



Physicspedia

BUKU • JILID 2 • BAB 13-24

Physicspedia

Fisika Itu Asyik!

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



dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD

Editor: Abdullah Hanif Hidayat

Didukung oleh Aurumgen Academy

Edisi 1 • 2026 • Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia

Tentang buku ini

Ini adalah Jilid 2 dari versi cetak Physicspedia. Bagian yang di layar dapat digeser dan dimainkan (Rumus Hidup, Lab Mini, animasi langkah) ditampilkan sebagai gambar, sedangkan latihan lengkap ada di PDF Bank Soal dan LKPD.

Physicspedia • Fisika Itu Asyik! Edisi 1 (2026).

Penulis: **dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD**

Editor: **Abdullah Hanif Hidayat**

Didukung oleh Aurumgen Academy.

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

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

Versi interaktif dengan komik bergerak, Rumus Hidup, Lab Mini, dan latihan berskor: aurumgen.my.id/physicspedia

Daftar isi

BAGIAN C • FLUIDA & PANAS

13	Fluida Statis	4
14	Fluida Dinamis	27
15	Suhu, Kalor & Perpindahan Kalor	54
16	Teori Kinetik Gas	79
17	Termodinamika	99

BAGIAN D • GELOMBANG & CAHAYA

18	Gelombang Mekanik	124
19	Bunyi	144
20	Cermin, Lensa & Alat Optik	167
21	Cahaya sebagai Gelombang	194

BAGIAN E • LISTRIK & MAGNET

22	Listrik Statis & Kapasitor	217
23	Listrik Dinamis	236
24	Medan Magnet	262

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 hidrostatik** 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**.

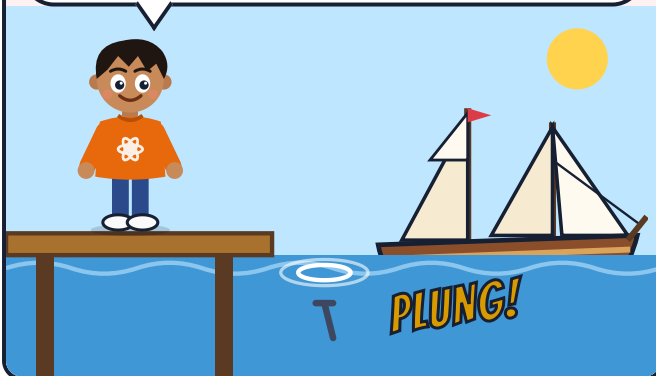
PAKU TENGGELAM, KAPAL MENGAPUNG

KOMIK • 4 PANEL

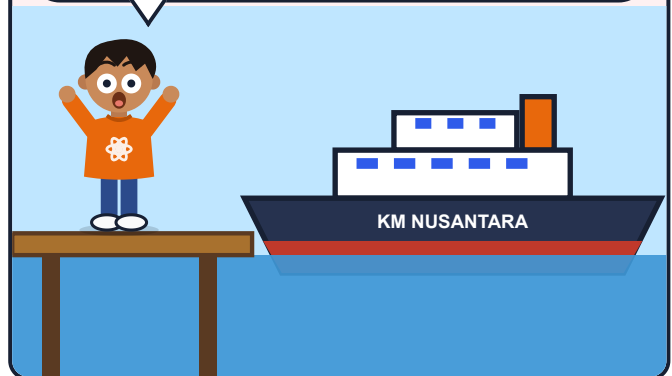
Pelabuhan rakyat, Makassar

RAKA

Paku sekecil ini aja langsung tenggelam.

**RAKA**

Terus, kenapa kapal baja segede gedung itu bisa mengapung?!



SARI

Paku dan kapal sama-sama dari besi. Berarti rahasianya bukan bahannya... tapi bentuknya?



foil "perahu" foil dikepal



Kak Nara datang

KAK NARA

Tepat! Rahasianya: berapa banyak air yang "didesak" kapal. Archimedes menemukannya 2.200 tahun lalu, konon sambil berendam!

TARSI

Seni membuat pinisi diakui UNESCO tahun 2017!



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 $\pm 1 \text{ cm}^2$)?

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 $\pm 39.000 \text{ N}$ dibagi luas empat telapak $\pm 0,5 \text{ m}^2 \rightarrow \pm 78.000 \text{ Pa}$. Perempuan: $\pm 490 \text{ N}$ dibagi 1 cm^2 ($0,0001 \text{ m}^2$) $\rightarrow \pm 4.900.000 \text{ Pa}$. 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:

$$P = \frac{F}{A}. \text{ Satuannya pascal (Pa): } 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2.$$

Satu pascal itu kecil sekali: kira-kira tekanan selembat 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 cm²

P

Tekanan Pa

TEKANAN

5×10^6

Pa

Gaya **490 N** yang bertumpu pada **1 cm²** menghasilkan tekanan **5×10^6 Pa**.

Satuan Nusantara: $\approx 49\%$ dari tekanan di dasar laut sedalam $\pm 1 \text{ km}$ · $\approx 22 \times$ tekanan ban motor · $\approx 48 \times$ tekanan udara di pantai

Cek satuan: $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$, jadi $\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$.

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?

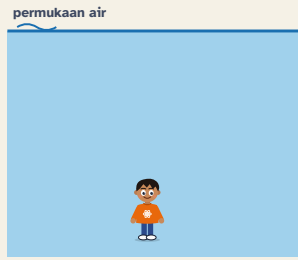
1 Luas alas: $A = 0,5 \times 0,4 = 0,2 \text{ m}^2$.

2 $P = F/A = 600/0,2 = 3000 \text{ Pa} = 3 \text{ kPa}$.

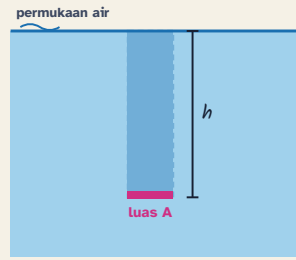
Tekanannya 3.000 Pa. Jika kardus didirikan pada sisinya yang lebih sempit, beratnya tetap 600 N, tetapi tekanannya membesar.

13.2 Tekanan hidrostatik: makin dalam, makin "berat"

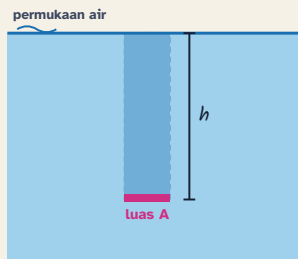
Saat menyelam ke dasar kolam, telingamu terasa ditekan. Penyebabnya adalah air di atasmu. Setiap lapisan air menekan lapisan di bawahnya, jadi makin dalam, makin besar tekanannya. Tekanan karena zat cair yang diam ini disebut **tekanan hidrostatik**. Dari mana rumusnya? Ikuti langkah berikut.



Langkah 1. Raka menyelam pada kedalaman h di bawah permukaan air yang diam.

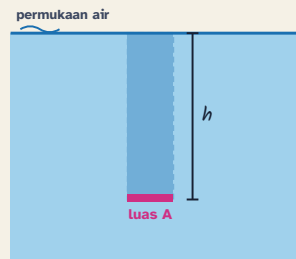


Langkah 2. Bayangkan "tiang air" tepat di atas sepetak kecil seluas A di dekat kepala Raka. Tiang itulah yang menekan petak tersebut.



Volume kolom: $V = A \cdot h$

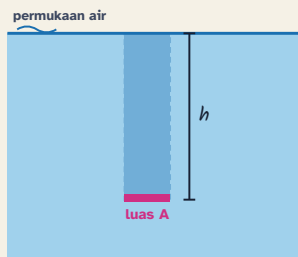
Langkah 3. Volume tiang air adalah luas alas dikali tinggi: $V = Ah$.



Volume kolom: $V = A \cdot h$

Massa air: $m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot h$

Langkah 4. Massanya: $m = \rho V = \rho Ah$, dengan ρ massa jenis air (1.000 kg/m^3 untuk air tawar).

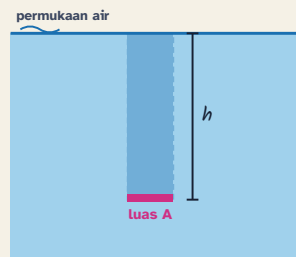


Volume kolom: $V = A \cdot h$

Massa air: $m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot h$

Berat air: $w = m \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g$

Langkah 5. Beratnya: $w = mg = \rho Ahg$.



Volume kolom: $V = A \cdot h$

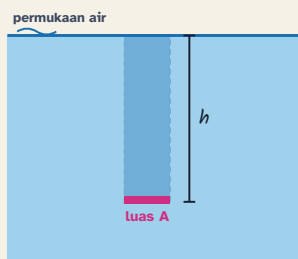
Massa air: $m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot h$

Berat air: $w = m \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g$

Tekanan = $w / A = \rho \cdot g \cdot h$

luas A tercoret: bentuk wadah tak berpengaruh

Langkah 6. Tekanan = gaya/luas = $\rho Ahg / A = \rho gh$. Luas A hilang! Tekanan hidrostatik hanya bergantung pada massa jenis, gravitasi, dan kedalaman.



Volume kolom: $V = A \cdot h$

Massa air: $m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot h$

Berat air: $w = m \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g$

Tekanan = $w / A = \rho \cdot g \cdot h$

luas A tercoret: bentuk wadah tak berpengaruh

Tekanan total: $P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h$

Langkah 7. Di atas permukaan air masih ada udara yang menekan dengan tekanan $P_0 \approx 101 \text{ kPa}$. Tekanan total di kedalaman h adalah $P = P_0 + \rho gh$.

$$P_h = \rho g h$$

Tekanan zat cair = massa jenis $\times$ gravitasi $\times$ kedalaman. Di air laut, setiap 10 m menambah ± 1 atmosfer.

 ρ Massa jenis fluida kg/m^3 h

Kedalaman m

 P_h

Tekanan hidrostatik Pa

TEKANAN HIDROSTATIS

100.450

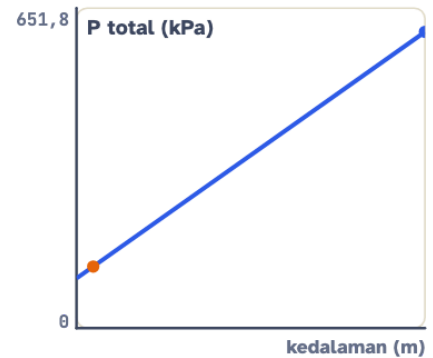
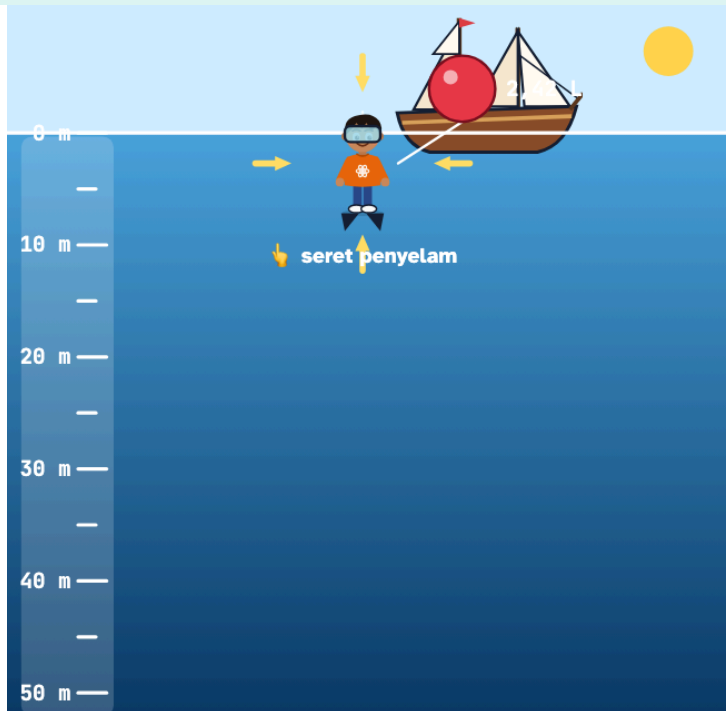
Pa

Di kedalaman **10** m dalam fluida bermassa jenis **1.025** kg/m^3 , tekanan hidrostatiknya **100.450** Pa. Jangan lupa tambahkan tekanan udara ± 101.300 Pa untuk tekanan total.

Satuan Nusantara: $\approx 99\%$ dari tekanan udara di pantai $\cdot \approx 46\%$ dari tekanan ban motor

$$\text{Cek satuan: } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \frac{\text{kg m/s}^2}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$$

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



$$P = P_0 + \rho g h$$

$$= 101,3 + 24,1 \text{ kPa}$$

$$= 125,4 \text{ kPa} \approx 1,24 \text{ atm}$$

$$\rho = 1.025 \text{ kg/m}^3$$

balon 3 L di permukaan $\rightarrow$ 2,42 L

tiap 10 m menambah 0,99 atm

Kedalaman

2,4 m

P hidrostatik

24,1 kPa

P total

1,24 atm

Volume balon

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 hidrostatik hanya bergantung pada kedalaman: $P_h = \rho gh$, dan h ketiganya sama 30 cm. Fakta yang mengejutkan ini disebut *paradoks hidrostatik*. 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 $P_h = \rho gh$, 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 $\pm 1/3$ 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 menyembrot 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 $F_2 = PA_2$:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \implies F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1}$$

RUMUS HIDUP Dongkrak hidraulik

$$F_2 = F_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

Diameter piston besar 10 kali piston kecil $\rightarrow$ luasnya 100 kali $\rightarrow$ 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: $\approx 1,5 \times$ berat mobil 1 ton $\cdot \approx 31 \times$ berat orang 50 kg $\cdot \approx 61 \times$ 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.

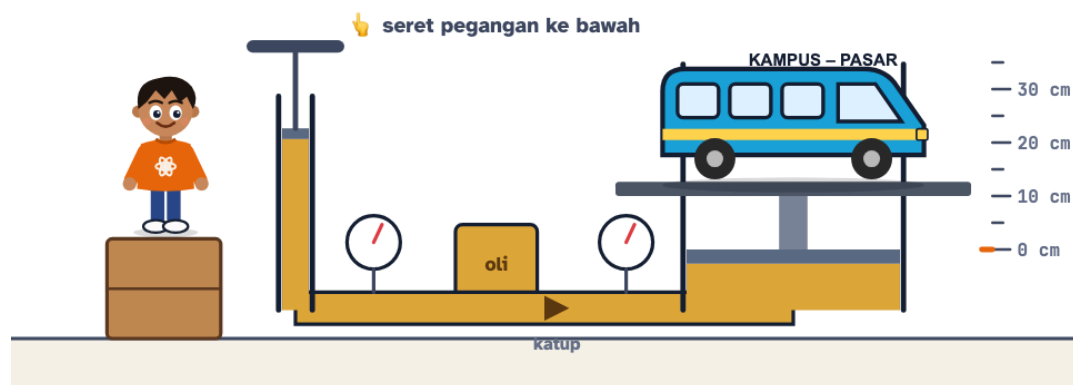
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-DONGKRAC

$$F_1 = m g (d_1/d_2)^2 = 184 \text{ N}$$

Tekanan oli = 260 kPa (sama di kedua piston)

Gaya $\times 64$, tetapi tiap pompa 12 cm hanya naik 0,188 cm

Usaha Raka 0 J = Ep angkot 0 J



Gaya Raka F_1
184 N

Tekanan oli
260 kPa

Angkot naik
0 cm

Jumlah pompa
0

Usaha Raka
0 J

Ep angkot
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 hidrolik **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.

Pengangkat mobil hidrolik punya piston kecil berdiameter 4 cm dan piston besar berdiameter 32 cm. Mobil bermassa 1.280 kg ($g = 10 \text{ m/s}^2$). (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: $F_2 = 1280 \times 10 = 12.800 \text{ N}$, jadi $F_1 = 12.800/64 = 200 \text{ N}$.
- 3 Volume oli yang berpindah sama: $A_1 s_1 = A_2 s_2$, sehingga $s_1 = 64 \times 5 = 320 \text{ cm}$.

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 hidrolik) 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 $\pm 101.300 \text{ Pa}$, 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.

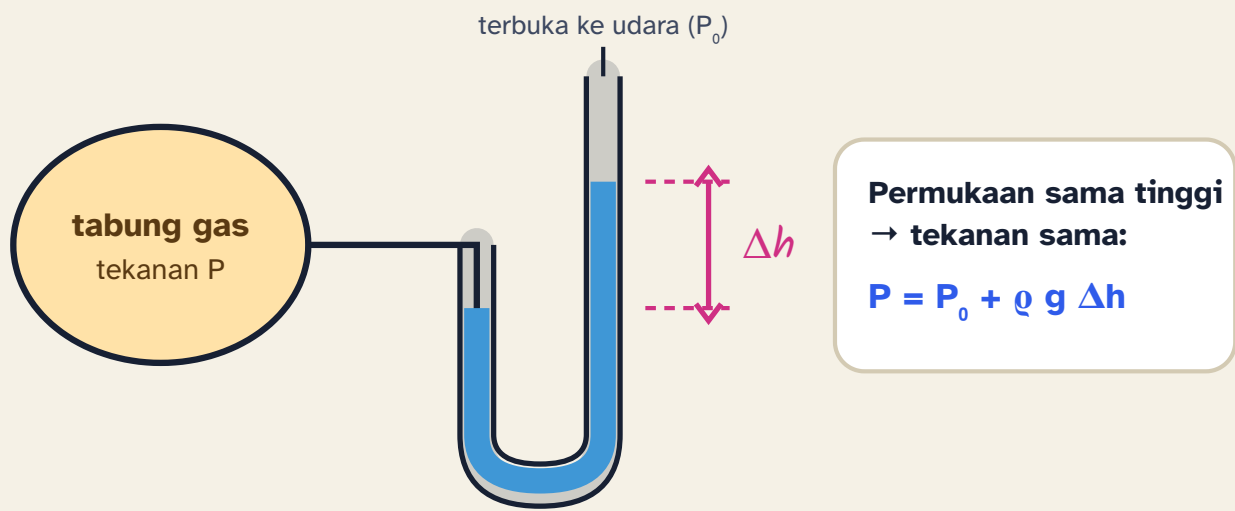


TAMU DARI MASA LALU

Tahun 1643, Evangelista Torricelli mengisi tabung kaca sepanjang $\pm 1 \text{ m}$ dengan raksa, lalu membalikinya ke dalam mangkuk raksa. Raksa turun dan berhenti pada ketinggian $\pm 76 \text{ cm}$, 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 $P_0 = \rho_{\text{raksa}} g h$: $13.600 \times 9,8 \times 0,76 \approx 101.300 \text{ Pa}$. Karena itu tekanan udara sering ditulis **76 cmHg**. Jika barometernya memakai air (13,6 kali lebih ringan), tabungnya harus setinggi $\pm 10,3 \text{ m}$!

