6\,T$$

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

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \implies s' = \frac{s\,f}{s - f}$$

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)

$$P = -\frac{100}{\mathrm{PR}}$$

Makin dekat titik jauh matamu, makin besar minus kacamatanya.

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

$$C = \frac{\varepsilon_r\,\varepsilon_0\,A}{d}$$

Keping lebih luas dan lebih rapat menampung lebih banyak muatan. Isolator di antaranya (dielektrik) melipatgandakan kapasitasnya.

Bab 22 · #4

Energi kapasitor

$$W = \tfrac{1}{2}\,C\,V^2$$

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

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

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C}}$$

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

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\,\varepsilon}}$$

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

$$E = c\,B$$

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

$$\lambda = \frac{h}{m\,v}$$

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

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

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

$$E = m\,c^2$$

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

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

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

$$N = \sum_{k=0}^{7} b_k \cdot 2^k = 128 b_7 + 64 b_6 + \cdots + 2 b_1 + b_0$$

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 gempanya.

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

$$v = \sqrt{g\, h}$$

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

$$P = \tfrac{1}{2}\,\rho\left(\tfrac{\pi}{4}D^2\right)v^3\,\eta$$

Angin dua kali lebih kencang membawa daya delapan kali lebih besar!

Bab 34 · #7

Jejak karbon perjalanan

$$m_{\mathrm{CO_2}} = \frac{d}{e} \times 2{,}3 \div n$$

Setiap liter bensin yang dibakar melepas ±2,3 kg CO_2, 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)

$$T = \frac{b}{\lambda_{\mathrm{maks}}}$$

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 × 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 × 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 hidrostatis	Tekanan akibat berat zat cair, $P = \rho g h$.
Gaya apung (Archimedes)	Gaya ke atas yang sama dengan berat fluida yang dipindahkan.
Kontinuitas	Debit fluida tetap: $A_1 v_1 = A_2 v_2$.
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, ±9,46 × 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.