Makin tinggi tempatnya, makin sedikit udara di atasnya, sehingga tekanan udara turun: sekitar 1 kPa setiap naik $\pm 100 \text{ m}$ di dekat permukaan laut. Di puncak Gunung Rinjani (3.726 m) tekanannya tinggal $\pm 65 \text{ kPa}$. Air pun mendidih pada suhu lebih rendah, hanya $\pm 88^\circ \text{C}$, 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.



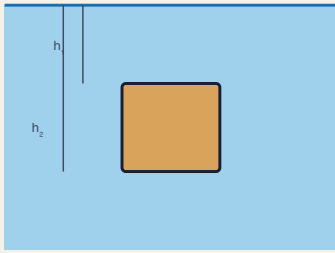
LANJUT • IB & OLIMPIADE

FLUIDA DI DALAM WADAH YANG DIPERCEPAT

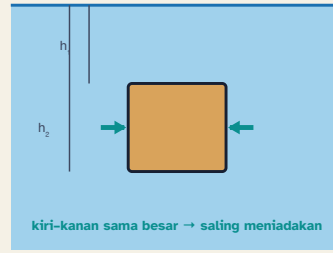
Di dalam lift yang dipercepat ke atas dengan a , air "terasa" lebih berat: $P = \rho(g + a)h$. Saat lift jatuh bebas ($a = -g$), tekanan hidrostatis lenyap, dan gaya apung pun hilang! Jika wadah dipercepat mendatar dengan a (misalnya ember air di bak truk yang mengerem), permukaan air miring dengan $\tan \theta = a/g$, 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

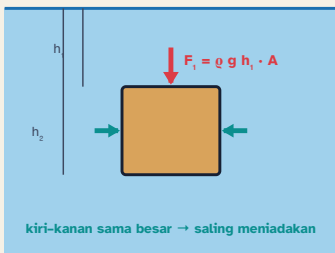
Mengangkat temanmu di kolam renang terasa jauh lebih ringan daripada di darat. Batu yang berat pun terasa ringan di dalam air. Ada gaya ke atas yang membantu: **gaya apung** (gaya Archimedes). Dari mana asalnya?



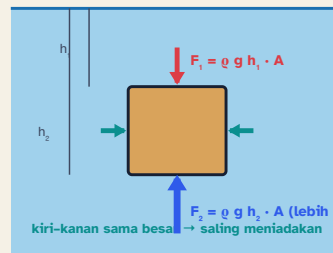
Langkah 1. Sebuah balok (luas alas A) tercelup penuh di air. Sisi atasnya pada kedalaman h_1 , sisi bawahnya pada kedalaman h_2 .



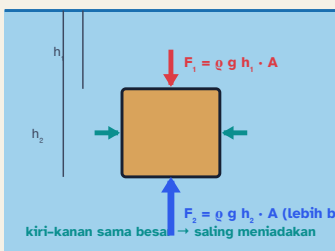
Langkah 2. Air menekan balok dari segala arah. Tekanan di sisi kiri dan kanan sama besar pada kedalaman yang sama, jadi gaya mendatarnya saling meniadakan.



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: $F_2 = \rho g h_2 A$.



$$\begin{aligned} F_A &= F_2 - F_1 \\ &= \rho g (h_2 - h_1) A \\ &= \rho g V \\ &= \text{berat fluida yang dipindahkan benda!} \end{aligned}$$

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:

$$F_A = \rho_f V_{\text{tercelup}} g.$$

$$F_A = \rho_f V g$$

Gaya apung = berat fluida yang 'didesak' benda. Fluida makin rapat atau bagian tercelup makin besar → dorongan makin kuat.

 ρ_f Massa jenis fluida kg/m^3 V

Volume bagian tercelup L

 F_A

Gaya apung N

GAYA APUNG

490

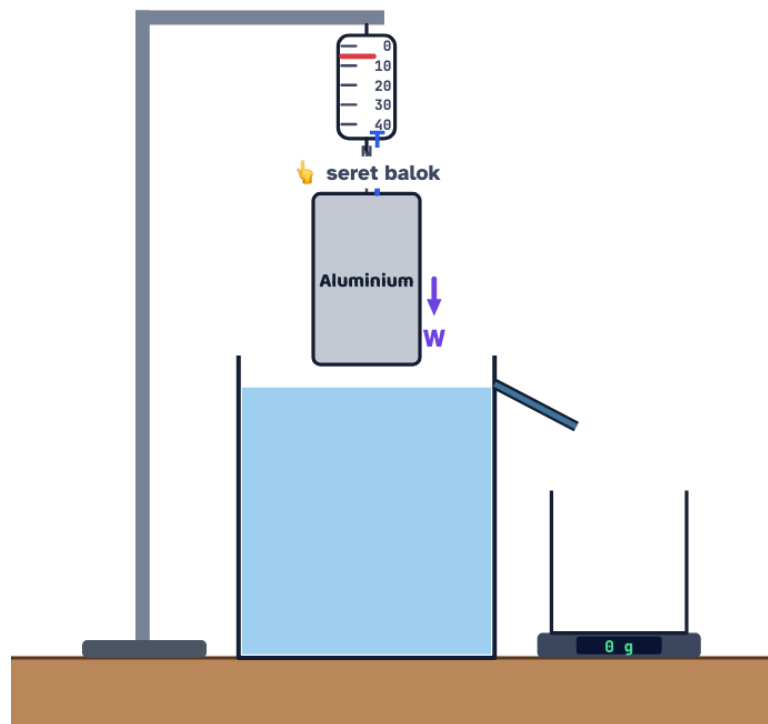
N

Benda yang mendesak **50** liter fluida bermassa jenis **1.000** kg/m^3 didorong ke atas dengan gaya **490** N.

Satuan Nusantara: $\approx 1 \times$ berat orang 50 kg $\cdot \approx 2 \times$ berat karung beras 25 kg $\cdot \approx 5\%$ dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{N}$. Ubah liter ke m^3 : bagi 1000.

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



Neraca pegas

Berat di udara $W = 5,29 \text{ N}$ Angka neraca $T = 5,29 \text{ N}$ Gaya apung $F_A = W - T$
 $= 0 \text{ N}$

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

5,29 N

Angka neraca

5,29 N

Gaya apung

0 N

Fluida tumpah

0 g

Keadaan

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 Syracuse 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.

Sebuah mahkota beratnya 9,65 N di udara dan 9,05 N saat tercelup penuh dalam air ($\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$). Massa jenis emas 19.300 kg/m³. Apakah mahkota itu emas murni?

- 1 Gaya apung = berkurangnya berat: $F_A = 9,65 - 9,05 = 0,60 \text{ N}$.
- 2 $F_A = \rho_{\text{air}} V g$, dan berat $W = \rho_{\text{mahkota}} V g$. Bagi keduanya: $\frac{\rho_{\text{mahkota}}}{\rho_{\text{air}}} = \frac{W}{F_A} = \frac{9,65}{0,60} \approx 16,1$.
- 3 $\rho_{\text{mahkota}} \approx 16.100 \text{ kg/m}^3$.

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/m ³)	Zat	Massa jenis (kg/m ³)
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](https://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."

MITOS

"Gaya apung makin besar jika benda makin dalam."

FAKTA

Yang menentukan adalah **massa jenis**, bukan berat. Kapal tanker ribuan ton mengapung, sedangkan sebutir pasir yang sangat ringan tenggelam.

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 $\pm 1.240 \text{ kg/m}^3$, jauh di atas tubuh manusia (± 985). Kamu hanya tercelup $\pm 80\%$ 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, $\gamma \approx 0,072 \text{ N/m}$.

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 ($\pm 0^\circ$ 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 ($\gamma = 0,072 \text{ N/m}$, sudut kontak 0° , $g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Setinggi apa air naik? Bagaimana jika jari-jarinya 0,05 mm?

1 $h = \frac{2 \times 0,072 \times 1}{1000 \times 9,8 \times 0,0005} = \frac{0,144}{4,9} \approx 0,029 \text{ m} \approx 2,9 \text{ cm}.$

2 Jari-jari 10 kali lebih kecil $\rightarrow h$ 10 kali lebih besar: $\approx 29 \text{ cm}.$

Pipa 0,5 mm: $\pm 2,9 \text{ cm}$; pipa 0,05 mm: $\pm 29 \text{ cm}$. 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 hidrolik: 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 hidrostatik 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.



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 ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$) adalah...

200 Pa

2.000 Pa

20.000 Pa

200.000 Pa

Dongkrak hidrolik 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 ($\rho = 600 \text{ kg/m}^3$) mengapung di air tawar. Bagian kayu yang tercelup adalah...

40%

100%

0%

60%



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 lubangnyanya.
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 hidrostatik** dan tekanan total di kedalaman tertentu
- menerapkan **hukum Pascal** pada dongkrak dan rem hidrolik
- 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 hidrostatik

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 hidrostatik. Tekanan zat cair = massa jenis $\times$ gravitasi $\times$ kedalaman. Di air laut, setiap 10 m menambah ± 1 atmosfer.

$$F_2 = F_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

Dongkrak hidrolik. 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 hidrolik 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 selembur 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.

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** $A_1v_1 = A_2v_2$;
- 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

Minggu pagi, menyiram tanaman

RAKA

Yah, airnya cuma jatuh dekat kakiku. Pot di ujung sana nggak kebagian!

**SARI**

Coba tutup sebagian ujung selangnya pakai jempol, Rak.

RAKA

WAH! Airnya terbang sampai ke pot! Kok jadi kuat?!



SARI

Kerannya sama, jadi air per detiknya juga sama. Tapi lubangnya jadi sempit...

RAKA

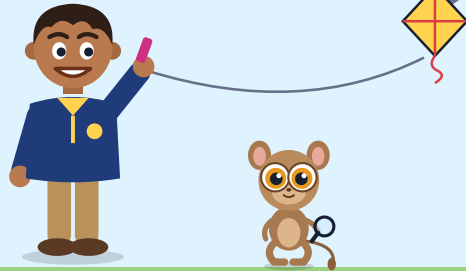
...jadi airnya harus ngebut supaya semuanya bisa lewat?



Sore harinya, di lapangan

KAK NARA

Tepat! Fluida yang mengalir punya aturan main sendiri. Aturan yang sama membuat layangan naik dan pesawat terbang!



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 $\frac{1}{4}$ 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.)

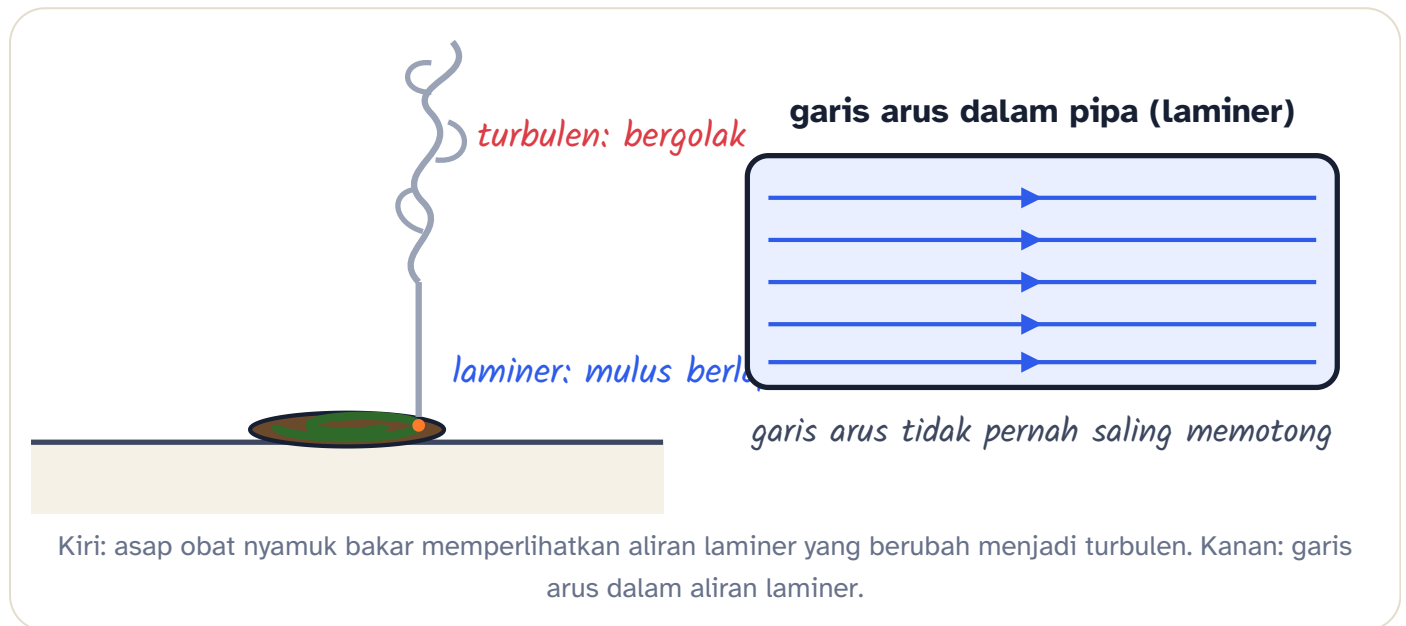
14.1 Fluida ideal dan debit

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.



Debit: berapa banyak yang lewat tiap detik?

Debit Q adalah volume fluida yang melewati suatu penampang tiap satuan waktu: $Q = V/t$. Satuannya m^3/s , atau liter per detik (L/s) untuk aliran kecil. Ingat: $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$.

Bayangkan air melaju dengan kecepatan v dalam pipa berpenampang A . Dalam waktu t , "silinder air" sepanjang vt melewati penampang itu. Volumennya $V = A \cdot vt$. Jadi:

$$Q = \frac{V}{t} = A v$$

$$Q = A v = \frac{\pi d^2}{4} v$$

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 ($10 \div \text{debit}$) detik.

Cek satuan: $\text{m}^2 \times \text{m/s} = \text{m}^3/\text{s}$, lalu $1 \text{ m}^3/\text{s} = 1000 \text{ L/s}$. 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 menit = 600 s.

$$2 \quad Q = \frac{V}{t} = \frac{120 \text{ L}}{600 \text{ s}} = 0,2 \text{ L/s.}$$

3 Karena 1 L = 10⁻³ m³: $Q = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Debit keran 0,2 L/s = $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. 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.

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

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: $\approx 73\%$ dari ojek di jalan kota (± 40 km/jam) · $\approx 5,7 \times$ jalan kaki santai · $\approx 8\%$ 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**.

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: $A_1 = \frac{1}{4}\pi(0,02)^2 = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

2 (a) $Q = A_1 v_1 = 3,14 \times 10^{-4} \times 0,5 = 1,57 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \approx 0,16 \text{ L/s}$.

3 (b) Kontinuitas: $v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 0,5 \times \left(\frac{2}{0,5}\right)^2 = 0,5 \times 16 = 8 \text{ m/s}$.

Debit $\pm 0,16 \text{ L/s}$ 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.



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.

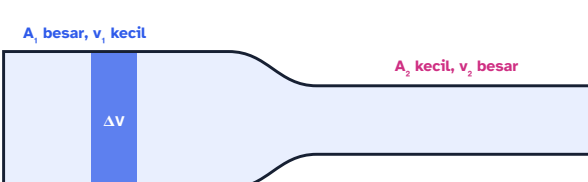
Kesimpulannya mengejutkan: **di tempat aliran lebih cepat, tekanannya lebih kecil**.

Daniel Bernoulli merumuskannya sebagai hukum kekekalan energi untuk fluida. Untuk setiap meter kubik fluida yang mengalir sepanjang garis arus:

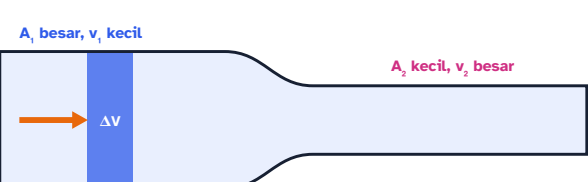
$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{tetap}$$

Suku	Arti fisis	Satuan
P	tekanan: "energi dorong" tiap m^3 fluida	$\text{Pa} = \text{J}/\text{m}^3$
$\frac{1}{2}\rho v^2$	energi kinetik tiap m^3 fluida	J/m^3
ρgh	energi potensial tiap m^3 fluida	J/m^3

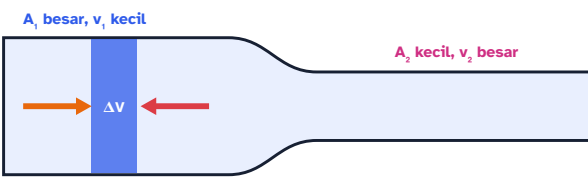
Jumlah ketiganya seperti uang saku yang harus tetap. Jika "uang" energi kinetik bertambah (air ngebut), "uang" tekanan harus berkurang. Jika fluida naik lebih tinggi, tekanan atau kelajuannya juga harus "membayar".



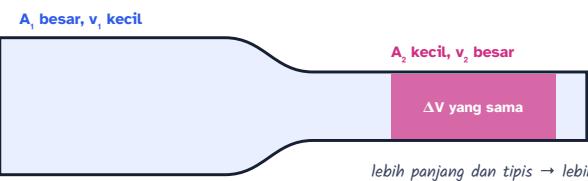
Langkah 1. Pipa mendatar: kiri lebar (A_1), kanan sempit (A_2). Kita ikuti satu "paket" air bervolume ΔV (biru tua).



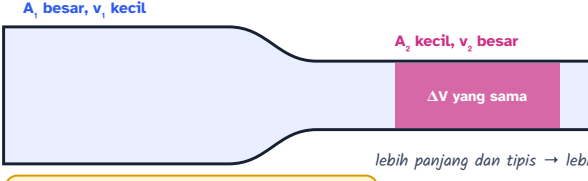
Langkah 2. Air di belakang paket menekan dengan tekanan P_1 . Gaya $P_1 A_1$ mendorong paket sejauh Δx_1 , sehingga usahanya $W_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V$.



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. Volumennya 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 ρgh . Itulah **hukum Bernoulli!**



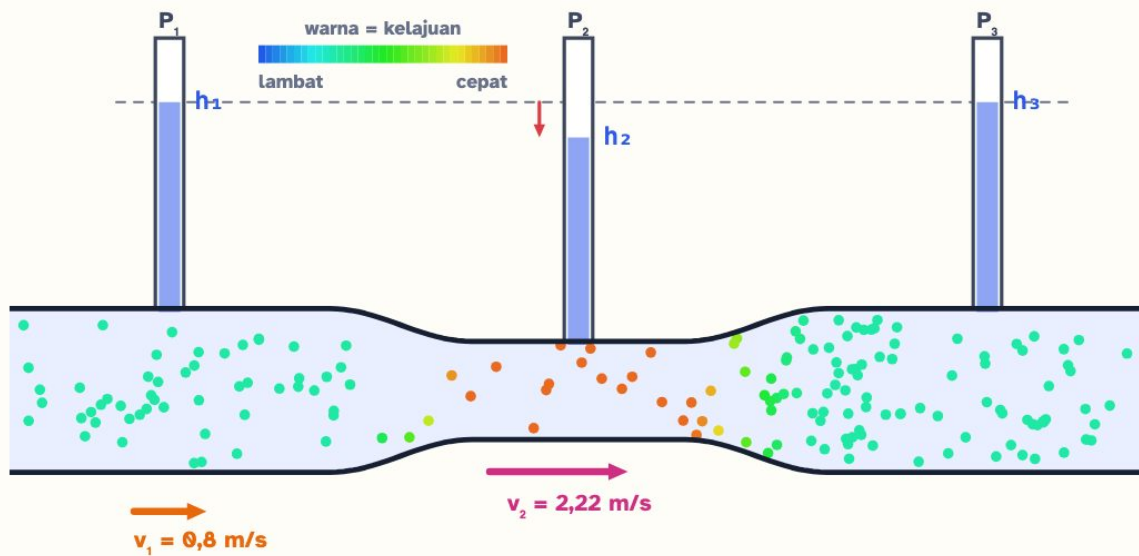
AWAS JEBAKAN: "TERJEPIT = TEKANAN BESAR"

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)

0,8 m/s

v_2 (leher)

2,22 m/s

$P_1 - P_2$

2,15 kPa

Debit (pipa 5 cm)

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."

MITOS

"Bernoulli hanya berlaku untuk air."

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.

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 $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{tetap}$ 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 $\pm 0,3$ 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 $P_{\text{udara}} + \rho gh = P_{\text{udara}} + \frac{1}{2}\rho v^2$, 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**.

$$v = \sqrt{2gh}$$

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: $\approx 36\%$ dari ojek di jalan kota (± 40 km/jam) $\cdot \approx 2,8 \times$ jalan kaki santai $\cdot \approx 4\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\sqrt{\text{m/s}^2 \times \text{m}} = \sqrt{\text{m}^2/\text{s}^2} = \text{m/s}$. 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

$$x = vt = \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{\frac{2y}{g}} = 2\sqrt{hy}$$



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.

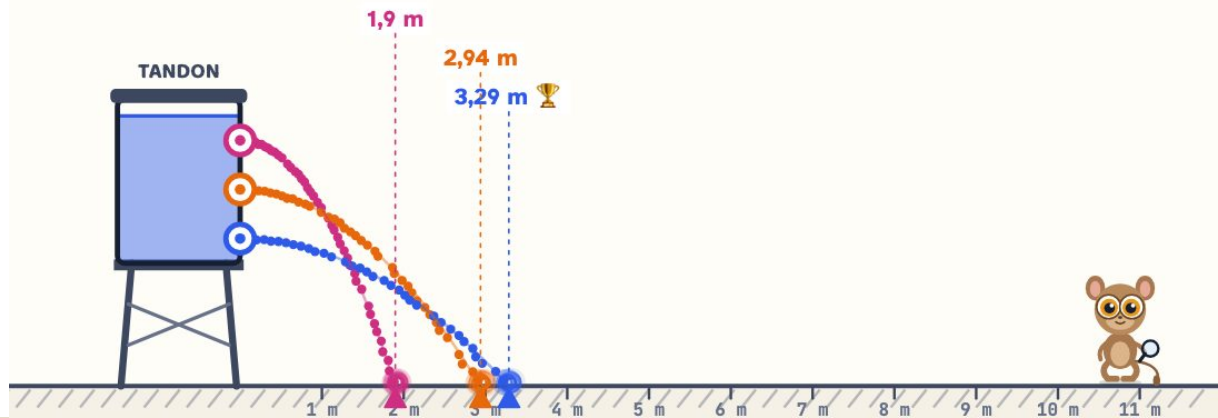
Jawabannya: lubang di tengah. Lubang bawah memang paling deras, tetapi terlalu dekat dengan tanah sehingga airnya cepat mendarat. Lubang atas punya waktu jatuh paling lama, tetapi pancarannya lemah. Jarak $x = 2\sqrt{hy}$ paling besar jika kedalaman h sama dengan tinggi lubang di atas tanah y , yaitu 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

Seret lingkaran lubang ↑

$$v = \sqrt{2gh}$$
$$x = 2\sqrt{h \cdot y}$$



Lubang biru
5,42 m/s • jarak 3,29 m

Lubang oranye
4,2 m/s • jarak 2,94 m

Lubang magenta
2,42 m/s • jarak 1,9 m

Tinggi air
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 $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapa kelajuan air yang memancar?

1 $h = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}.$

2 $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 0,2} = \sqrt{4} = 2 \text{ m/s}.$

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 $g = 10 \text{ m/s}^2$, di mana air mendarat, diukur mendatar dari dinding toren?

- 1 Kelajuan pancaran: $v = \sqrt{2 \times 10 \times 0,8} = \sqrt{16} = 4 \text{ m/s}$, arahnya mendatar.
- 2 Waktu jatuh dari 5 m: $t = \sqrt{2y/g} = \sqrt{2 \times 5/10} = 1 \text{ s}$.
- 3 Jarak mendatar: $x = vt = 4 \times 1 = 4 \text{ m}$. Cek dengan rumus cepat: $x = 2\sqrt{hy} = 2\sqrt{0,8 \times 5} = 2\sqrt{4} = 4 \text{ m}$. ✓

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 (ρgh , 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:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g \Delta h}{(A_1/A_2)^2 - 1}}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g \Delta h}{n^2 - 1}}, \quad n = \frac{A_1}{A_2}$$

Beda tinggi air di dua tabung manometer → kelajuan air di bagian pipa yang lebar.

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. $\sqrt{\text{m/s}^2 \cdot \text{m}} = \text{m/s}$.

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

Pada venturimeter, luas penampang besar **20 cm²** dan luas leher **10 cm²**. Beda tinggi air di kedua tabung manometer **15 cm**. Dengan $g = 10 \text{ m/s}^2$, 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 $v_1 = \sqrt{\frac{2 \times 10 \times 0,15}{3}} = \sqrt{1} = 1 \text{ m/s}$.

3 Kontinuitas: $v_2 = v_1 \times 2 = 2 \text{ m/s}$.

$v_1 = 1 \text{ m/s}$ dan $v_2 = 2 \text{ m/s}$. Cek: $\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) = 500 \times 3 = 1500 \text{ Pa} = \rho g \Delta h = 1000 \times 10 \times 0,15$.
✓

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.



Kompas 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.



dua paket udara berangkat bersamaan

Langkah 1. Dua paket udara berangkat bersamaan dari ujung depan sayap: satu lewat atas, satu lewat bawah.

MITOS: harus bertemu lagi?



dua paket udara berangkat bersamaan

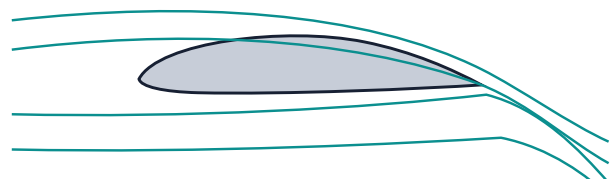
Langkah 2. Mitos populer: keduanya "harus" bertemu lagi di ujung belakang pada saat yang sama. Karena lintasan atas lebih panjang, udara atas "harus" lebih cepat. Kedengarannya masuk akal, tetapi **tidak ada hukum alam** yang memaksa mereka bertemu!

FAKTA: udara atas tiba jauh lebih dulu!



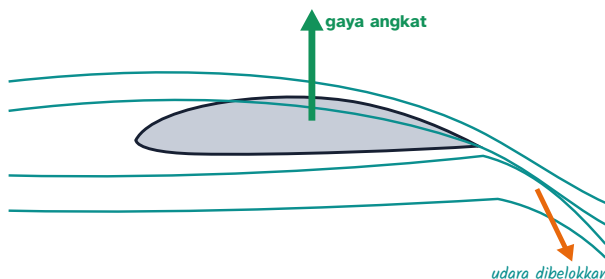
udara bawah masih tertinggal di sini

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.

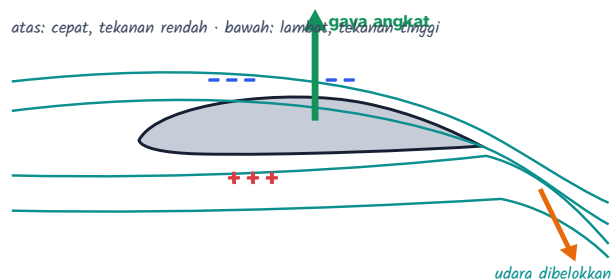


udara dibelokkan

Langkah 4. Yang sebenarnya terjadi: sayap yang melengkung dan sedikit menengadahkan (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**.

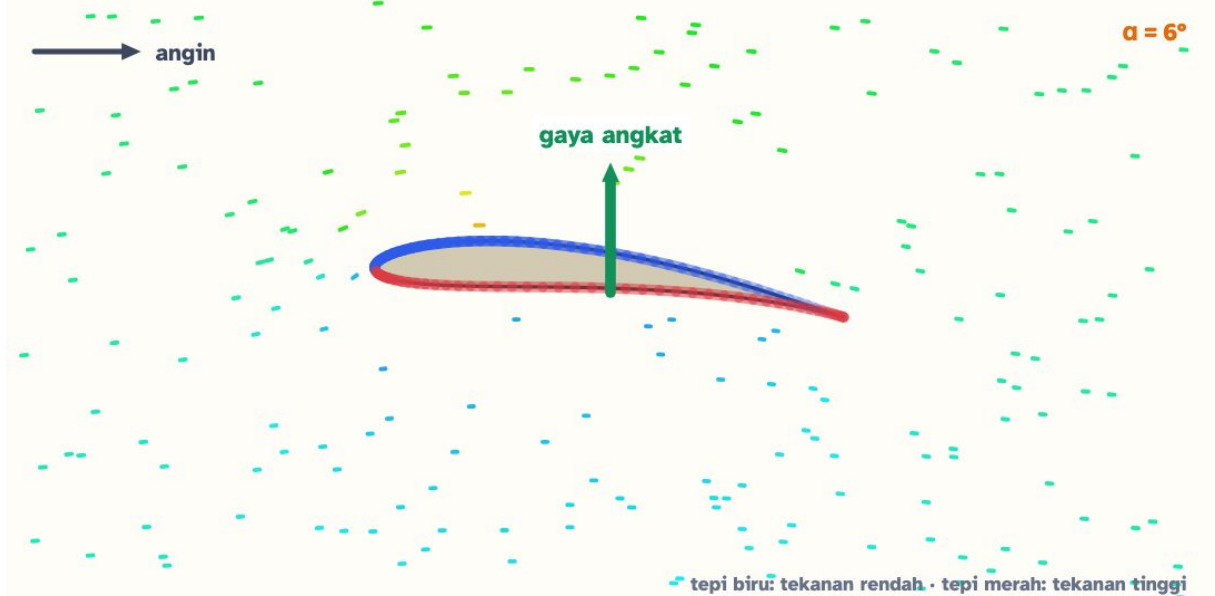
Besar gaya angkat bergantung pada massa jenis udara ρ , kelajuan v , luas sayap S , dan koefisien angkat C_L yang ditentukan bentuk sayap dan sudut serangnya:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

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 $\pm 15^\circ$), 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
1,33

Gaya angkat per m² sayap
1.382 N

Setara beban per m²
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."

MITOS

"Pesawat tidak mungkin terbang terbalik, karena lengkungan sayapnya jadi di bawah."

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.

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 ($\pm 20^\circ\text{C}$)	η (Pa·s)
Udara	$1,8 \times 10^{-5}$
Air	$1,0 \times 10^{-3}$
Minyak goreng	$\pm 0,05\text{--}0,08$
Oli mesin	$\pm 0,1\text{--}0,3$

Gliserin	$\pm 1,4$
Madu	$\pm 2-10$

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**:

$$mg = \rho_f V g + 6\pi \eta r v_t \Rightarrow v_t = \frac{2r^2(\rho_b - \rho_f)g}{9\eta}$$

$$v_t = \frac{2 r^2 (\rho_b - \rho_f) g}{9 \eta}$$

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

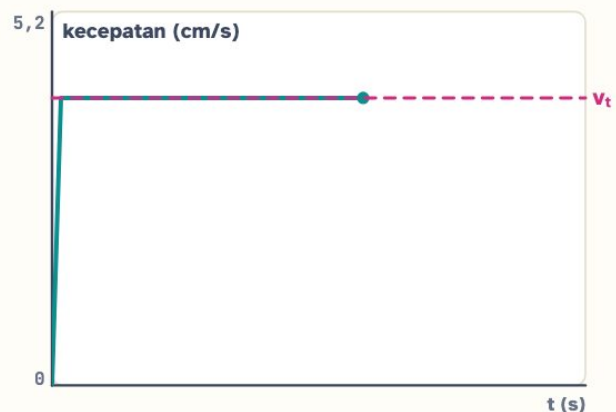
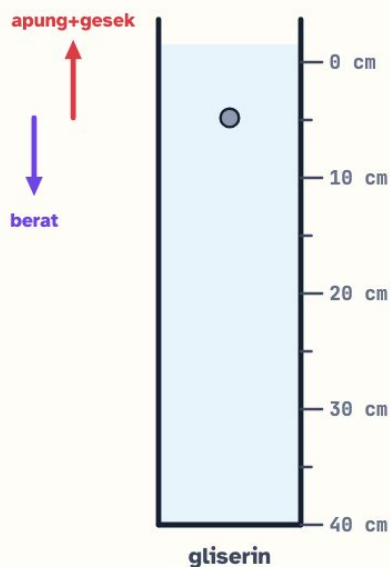
2,14
cm/s

Bola berjari-jari **1,5** mm ($\rho = 7.800$ kg/m³) di fluida $\rho = 1.260$ kg/m³ dengan $\eta = 1,5$ Pa·s jatuh tetap **2,14** cm/s.

Cek satuan: $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{m}/\text{s}^2}{\text{Pa} \cdot \text{s}} = \frac{\text{kg}/\text{s}^2}{\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})} = \text{m}/\text{s}$. Hanya berlaku untuk aliran pelan (bilangan Reynolds kecil).

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


$\text{berat} - \text{apung} = \text{gesek Stokes} + \text{hambatan } v^2$
 hambatan Stokes $6\pi\eta rv$ dominan
 $v_t = 4,03 \text{ cm/s}$

Kecepatan
4,03 cm/s

Kecepatan terminal (teori)
4,03 cm/s

Jarak jatuh
4,8 cm dari 40 cm

Waktu mencapai 95% v_t
16,7 ms (sekejap!)

Keadaan
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 $\eta_{\text{udara}} = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, dan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, hitung kecepatan terminal butiran itu (massa jenis udara diabaikan). Berapa lama ia turun 1 km di udara tenang?

1 $r = 10 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$, sehingga $r^2 = 10^{-10} \text{ m}^2$.

2
$$v_t = \frac{2 \times 10^{-10} \times 1000 \times 9,8}{9 \times 1,8 \times 10^{-5}} = \frac{1,96 \times 10^{-6}}{1,62 \times 10^{-4}} \approx 0,012 \text{ m/s, yaitu sekitar } 1,2 \text{ cm/s.}$$

3 Waktu turun 1 km: $t = 1000/0,012 \approx 8 \times 10^4 \text{ s}$, hampir sehari penuh!

Butiran awan hanya jatuh $\pm 1,2 \text{ cm/s}$. 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.

**BILANGAN REYNOLDS DAN PEMBULUH DARAH**

Kapan aliran laminar, kapan turbulen? Lihat **bilangan Reynolds** $Re = \rho v d / \eta$. Di dalam pipa, aliran biasanya laminar 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 $\pm 6-7$ m/s, bukan ± 120 m/s seperti ramalan rumus Stokes.

Untuk aliran laminar di pipa, debit mengikuti hukum Poiseuille: $Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta L}$. Perhatikan pangkat 4!

Pembuluh darah yang menyempit 10% jari-jarinya kehilangan $\pm 34\%$ alirannya. Itulah sebabnya penyempitan pembuluh darah sangat berbahaya bagi jantung.

MITOS

"Tetes hujan dari awan setinggi 2 km jatuh makin cepat dan bisa secepat 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** $A_1v_1 = A_2v_2$
- 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.

$$v = \sqrt{2gh}$$

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.

$$v_t = \frac{2r^2(\rho_b - \rho_f)g}{9\eta}$$

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

Siang terik di warung

RAKA

Sar, gelas es tehku bocor! Lihat, luarnya basah semua!

WARUNG

SARI

Kalau bocor, harusnya airnya manis. Usap lalu cicipi deh.

RAKA

Hmm... tawar! Jadi air ini datang dari mana?

tetes tawar?!

Di rumah, tanpa alas kaki

RAKA

Hii! Ubinnya dingin, tapi karpetnya hangat!

SARI

Aneh. Termometerku bilang keduanya 27 °C.

BRRR!

27°C

KAK NARA

Dua misteri, satu kunci: kalor selalu mengalir dari yang panas ke yang dingin. Yuk, kita lacak jejaknya!



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.

$$\frac{C}{100} = \frac{R}{80} = \frac{F - 32}{180} = \frac{K - 273}{100}$$

$$X = X_b + \frac{t_C}{100} (X_d - X_b)$$

Cari dulu 'berapa persen perjalanan' dari titik beku ke titik didih, lalu terapkan pada skala lain.

t_C Suhu dalam Celsius $^{\circ}\text{C}$

X_b Titik beku pada skala X $^{\circ}\text{X}$

X_d Titik didih pada skala X $^{\circ}\text{X}$

X Suhu pada skala X $^{\circ}\text{X}$

SUHU PADA SKALA X

86

$^{\circ}\text{X}$

ini skala Fahrenheit

30 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$** . Nyatakan dalam $^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{R}$, dan K.

1 Fahrenheit: $F = \frac{9}{5}C + 32 = 54 + 32 = 86^{\circ}\text{F}$.

2 Reamur: $R = \frac{4}{5}C = 24^{\circ}\text{R}$.

3 Kelvin: $K = C + 273 = 303\text{ K}$.

30 $^{\circ}\text{C}$ = 86 $^{\circ}\text{F}$ = 24 $^{\circ}\text{R}$ = 303 K. Kenaikan 1 $^{\circ}\text{C}$ sama dengan kenaikan 1 K, tetapi sama dengan kenaikan 1,8 $^{\circ}\text{F}$.



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 $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.



FISIKA INDONESIA: EMBUN UPAS DI DIENG

Indonesia terletak di khatulistiwa, tetapi tidak selalu hangat. Di Dataran Tinggi Dieng ($\pm 2.000\text{ m}$), pada malam-malam musim kemarau sekitar Juli–Agustus, suhu bisa turun mendekati atau di bawah $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ menjadi $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ **bukan** berarti "dua kali lebih panas". Skala Celsius tidak dimulai dari nol mutlak. Dalam kelvin, suhunya naik dari 293 K menjadi 313 K , hanya $\pm 7\%$ 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 $/^{\circ}\text{C}$ atau $/\text{K}$. 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 ($\times 10^{-6}$ / $^{\circ}\text{C}$)	Catatan
Aluminium	± 24	panci, kusen jendela
Tembaga	± 17	kabel listrik
Baja	± 12	rel kereta, jembatan
Beton	$\pm 10\text{--}14$	hampir sama dengan baja, jadi beton bertulang tidak retak saat panas
Kaca biasa	± 9	gelas mudah retak bila dituangi air mendidih

RUMUS HIDUP

Pemuaian panjang

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Pertambahan panjang = koefisien muai $\times$ panjang awal $\times$ kenaikan suhu. Kecil, tetapi bisa membengkokkan rel!

α Koefisien muai panjang ($\times 10^{-6}$) / $^{\circ}\text{C}$

L_0 Panjang awal m

ΔT Kenaikan suhu $^{\circ}\text{C}$

ΔL Pertambahan panjang mm

PERTAMBAHAN PANJANG

9

mm

Batang 25 m ($\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) yang suhunya naik 30°C bertambah panjang 9 mm.

Cek satuan: $/^{\circ}\text{C} \times \text{m} \times ^{\circ}\text{C} = \text{m}$, lalu dikali 1000 menjadi mm.

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

KERJAKAN BERSAMA

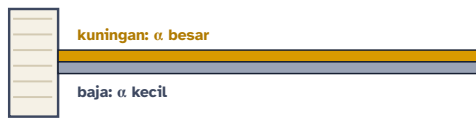
Celah sambungan rel

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? ($\alpha_{\text{baja}} = 12 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$)

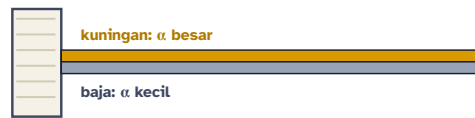
1 Kenaikan suhu: $\Delta T = 55 - 25 = 30^{\circ}\text{C}$.

2 $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times 12 \times 30 = 4,32 \times 10^{-3} \text{ m}$.

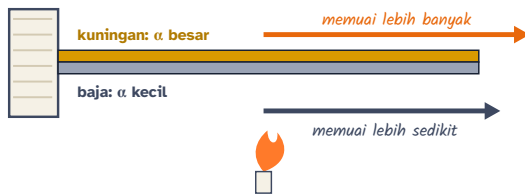
Celah minimal $\pm 4,3 \text{ mm}$. Bunyi "tek-tek, tek-tek" kereta lama berasal dari roda yang melewati celah-celah ini.



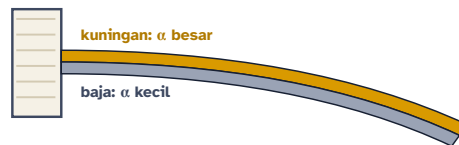
Langkah 1. Keping bimetal: dua logam berbeda (kuningan dan baja) dikeling menjadi satu keping lurus pada suhu kamar.



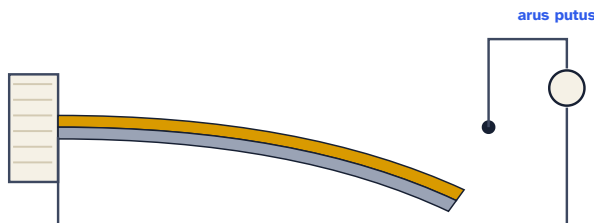
Langkah 2. Keping dipanaskan. Kedua logam memuai, tetapi koefisien muai kuningan ($\pm 19 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) lebih besar daripada baja ($\pm 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).



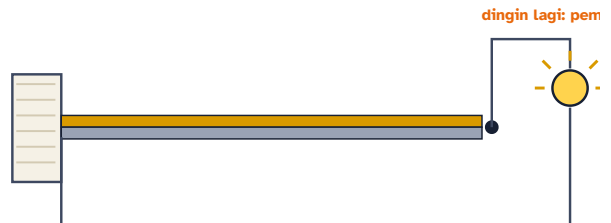
Langkah 3. Kuningan "ingin" bertambah panjang lebih banyak, tetapi tertahan oleh baja yang menempel padanya.



Langkah 4. Akibatnya keping **melengkung**, dengan logam yang lebih banyak memuai (kuningan) berada di sisi luar lengkung.



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 $\pm 9\%$. 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 :

$$Q = mc\Delta T$$

Zat	c (J/kg $\cdot^\circ\text{C}$)
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 ($\text{J}/^\circ\text{C}$), yaitu kalor untuk menaikkan suhu seluruh benda sebesar 1°C .

RUMUS HIDUP Kalor untuk menaikkan suhu

$$Q = mc\Delta T$$

Kalor = massa $\times$ kalor jenis $\times$ kenaikan suhu. Air yang banyak dan 'rakus kalor' butuh energi besar.

m Massa kg

c Kalor jenis $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$

ΔT Kenaikan suhu $^\circ\text{C}$

Q Kalor yang diserap J

KALOR YANG DISERAP

472.500

J

Memanaskan **1,5 kg** zat ($c = 4.200 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{C}$) sebesar **75°C** membutuhkan **472.500 J**.

Satuan Nusantara: $\approx 19\%$ dari sepiring nasi goreng ($\pm 600 \text{ kkal}$) $\cdot \approx 13\%$ dari 1 kWh token listrik $\cdot \approx 113 \times 1 \text{ kkal}$ (kalori makanan)

Cek satuan: $\text{kg} \times \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C} = \text{J}$. Satu kalori (kal) = $4,2 \text{ J}$, 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? ($c_{\text{air}} = 4200 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

1 $\Delta T = 100 - 25 = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

2 $Q = mc\Delta T = 1,5 \times 4200 \times 75 = 472\,500 \text{ J}$.

3 Daya 1000 W berarti 1000 J tiap detik: $t = 472\,500/1000 = 472,5 \text{ s} \approx 7,9 \text{ menit}$.

Butuh $\pm 473 \text{ kJ}$, atau $\pm 8 \text{ menit}$. Dalam praktik lebih lama, karena sebagian kalor hilang ke udara dan ke badan teko.

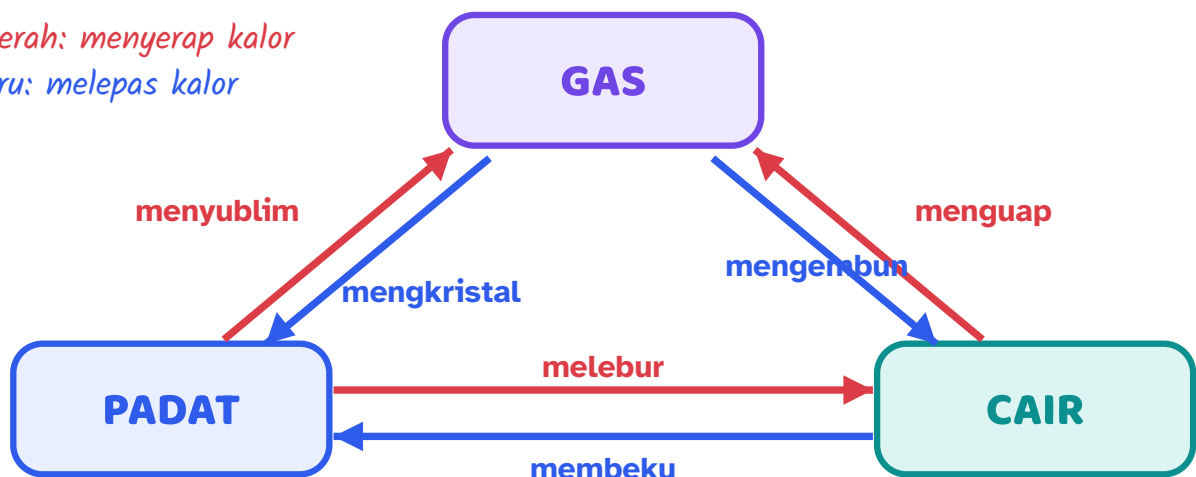


TAMU DARI MASA LALU

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: $\pm 4,2 \text{ joule}$ untuk setiap kalori. Kalor ternyata adalah energi!

15.4 Perubahan wujud dan kalor laten

merah: menyerap kalor
biru: melepas kalor



Enam perubahan wujud. Menuju wujud yang partikelnya lebih "bebas" selalu memerlukan kalor.

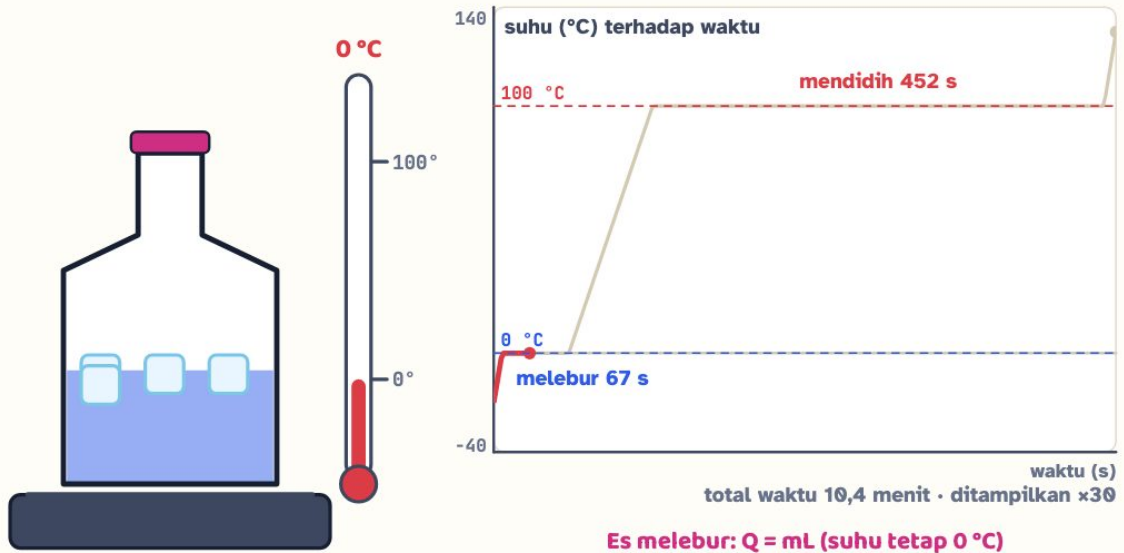
Saat es mencair atau air mendidih, kalor terus diserap tetapi **suhunya tidak naik**. Energi itu dipakai untuk memutus ikatan antarpartikel, bukan untuk mempercepat gerak partikel. Kalor "tersembunyi" ini disebut **kalor laten**:

$$Q = m L$$

- Kalor lebur es: $L_f = 334\,000\text{ J/kg}$ (sering dibulatkan $336\text{ kJ/kg} = 80\text{ kal/g}$).
- Kalor uap air: $L_u = 2\,260\,000\text{ J/kg}$ ($\pm 540\text{ kal/g}$), 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
0 °C

Keadaan

Es melebur: $Q = mL$ (suhu tetap 0 °C)

Kalor diserap
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!

**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.

$$T_c = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2}$$

Untuk zat sejenis, suhu campuran adalah rata-rata suhu yang 'ditimbang' dengan massa.



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.

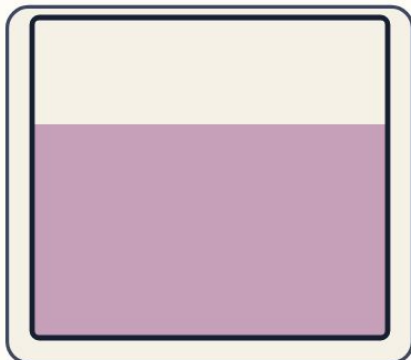
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-KALOR-BLACK](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-kalor-black)

LAB MINI
Lab asas Black: campurkan, lalu amati kalornya

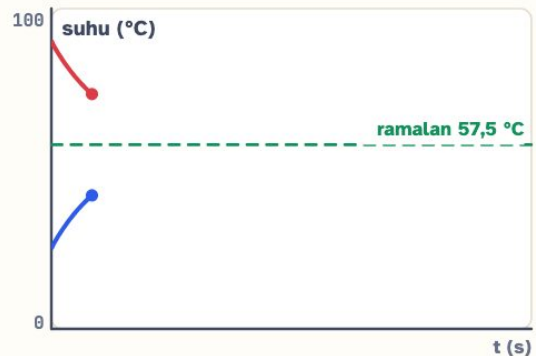
 LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-15

panas: 73,3 °C

dingin: 41,7 °C

 $C = mc: 840 \text{ J/}^\circ\text{C vs } 840 \text{ J/}^\circ\text{C}$


kalorimeter (berdinding ganda)



Kalor dilepas benda panas

14,02 kJ

Kalor diterima benda dingin

14,02 kJ

 $Q \text{ dilepas} = Q \text{ diterima} \checkmark$

Suhu benda panas

73,3 °C

Suhu benda dingin

41,7 °C

Ramalan asas Black

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: $60 mc = 260 c \Rightarrow m = 260/60 \approx 4,3 \text{ kg}$.

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 ($c = 1 \text{ kal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, $L_f = 80 \text{ kal/g}$) dan gelas tidak menyerap kalor. Apakah semua es mencair? Berapa suhu akhirnya?

- 1 Kalor untuk mencairkan semua es: $50 \times 80 = 4000 \text{ kal}$.
- 2 Kalor maksimum yang bisa dilepas teh jika didinginkan sampai 0 °C: $200 \times 1 \times 30 = 6000 \text{ kal}$. Karena $6000 > 4000$, semua es mencair.
- 3 Asas Black dengan suhu akhir T : $200(30 - T) = 4000 + 50(T - 0)$.
- 4 $6000 - 200T = 4000 + 50T \Rightarrow 250T = 2000 \Rightarrow T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$.

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	$\pm 0,6$	penghantar buruk
Kayu	$\pm 0,1-0,2$	isolator
Karpet berbulu, wol	$\pm 0,04$	
Udara diam	$\pm 0,026$	

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? ($k = 400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $L_f = 334 \text{ J/g}$)

$$1 \quad H = \frac{kA\Delta T}{L} = \frac{400 \times 2 \times 10^{-4} \times 100}{0,5} = 16 \text{ W.}$$

$$2 \quad \text{Kalor dalam satu menit: } Q = 16 \times 60 = 960 \text{ J.}$$

$$3 \quad \text{Es yang mencair: } m = Q/L_f = 960/334 \approx 2,9 \text{ g.}$$

Kalor mengalir 16 W, dan $\pm 2,9$ g es mencair tiap menit. Batang besi yang sama hanya menghantarkan $\pm 3,2$ W, lima kali lebih lambat.

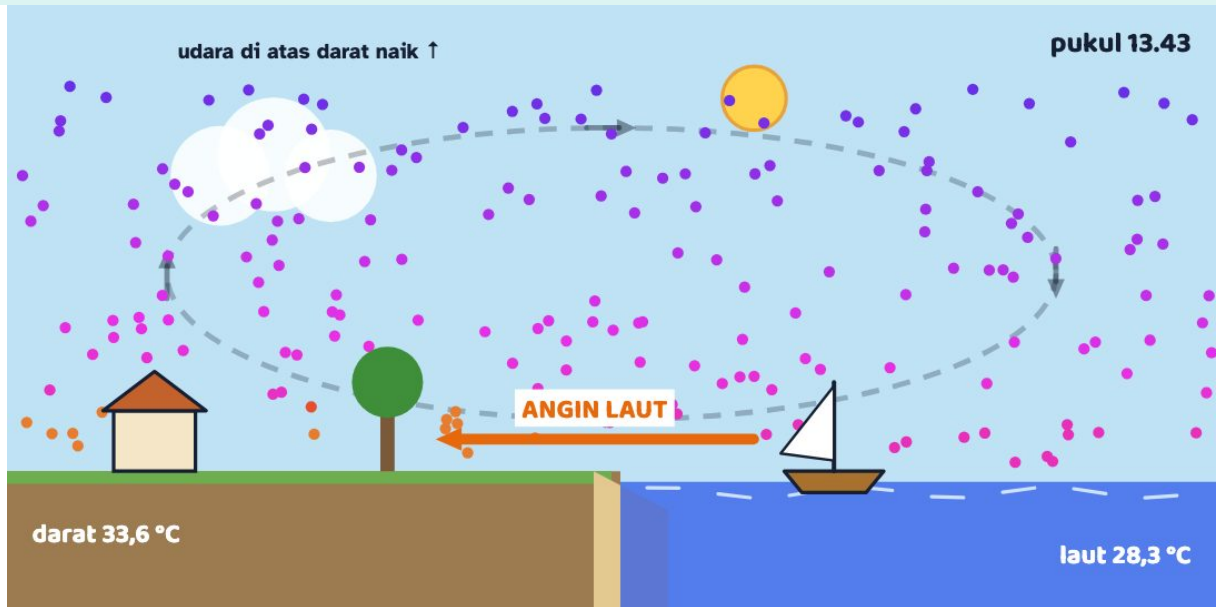
Konveksi: kalor yang menumpang

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.



tiga "pencuri" kalor:
konduksi, konveksi,
radiasi

Langkah 1. Teh panas di dalam termos bisa tetap hangat berjam-jam. Padahal kalor punya tiga jalan untuk kabur: konduksi, konveksi, dan radiasi.



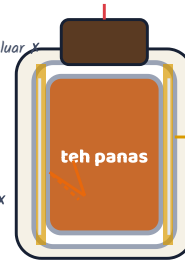
ruang hampa
konduksi & konveksi X

Langkah 2. Botol bagian dalam berdinding ganda, dan ruang di antaranya **hampa udara**. Tanpa partikel, konduksi dan konveksi melintasi celah itu hampir mustahil.



dinding berlapis perak
radiasi dipantulkan balik X

Langkah 3. Kedua dinding dilapisi **perak mengkilap** yang memantulkan radiasi inframerah kembali ke dalam.



tutup rapat
udara panas tidak bisa keluar X

dinding berlapis perak
radiasi dipantulkan balik X

Langkah 4. **Tutup** yang rapat mencegah udara panas dan uap keluar lewat konveksi dan penguapan.



tutup rapat
udara panas tidak bisa keluar X

dinding berlapis perak
radiasi dipantulkan balik X

panas tetap panas,
dingin tetap dingin

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."

MITOS

"Tutup jendelanya, nanti dinginnya masuk!"

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!

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: $\frac{dT}{dt} = -k(T - T_{\text{ling}})$. 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,

$$\lambda_{\text{maks}} T = b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$$

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{b}{T}$$

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.

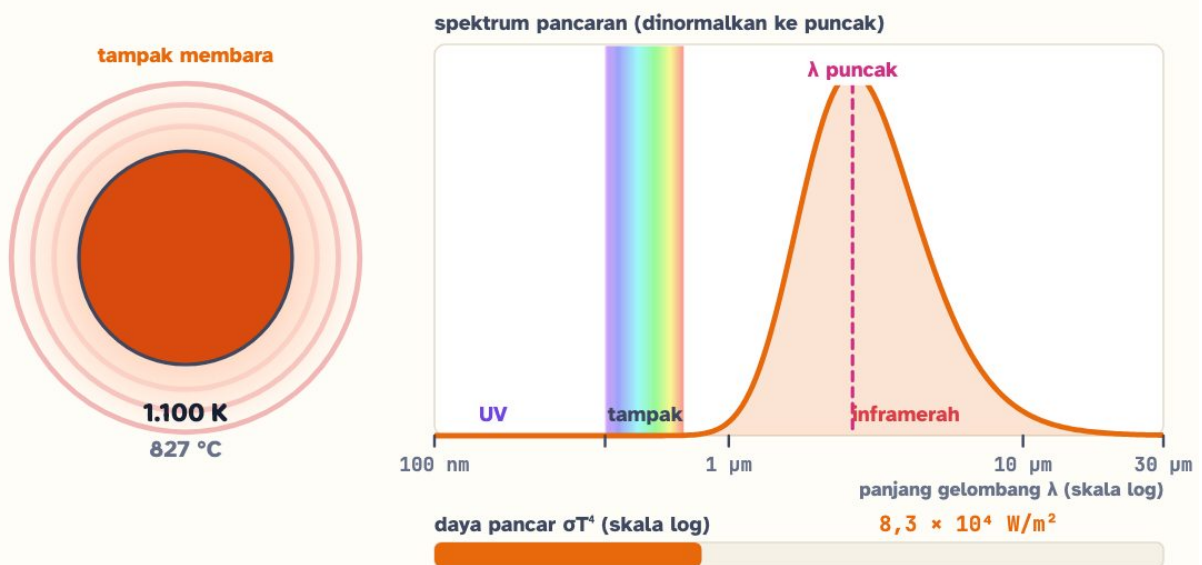
Cek satuan: $b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K} = 2,898 \times 10^6 \text{ nm K}$, jadi $\text{nm K/K} = \text{nm}$.

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,

$$P = e \sigma A T^4, \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

dengan e emisivitas (1 untuk benda hitam sempurna, lebih kecil untuk permukaan mengilap). Suhu mutlak dinaikkan dua kali, dayanya menjadi $2^4 = 16$ kali!

 λ puncak (Wien) $2,63\text{ }\mu\text{m}$

Daerah spektrum puncak

inframerah

Daya pancar per m^2 (σT^4) $8,3 \times 10^4\text{ W/m}^2$

Dibanding tubuhmu

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 $\lambda = 500\text{ nm}$. (a) Perkirakan suhu permukaan Matahari. (b) Tubuh manusia bersuhu $\pm 310\text{ K}$. Di panjang gelombang berapa tubuh paling kuat memancar?

$$1 \quad (a) T = \frac{b}{\lambda_{\text{maks}}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{500 \times 10^{-9}} \approx 5800\text{ K.}$$

$$2 \quad (b) \lambda_{\text{maks}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{310} \approx 9,3 \times 10^{-6}\text{ m} = 9,3\text{ }\mu\text{m}, \text{ yaitu inframerah.}$$

Matahari $\pm 5800\text{ K}$, sedangkan tubuh kita "bersinar" dalam inframerah $\pm 9\text{ }\mu\text{m}$. 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 ($\pm 10\text{ }\mu\text{m}$). 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 $S = 1361 \text{ W/m}^2$ dari Matahari dan memantulkan $\pm 30\%$ (albedo). Daya yang diserap

$$S(1 - a)\pi R^2 \text{ harus sama dengan daya yang dipancarkan } 4\pi R^2 \sigma T^4. \text{ Jadi } T = \left[\frac{S(1 - a)}{4\sigma} \right]^{1/4} = \left[\frac{1361 \times 0,7}{4 \times 5,67 \times 10^{-8}} \right]^{1/4} \approx 255 \text{ K} \approx -18^\circ \text{C}. \text{ Kenyataannya, suhu rata-rata permukaan Bumi } \pm 15^\circ \text{C}.$$

Selisih $\pm 33^\circ \text{C}$ 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 $\pm 100^\circ \text{C}$. 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 ($c = 4200 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$). 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 Kalar 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 $\times$ panjang awal $\times$ kenaikan suhu. Kecil, tetapi bisa membengkokkan rel!

$$Q = mc\Delta T$$

Kalor untuk menaikkan suhu. Kalor = massa $\times$ kalor jenis $\times$ 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.

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.

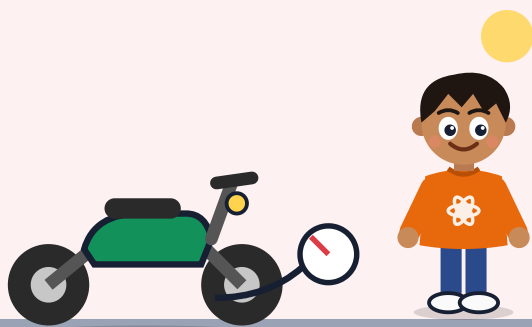
MISTERI BAN DAN BALON

KOMIK • 4 PANEL

Pagi, sebelum berangkat mudik

RAKA

Tekanan ban pas 29 psi. Siap berangkat ke rumah Nenek!



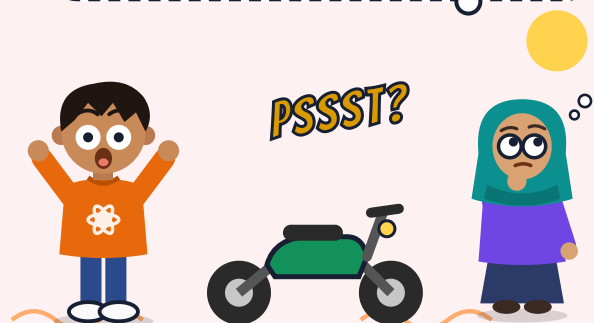
Siang terik, istirahat di jalan

RAKA

Lho, sekarang 33 psi! Siapa yang menambah anginnya?!

SARI

Tidak ada yang menambah... tapi aspal dan bannya panas sekali.



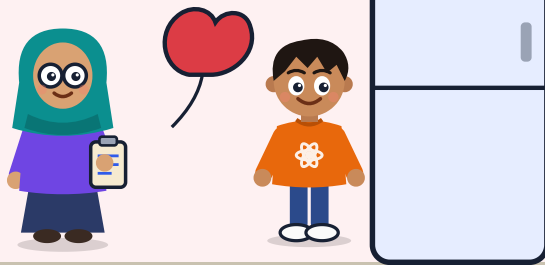
Di rumah Nenek

SARI

Eksperimenku: balon ini kusimpan di kulkas sejam. Lihat, jadi keriput!

RAKA

Udaranya bocor, ya?



KAK NARA

Tidak bocor! Udara itu triliunan-triliunan molekul yang berlari ke segala arah. Makin panas, makin kencang larinya, makin keras menabrak dinding!



Tebak Dulu!

Balon yang disimpan di kulkas mengerut, lalu kembali mengembang 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 mengembang 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 **lenteng 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 $\rightarrow$ molekul lebih rapat $\rightarrow$ tumbukan pada dinding dua kali lebih sering	pompa ban, suntikan yang ditutup

Charles (±1787)	P dan jumlah gas	$V/T =$ 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	$P/T =$ 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.

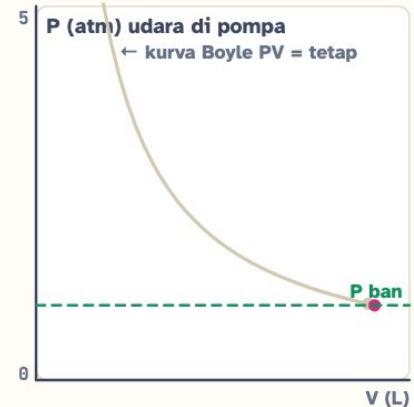
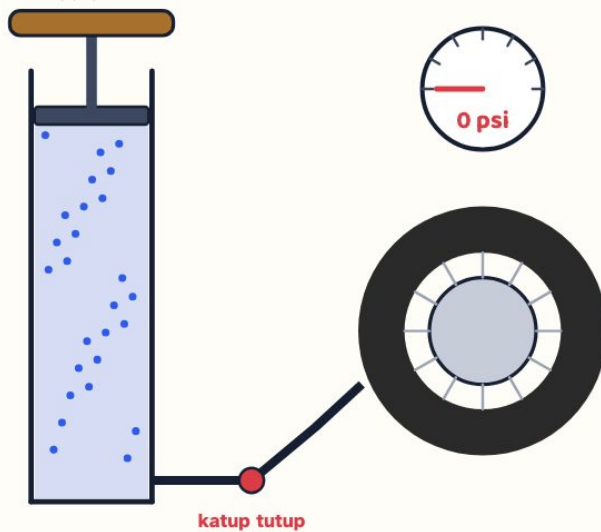
Sekitar 109 kPa.

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



$P \times V = 1 \text{ atm} \times 0,408 \text{ L} = 0,408 \text{ atm}\cdot\text{L}$
udara luar masuk saat gagang ditarik

Tekanan udara pompa
101 kPa

Tekanan ban (alat ukur)
0 psi

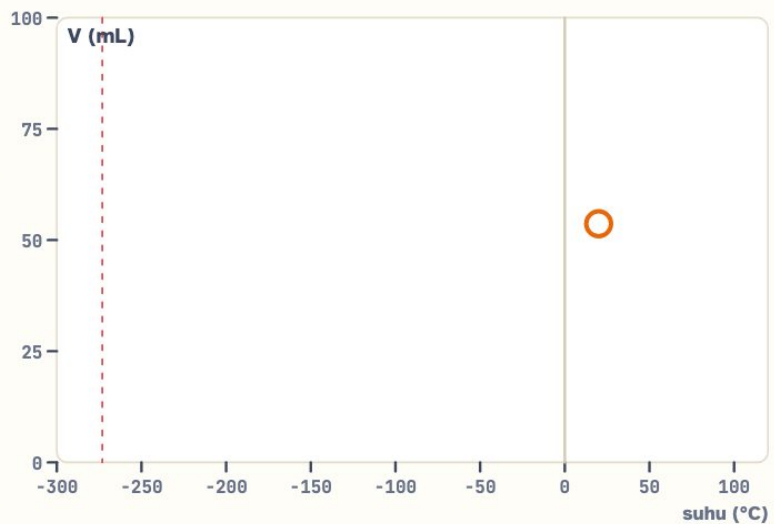
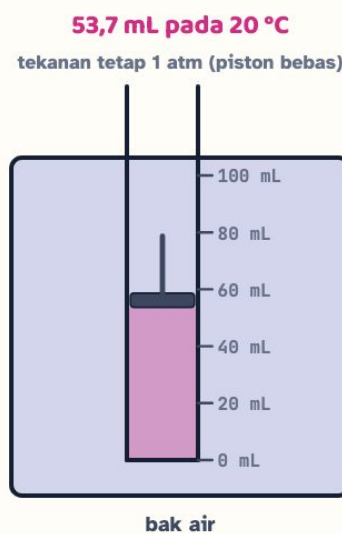
Jumlah pompaan
0

Katup
tertutup

Seret gagang pompa ke bawah, atau tekan tombol pompa. Grafik P-V menunjukkan udara di dalam tabung pompa: mula-mula mengikuti kurva Boyle $PV = \text{tetap}$, 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.)



Suhu

20 °C

Suhu mutlak

293 K

Volume gas

53,7 mL

Titik potong garis

—

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 (± 2000 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 $\pm 20\%$. 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:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Percobaan menunjukkan bahwa konstanta PV/T sebanding dengan jumlah mol gas, apa pun jenis gasnya. Hasilnya adalah **persamaan gas ideal**:

$$PV = nRT = NkT$$

dengan $R = 8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ (tetapan gas umum) dan $k = R/N_A = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (tetapan Boltzmann). Pada 0°C dan 1 atm, satu mol gas apa pun menempati $\pm 22,4$ liter. Pada 25°C , $\pm 24,5$ liter.

RUMUS HIDUP Persamaan gas ideal

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Lebih banyak gas atau lebih panas $\rightarrow$ tekanan naik. Ruang lebih lega $\rightarrow$ 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 $\pm 101 \text{ kPa}$.)

Cek satuan: $\frac{\text{mol} \cdot \text{J}/(\text{mol K}) \cdot \text{K}}{\text{L}} = \frac{\text{J}}{10^{-3} \text{ m}^3} = 10^3 \text{ Pa} = \text{kPa}$. Praktis: liter di penyebut langsung memberi kPa.

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



AWAS JEBAKAN: TEKINAN ALAT UKUR $\neq$ TEKINAN 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 ($\pm 14,7 \text{ psi}$). Rumus gas hanya berlaku untuk **tekanan mutlak** = tekanan terukur + tekanan udara luar.

$$P_2 + 14,7 = (P_1 + 14,7) \frac{t_2 + 273}{t_1 + 273}$$

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 $\approx$ 14,7 psi $\approx$ 101 kPa.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-KINETIK-BAN](https://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 $\rightarrow$ hukum Boyle: $P_1 V_1 = P_2 V_2$.

2 $P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{1 \times 60}{20} = 3 \text{ atm.}$

Tekanannya 3 atm. Volume menjadi sepertiga, tekanan menjadi tiga kali. Jarimu akan merasakan dorongan yang makin kuat.

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: $P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 43,7 \times \frac{330}{300} = 48,1$ 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.



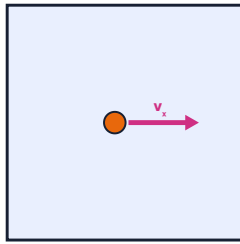
FISIKA INDONESIA: BALON UDARA TRADISIONAL WONOSOBO

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

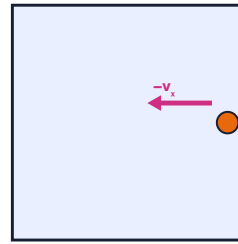
Tekanan: hujan tumbukan molekul

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!



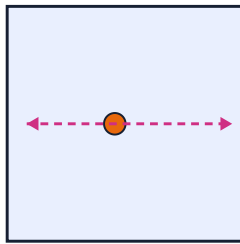
sisi kubus L

Langkah 1. Satu molekul bermassa m di dalam kubus bersisi L . Komponen kecepatannya ke arah dinding kanan adalah v_x .



sisi kubus L

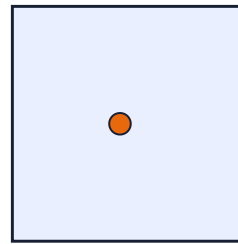
Langkah 2. Molekul memantul lenting dari dinding: v_x menjadi $-v_x$. Momentumnya berubah $-2mv_x$, jadi dinding menerima dorongan (impuls) $2mv_x$.



sisi kubus L

bolak-balik $2L$ tiap $\Delta t = 2L/v_x$

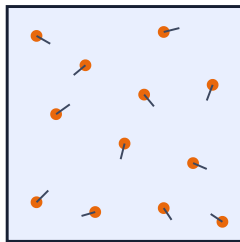
Langkah 3. Molekul bolak-balik menempuh $2L$ sebelum menabrak dinding yang sama lagi, sehingga selang waktu antartumbukan $\Delta t = 2L/v_x$.



sisi kubus L

gaya rata-rata satu molekul:
 $F = 2mv_x \div (2L/v_x) = mv_x^2/L$

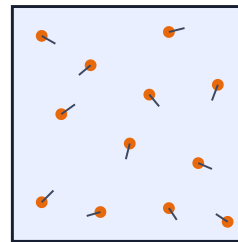
Langkah 4. Gaya rata-rata dari satu molekul = impuls $\div$ selang waktu $= \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$.



sisi kubus L

N molekul:
 $F = N m \langle v_x^2 \rangle / L$

Langkah 5. Untuk N molekul, jumlahkan semuanya: $F = \frac{Nm\langle v_x^2 \rangle}{L}$, dengan $\langle v_x^2 \rangle$ rata-rata kuadrat kecepatan arah x .



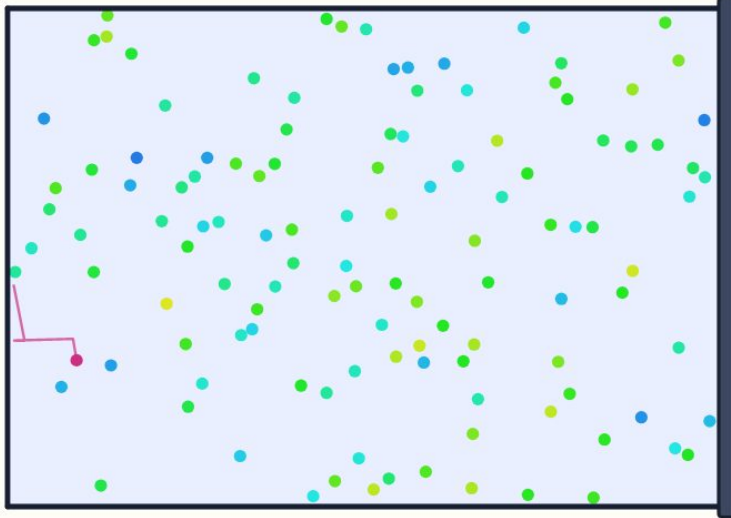
sisi kubus L

N molekul:
 $F = N m \langle v_x^2 \rangle / L$

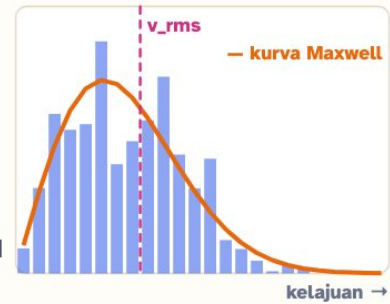
arah acak: $\langle v_x^2 \rangle = \langle v^2 \rangle / 3$
 $P = F/L^2 = N m \langle v^2 \rangle / (3V)$
 $= \frac{1}{3} \rho v_{rms}^2$

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 $P = \frac{Nm\langle v^2 \rangle}{3V} = \frac{1}{3} \rho v_{rms}^2$.

120 molekul • 300 K



sebaran kelajuan (2D)



P terukur (tumbukan)

0,95 atm

P teori ($PV = NkT$)

1 atm

 v_{rms} gas sungguhan

517 m/s

 E_k rata-rata $6,21 \times 10^{-21} \text{ J}$

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 $\frac{3}{2}$:

$$\overline{E_k} = \frac{1}{2}m\langle v^2 \rangle = \frac{3}{2}kT$$

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.

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} k T$$

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: $\text{J/K} \times \text{K} = \text{J}$. Jawaban boleh ditulis seperti 6,21e-21 atau $6,21 \times 10^{-21}$.

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."

MITOS

"Gas yang molekulnya lebih berat, misalnya CO₂, menekan dinding lebih kuat."

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".

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!).

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Gas makin panas → makin cepat. Molekul makin berat → makin lambat (sebanding $1/\sqrt{M}$).

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: $\approx 1,5 \times$ bunyi di udara $\cdot \approx 5,3 \times$ kereta cepat Whoosh (350 km/jam) $\cdot \approx 7\%$ dari satelit orbit rendah

$$\text{Cek satuan: } \sqrt{\frac{\text{J}/(\text{mol K}) \cdot \text{K}}{\text{kg/mol}}} = \sqrt{\text{J/kg}} = \sqrt{\text{m}^2/\text{s}^2} = \text{m/s}.$$

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) $v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 \times 8,31 \times 1000}{0,002}} \approx 3,5 \times 10^3$ m/s.

2 (b) $\frac{v_{\text{H}_2}}{v_{\text{O}_2}} = \sqrt{\frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{H}_2}}} = \sqrt{\frac{32}{2}} = 4$ kali.

3 (c) Rata-ratanya memang hanya $\pm 1/3$ 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.



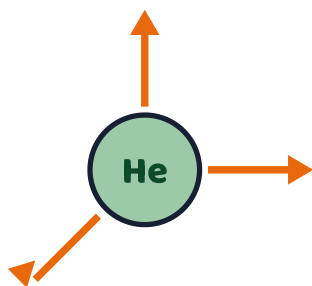
FAKTA UNIK DARI TARSU

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 .

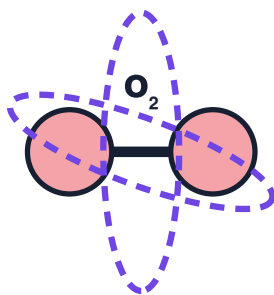
Bahasa sederhana • Gampangnya: gas monoatomik seperti helium hanya bisa "berlari". Gas diatomik seperti oksigen bisa berlari *dan* berputar seperti barbel yang dilempar, sehingga menyimpan lebih banyak energi pada suhu yang sama.



monoatomik: $f = 3$

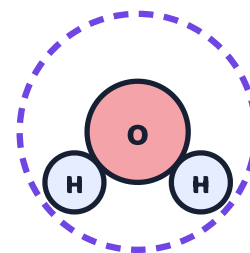
3 translasi

Derajat kebebasan pada suhu kamar. Getaran ikatan baru "aktif" pada suhu tinggi.



diatomik: $f = 5$

3 translasi + 2 rotasi



poliatomik tak linear: $f = 6$

3 translasi + 3 rotasi



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 $\pm 0,1\%$ 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 $\pm 2-3$ 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 ($M = 2 \text{ g/mol}$) dibandingkan molekul oksigen ($M = 32 \text{ g/mol}$) 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 mengembang 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 ($\pm 60^\circ \text{C}$) 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.

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT$$

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.

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, isothermal, dan adiabatik;
- menghitung **efisiensi** mesin kalor, efisiensi **Carnot**, dan **COP** kulkas atau AC;
- menjelaskan **Hukum II** dan **entropi** dengan contoh sehari-hari.

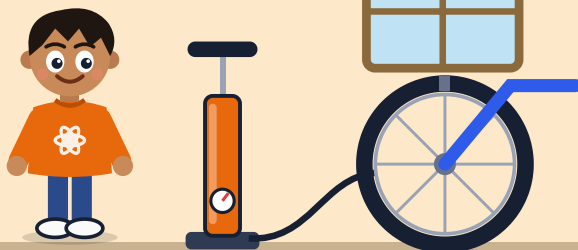
POMPA SEPEDA YANG DEMAM

KOMIK • 4 PANEL

Sabtu pagi, di teras rumah

RAKA

Ban sepedaku kempes. Pompa terus... biar kencang buat gowes ke Car Free Day!

**RAKA**

ADUH! Badan pompanya PANAS! Ada kompor di dalamnya?!

PSST! PSST!

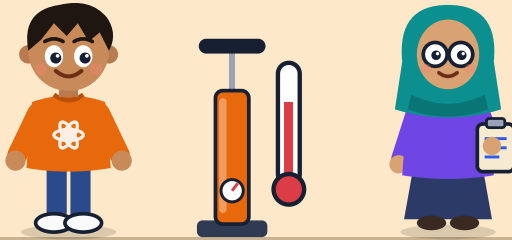


SARI

Nggak ada api, Rak. Udaranya panas karena kamu **menekannya cepat-cepat**. Aku sudah ukur: $45\text{ }^{\circ}\text{C}$!

RAKA

Jadi dorongan tanganku... berubah jadi panas?

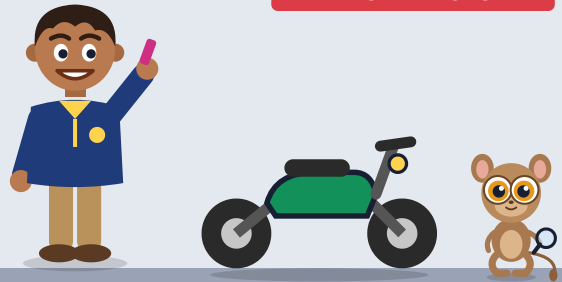


Sore, di bengkel motor

KAK NARA

Betul! Kebalikannya juga bisa: panas diubah jadi gerak. Itulah rahasia mesin motor dan PLTU. Kulkas malah memakai usaha untuk memindahkan panas. Selamat datang di **termodinamika**!

BENGKEL MOTOR



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.

**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:

$$U = \frac{f}{2} nRT.$$

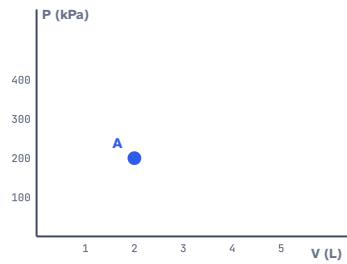
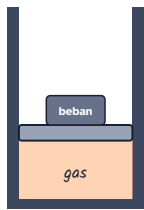
Akibatnya, kalor jenis molar pada volume tetap adalah $C_V = \frac{f}{2}R$.

17.2 Usaha gas dan diagram P–V

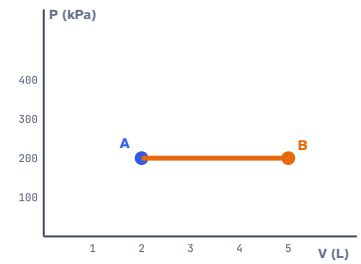
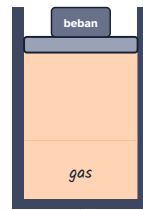
Gas bertekanan P mendorong piston seluas A dengan gaya $F = PA$. Jika piston bergeser sejauh Δx , usaha yang dilakukan gas adalah $W = F \Delta x = PA \Delta x$. Karena $A \Delta x$ adalah perubahan volume, kita dapat rumus yang ringkas: $W = P \Delta V$.

- 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.

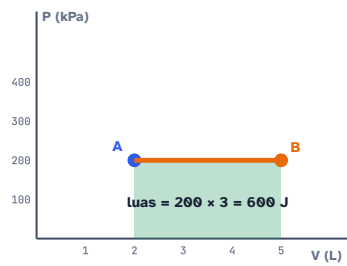
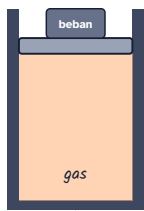
Fisikawan suka menggambar keadaan gas sebagai titik pada **diagram P–V** (tekanan terhadap volume). Ikuti animasi ini untuk melihat mengapa usaha selalu sama dengan **luas**.



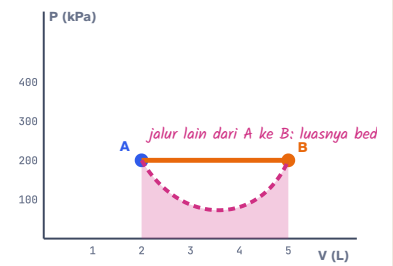
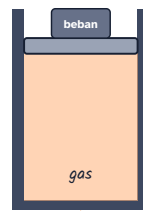
Langkah 1. Gas di dalam silinder bertekanan 200 kPa dan bervolume 2 L. Keadaan ini menjadi titik A pada diagram P-V.



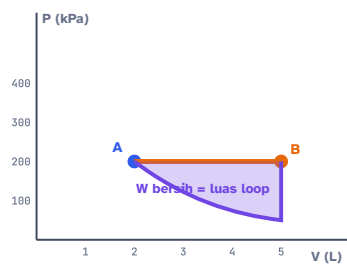
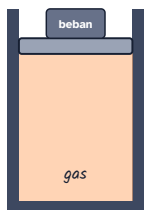
Langkah 2. Gas dipanaskan pelan-pelan. Beban di atas piston tidak berubah, jadi **tekanan tetap** (isobarik). Piston naik dan volume bertambah menjadi 5 L (titik B).



Langkah 3. Usaha gas $W = P \Delta V = 200 \text{ kPa} \times 3 \text{ L} = 600 \text{ J}$. 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!

$$W = P (V_2 - V_1)$$

Usaha gas = tekanan $\times$ perubahan volume. Memuai $\rightarrow$ positif, dimampatkan $\rightarrow$ 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: $\approx 14\%$ dari 1 kkal (kalori makanan)

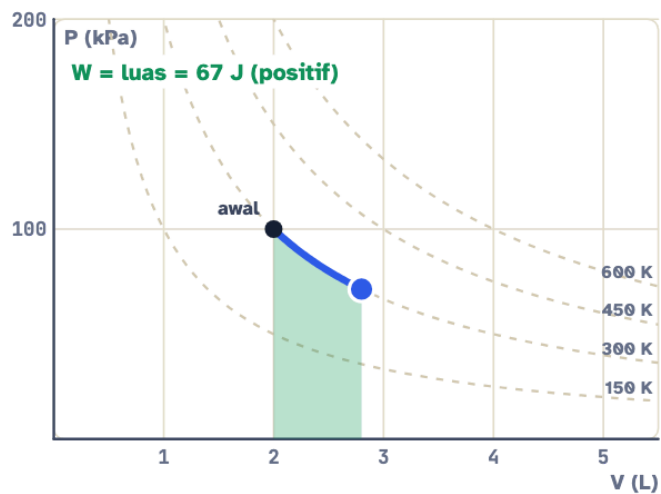
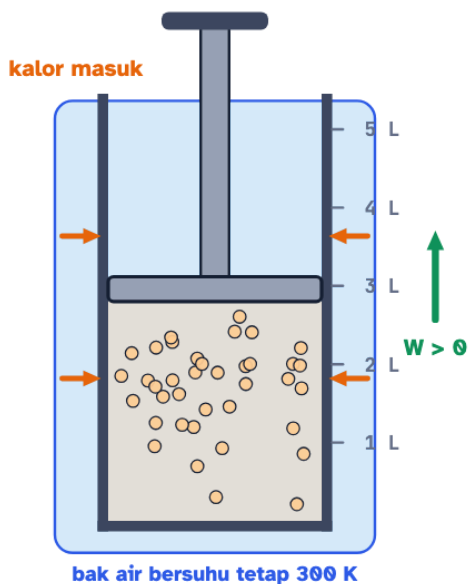
Cek satuan: $1 \text{ kPa} \times 1 \text{ L} = 10^3 \text{ Pa} \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1 \text{ J}$

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



TRIK KAK NARA: KPA $\times$ L = J

Malas mengubah satuan? Ingat pasangan ajaib ini: **kilopascal dikali liter langsung menghasilkan joule**, karena $10^3 \times 10^{-3} = 1$. Jadi $150 \text{ kPa} \times 4 \text{ L} = 600 \text{ J}$, tanpa repot menulis pangkat sepuluh.

Hukum I: $Q = \Delta U + W$

$$67 \text{ J} = 0 \text{ J} + 67 \text{ J}$$

Tekanan P
71 kPaVolume V
2,8 LSuhu T
300 KUsaha gas W
67 JKalor masuk Q
67 JPerubahan energi dalam ΔU
0 J

Pilih proses, lalu tekan **Jalankan** atau **seret piston** naik-turun. Bandingkan pemuaian *isothermal* 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 $\approx$ 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: $Q = +1.200 \text{ J}$. Gas memuai: $W = +500 \text{ J}$.

2 $\Delta U = Q - W = 1.200 - 500 = 700 \text{ J}$.

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? ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$, kalor jenis air $c = 4.200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$)

1 Tinjau 1 kg air. Energi potensialnya $mgh = 1 \times 9,8 \times 120 = 1.176 \text{ J}$.

2 Energi ini menaikkan suhu: $mc \Delta T = mgh$, sehingga $\Delta T = \frac{gh}{c}$.

3 $\Delta T = \frac{9,8 \times 120}{4.200} \approx 0,28 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

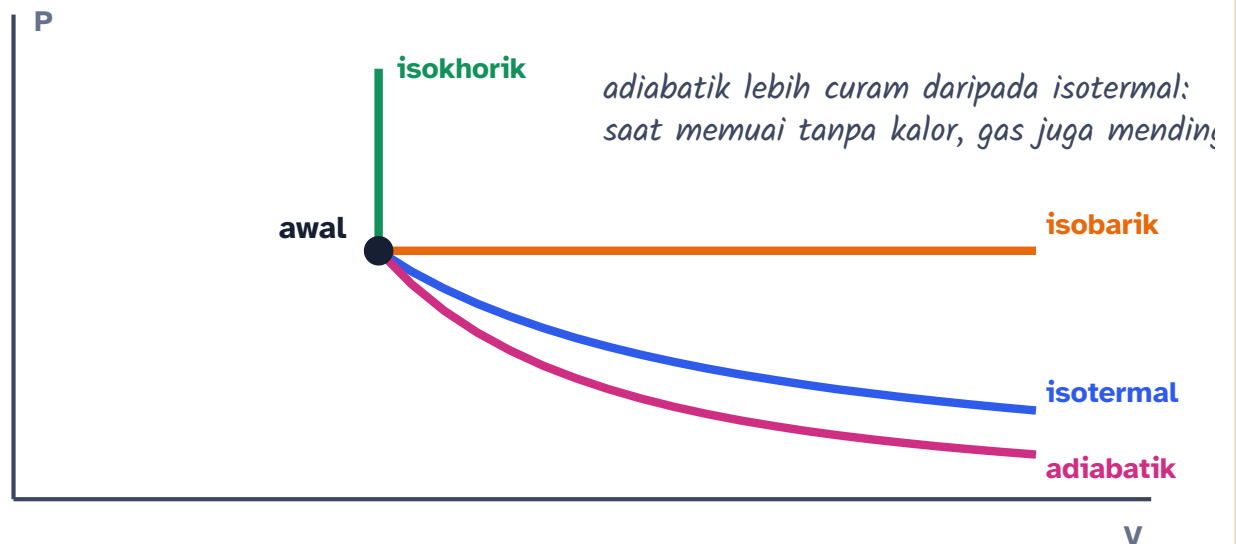
Gas bisa berubah keadaan dengan banyak cara. Empat cara istimewa punya nama sendiri, karena pada setiap proses itu ada satu hal yang dijaga **tetap**.



TRIK KAK NARA: BACA NAMANYA!

Iso artinya "sama". Iso-**bar**-ik: tekanan tetap (seperti satuan *bar*). Iso-**kh**or-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 memanans. 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."

MITOS

"Suhu gas hanya bisa naik kalau gas dipanaskan."

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.

FAKTA

Usaha juga bisa menaikkan suhu! Pada proses adiabatik

$$Q = 0$$

, tetapi gas yang dimampatkan tetap memanaskan 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 $W = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{\gamma - 1}$.

Pada proses isothermal, usaha diperoleh dari integral $W = \int P dV = \int \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$.

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: $W = P \Delta V = 200 \text{ kPa} \times 2 \text{ L} = 400 \text{ J}$.
- 2 Untuk gas monoatomik, $\Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T = \frac{3}{2} P \Delta V$ (karena $PV = nRT$). Jadi $\Delta U = 1,5 \times 400 = 600 \text{ J}$.
- 3 Hukum I: $Q = \Delta U + W = 600 + 400 = 1.000 \text{ J}$.

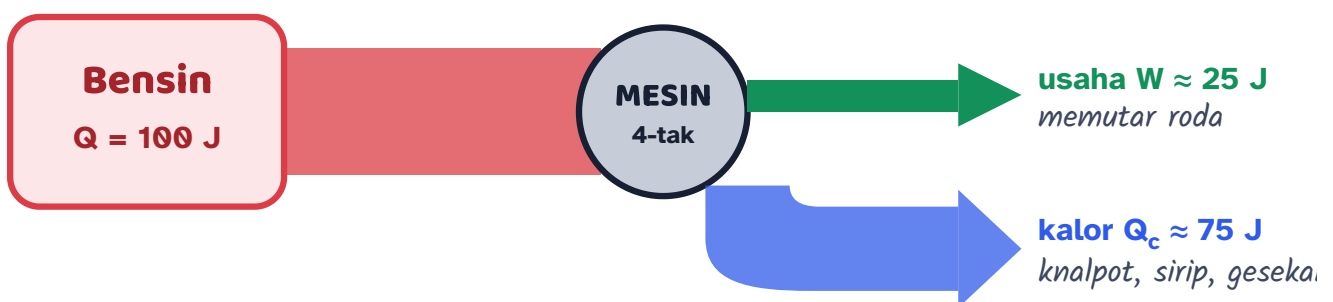
Usaha 400 J, energi dalam naik 600 J, dan kalor yang diserap 1.000 J. Dari setiap 5 bagian kalor, 2 bagian dipakai mendorong piston dan 3 bagian menaikkan suhu.

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.

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}, \quad W = Q_h - Q_c$$

$$\text{efisiensi } \eta = 25 \text{ J} / 100 \text{ J} = 25\%$$



Aliran energi kira-kira pada motor bensin. Lebar panah sebanding dengan banyaknya energi.

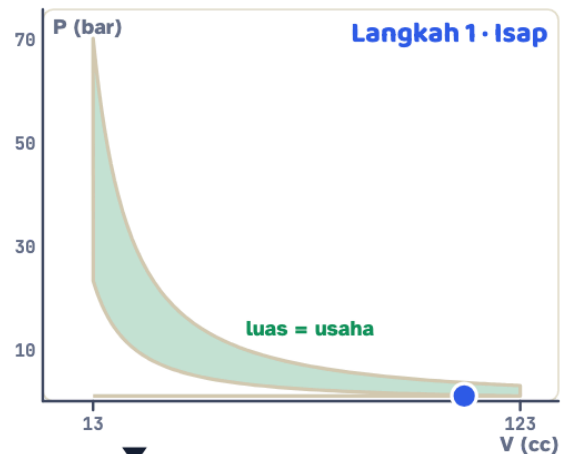
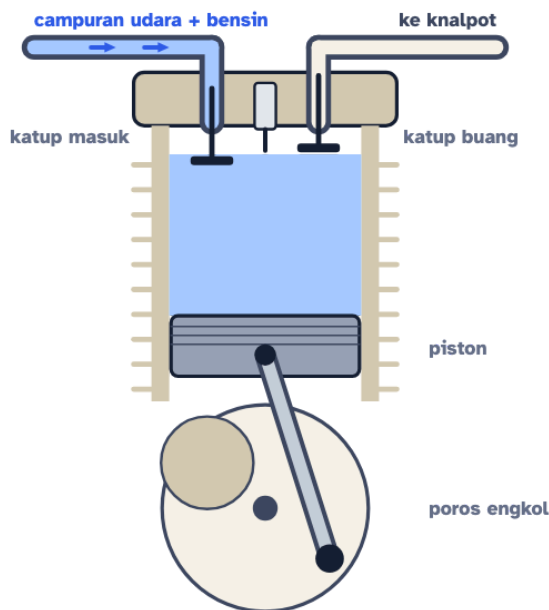
Empat langkah motor bebek

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 memanaskan).
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



1 • Isap 2 • Kompresi 3 • Usaha 4 • Buang

satu siklus = 2 putaran engkol = 720°

Langkah

1 • Isap

Sudut engkol

128 °

Tekanan gas

1 bar

Usaha ideal per siklus

90 J

Efisiensi ideal (Otto)

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)

$\pm 10\text{--}20\%$

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 terbangun ke knalpot dan sirip pendingin 900 kJ. Berapa usaha yang dihasilkan dan berapa efisiensinya?

1 Usaha: $W = Q_h - Q_c = 1.200 - 900 = 300 \text{ kJ}$.

2 Efisiensi: $\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{300}{1.200} = 0,25 = 25\%$.

3 Daya rata-rata mesin: $P = \frac{300.000 \text{ J}}{60 \text{ s}} = 5.000 \text{ W} = 5 \text{ kW}$.

Mesin menghasilkan 300 kJ usaha per menit ($\pm 5 \text{ kW}$) dengan efisiensi 25%. Tiga perempat energi bensin berubah menjadi kalor yang terbangun.

17.6 Mesin Carnot dan Hukum II: batas yang tidak bisa ditembus

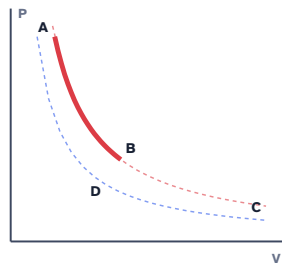
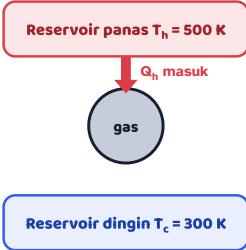
Kalau gesekan dihilangkan dan mesin dibuat sempurna, bisakah efisiensinya 100%? Seorang insinyur muda Prancis menjawab pertanyaan ini sekitar dua abad lalu.



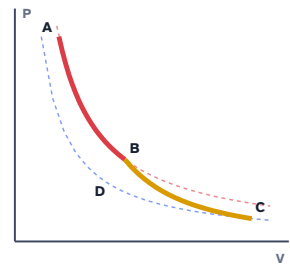
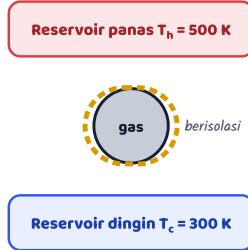
TAMU DARI MASA LALU

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.

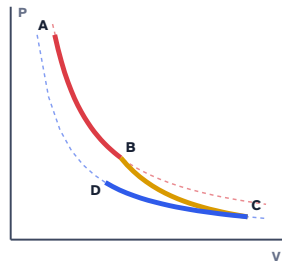
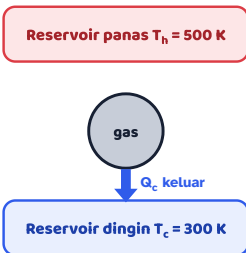
Mesin Carnot adalah mesin ideal yang bekerja dengan siklus dua proses isothermal dan dua proses adiabatik.



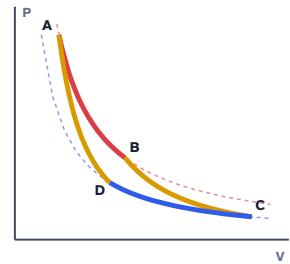
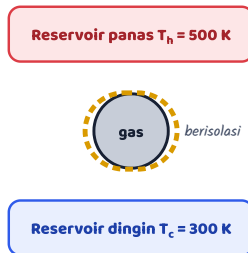
Langkah 1. A→B: pemanasan isothermal pada T_h . Gas bersentuhan dengan reservoir panas, menyerap kalor Q_h , dan mendorong piston. Suhu tetap 500 K.



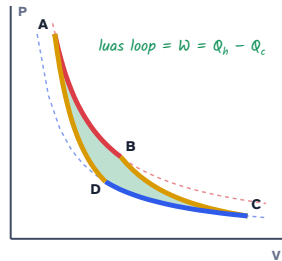
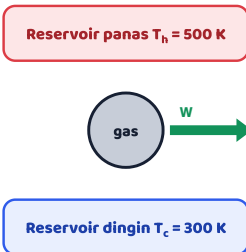
Langkah 2. B→C: pemanasan adiabatik. Silinder diselubungi isolator. Gas terus memuai tanpa menerima kalor, sehingga suhunya turun dari 500 K menjadi 300 K.



Langkah 3. C→D: pemampatan isothermal 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.

$$\eta_C = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Efisiensi terbaik yang mungkin hanya ditentukan suhu. Hitung dalam kelvin: $T(K) = T(^{\circ}C) + 273$.

T_h Suhu sumber panas $^{\circ}C$

T_c Suhu pembuangan $^{\circ}C$

η_C Efisiensi Carnot %

EFISIENSI CARNOT

62,7
%

Mesin ideal di antara **540** $^{\circ}C$ dan **30** $^{\circ}C$ 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 $^{\circ}C$ dengan K mengubah hasilnya!

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

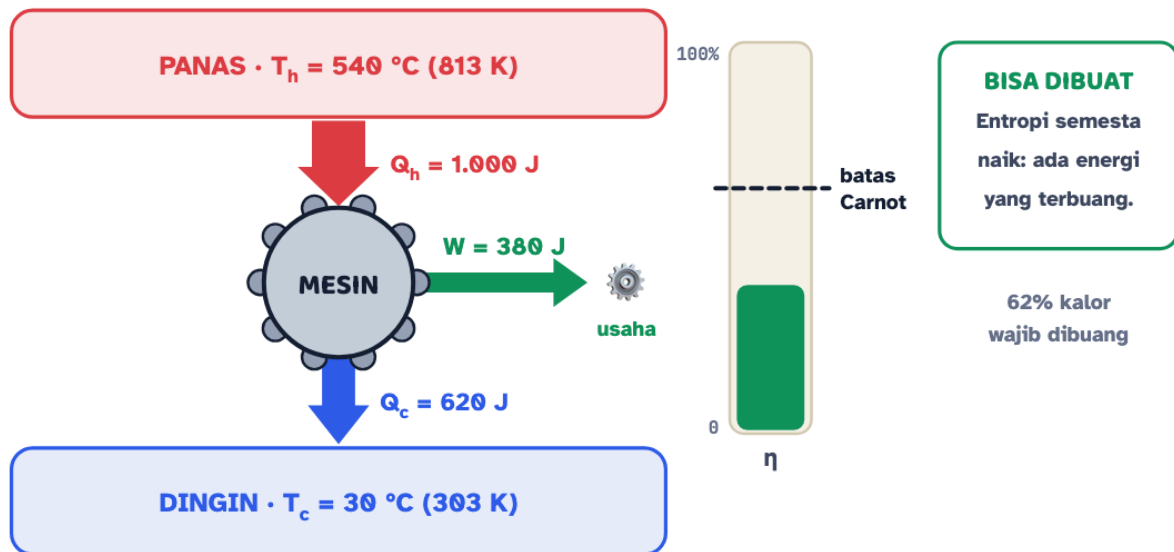


AWAS JEBAKAN

Dalam rumus Carnot, suhu **wajib dalam kelvin**. Mesin di antara 100 $^{\circ}C$ dan 25 $^{\circ}C$ **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.



Batas ideal (Carnot)

62,7 %

Klaim kamu

38 %

 ΔS semesta per siklus

0,816 J/K

Putusan

☒ 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!

Uap PLTU bersuhu $540\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan air laut pendingin kondensornya $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Berapa efisiensi Carnot-nya? Bandingkan dengan efisiensi nyata $\pm 38\%$.

1 Ubah ke kelvin: $T_h = 540 + 273 = 813\text{ K}$ dan $T_c = 30 + 273 = 303\text{ K}$.

2 $\eta_C = 1 - \frac{303}{813} = 1 - 0,373 = 0,627 \approx 63\%$.

3 Efisiensi nyata 38% hanya sekitar $38/63 \approx 0,6$ bagian dari batas ideal.

Batas Carnot $\pm 63\%$, sedangkan kenyataannya $\pm 38\%$. 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.



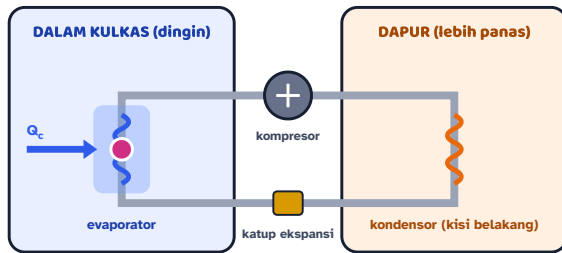
LANJUT • OLIMPIADE

MENGAPA TIDAK ADA MESIN YANG MENGALAHKAN CARNOT?

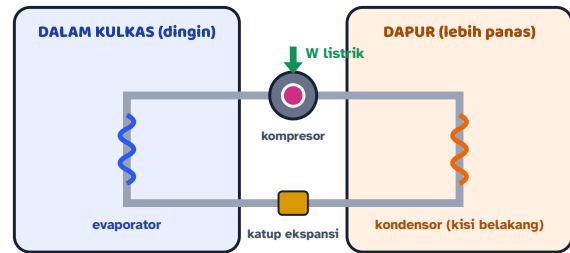
Misalkan ada mesin X dengan $\eta_X > \eta_C$. Pasangkan X dengan mesin Carnot yang dijalankan terbalik (sebagai pompa kalor), dan atur agar usaha keluaran X tepat dipakai untuk menggerakkan pompa Carnot. Hasil bersih gabungan keduanya: kalor berpindah dari reservoir dingin ke reservoir panas **tanpa 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

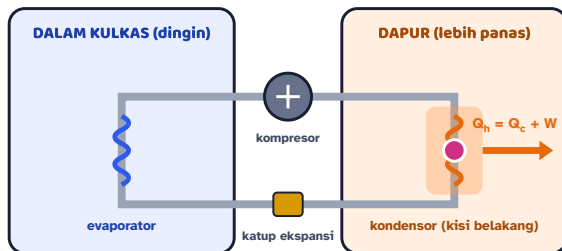
Kulkas dan AC adalah **mesin kalor yang dijalankan terbalik**. Dengan bantuan usaha listrik W , kalor Q_c "dipompa" dari tempat dingin (isi kulkas, kamar) ke tempat panas (dapur, udara luar). Kalor yang dibuang ke luar adalah $Q_h = Q_c + W$, jadi selalu **lebih besar** daripada kalor yang diambil.



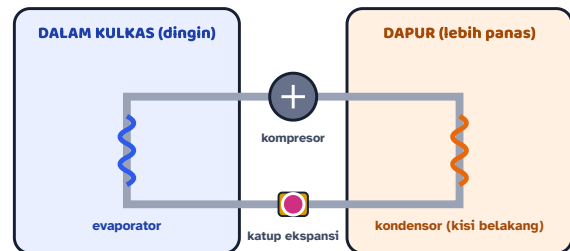
Langkah 1. Di **evaporator** (pipa di dalam kulkas), refrigeran cair bertekanan rendah menguap. Penguapan butuh kalor, jadi refrigeran menyerap kalor Q_c dari makanan. Isi kulkas mendingin.



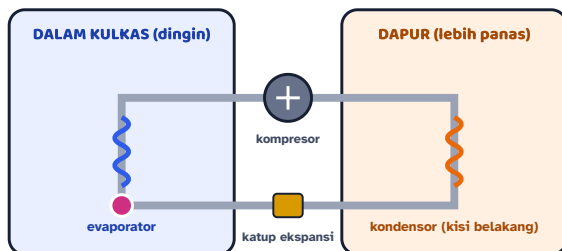
Langkah 2. **Kompresor** (motor listrik) memampatkan uap refrigeran. Usaha listrik W membuat uap menjadi bertekanan tinggi dan **sangat panas**, lebih panas daripada dapur.



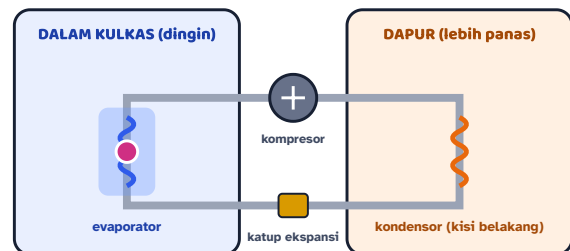
Langkah 3. Di **kondensor** (kisi-kisi di belakang kulkas), uap panas membuang kalor $Q_h = Q_c + W$ ke udara dapur dan mengembun menjadi cair. Itu sebabnya belakang kulkas terasa hangat.



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.

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W}, \quad \text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

$$\text{COP}_C = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

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: $W = \frac{Q_c}{\text{COP}} = \frac{2,6 \text{ kW}}{3,25} = 0,8 \text{ kW} = 800 \text{ W}.$

2 Kalor dibuang per detik: $Q_h = Q_c + W = 2,6 + 0,8 = 3,4 \text{ kW}.$

3 COP Carnot: $T_c = 297 \text{ K}, T_h = 307 \text{ K},$ jadi $\text{COP}_C = \frac{297}{307 - 297} = 29,7.$

AC memakai $\pm 800 \text{ W}$ 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 asam-susu 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: 1000 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) memanaskan. 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 isothermal 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, isothermal, 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 $\times$ perubahan volume. Memuai $\rightarrow$ positif, dimampatkan $\rightarrow$ 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: $T(K) = T(^{\circ}C) + 273$.

$$COP_C = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

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.

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.

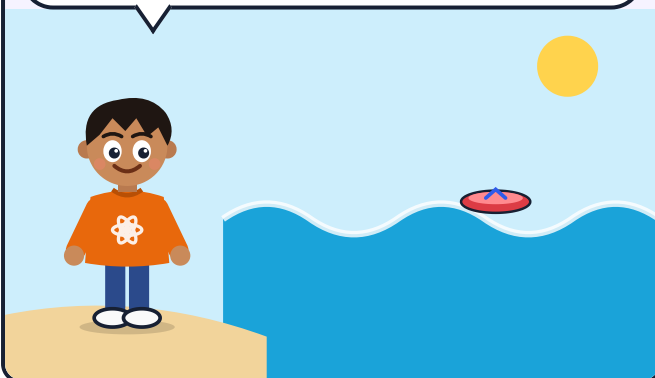
SANDAL DI PANTAI KUTA

KOMIK • 4 PANEL

Liburan di Pantai Kuta, Bali

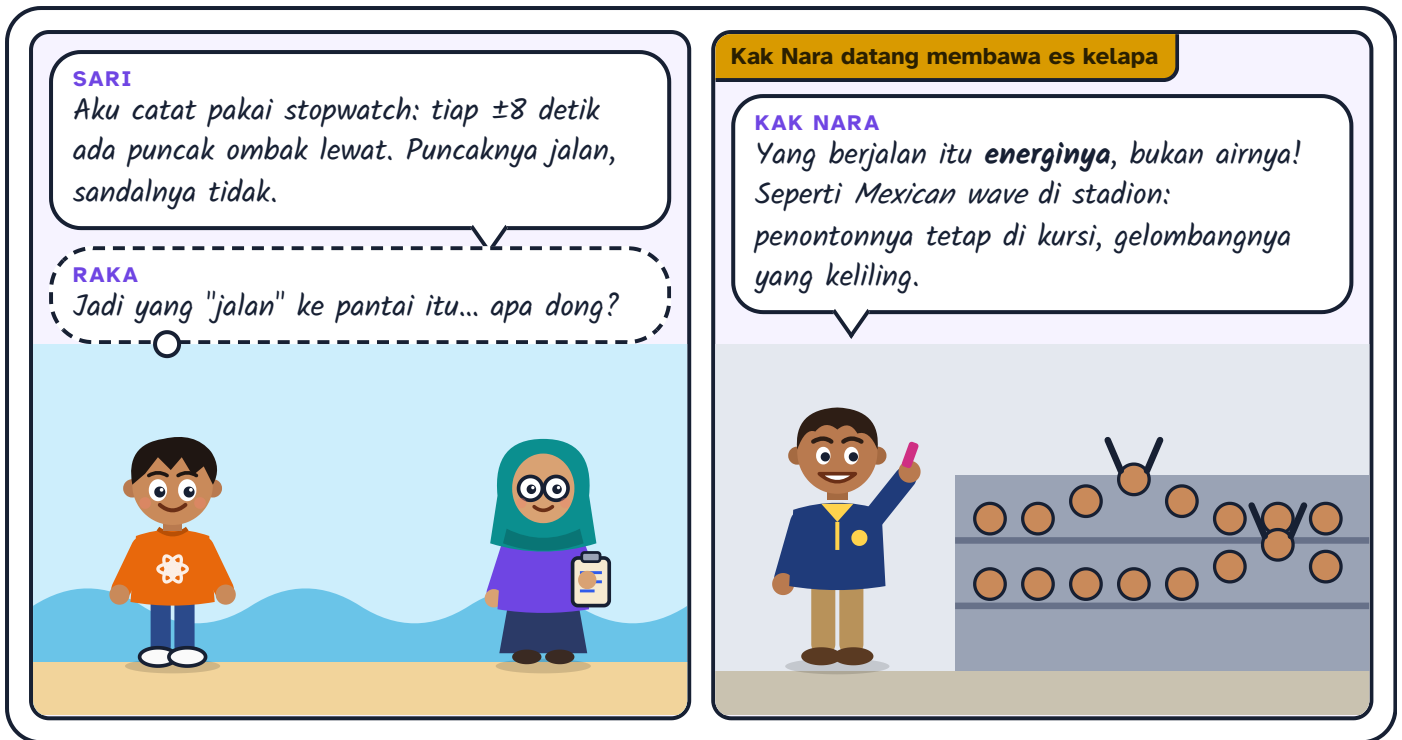
RAKA

Yah, sandalku hanyut! Tenang... nanti juga diantar ombak balik ke pantai.

**RAKA**

Lho?! Sudah sepuluh ombak lewat, tapi sandalku cuma naik-turun di tempat!





18.1 Apa itu gelombang?

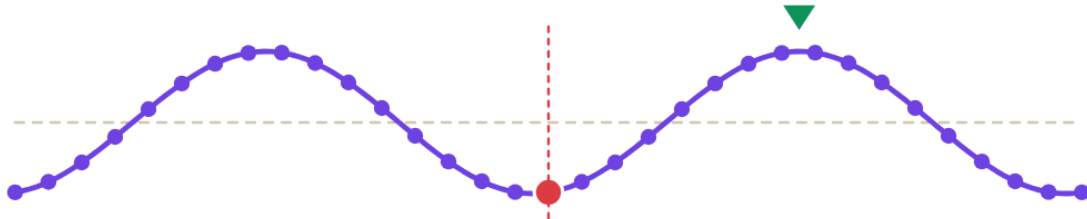
Gelombang adalah **getaran yang merambat**. Saat kamu menggoyang ujung tali, bagian tali di dekat tanganmu menarik bagian sebelahnya, yang lalu menarik bagian berikutnya, dan seterusnya. Yang berpindah dari ujung ke ujung adalah **energi** dan **pola goyangannya**. Setiap bagian tali hanya bergetar di 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.

Tali digoyang

$$v = \lambda f = 3 \times 0,6 = 1,8 \text{ m/s}$$



Panjang gelombang $\lambda = v/f$
3 m

Periode T
1,67 s

Partikel merah
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

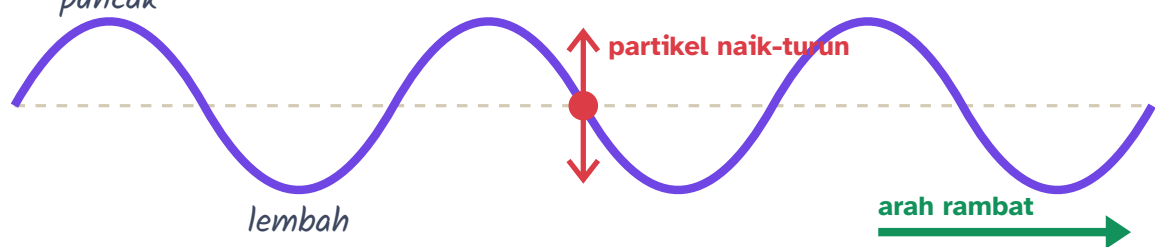
Pada tali atau slinky, cepat rambat ditentukan oleh **medium** (tegangan dan massa tali), bukan oleh tinggi gelombang. Pulsa kecil dan pulsa besar tiba di ujung tali pada saat yang sama.

18.2 Transversal dan longitudinal

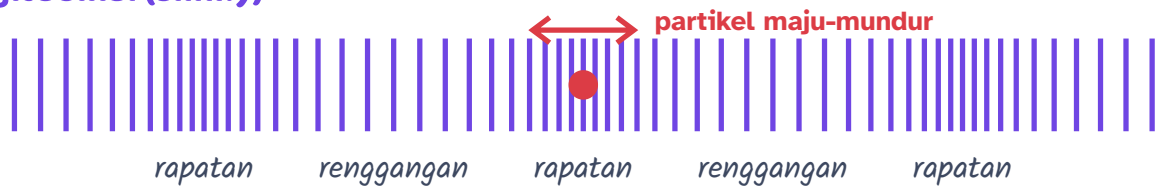
Gelombang dibedakan menurut **arah getar** partikel dibandingkan dengan **arah rambat** gelombang.

- **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.

Transversal (tali)



Longitudinal (slinky)



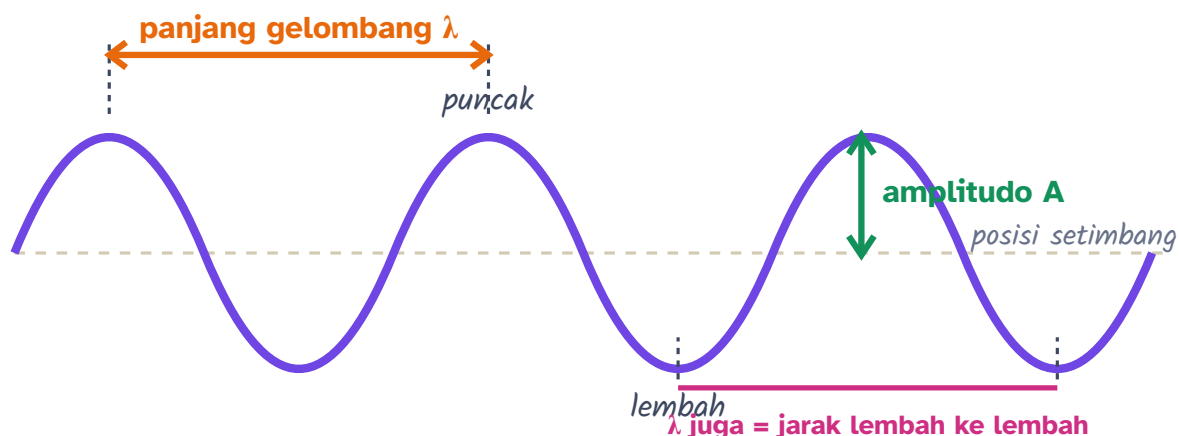
Atas: tali digoyang naik-turun. Bawah: slinky didorong-tarik; lilitannya merapat dan merenggang bergantian.



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**.



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 $\times$ 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.**

$$v = \lambda f$$

Cepat rambat = panjang satu gelombang $\times$ banyak gelombang per detik.

 λ

Panjang gelombang m

 f

Frekuensi Hz

 v

Cepat rambat m/s

CEPAT RAMBAT

2

m/s

Gelombang dengan $\lambda = 4$ m dan $f = 0,5$ Hz merambat **2** m/s. Periodenya $1/f$, dan dalam satu periode gelombang maju satu λ .

Satuan Nusantara: $\approx 1,4 \times$ jalan kaki santai $\cdot \approx 18\%$ dari ojek di jalan kota (± 40 km/jam) $\cdot \approx 2\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\text{m} \times \text{Hz} = \text{m} \times \text{s}^{-1} = \text{m/s}$

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	$\pm 0,12$ Hz (periode ± 8 s)	± 12 m/s
Slinky di kelas	$\pm 0,5$ m	± 2 Hz	± 1 m/s
Bunyi nada "la" (440 Hz) di udara	$\pm 0,78$ 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?

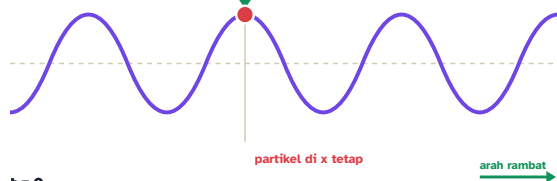
1 Frekuensi: $f = \frac{10 \text{ getaran}}{20 \text{ s}} = 0,5 \text{ Hz}$. Periode: $T = 1/f = 2 \text{ s}$.

2 Cepat rambat: $v = \lambda f = 4 \times 0,5 = 2 \text{ m/s}$.

Riak merambat 2 m/s, padahal pelampungnya tidak bergeser ke mana-mana. Yang berjalan adalah polanya.

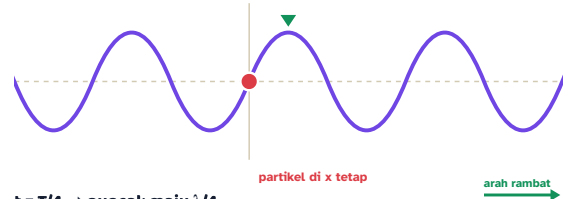
18.4 Persamaan gelombang berjalan

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.



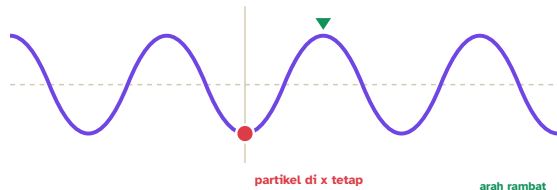
$t = 0$

Langkah 1. Saat $t = 0$, puncak gelombang (segitiga hijau) tepat berada di partikel merah.



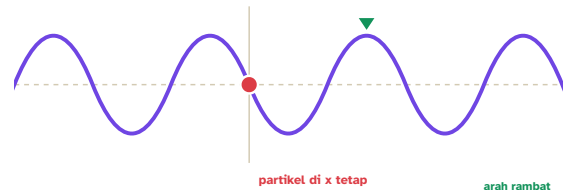
$t = T/4 \rightarrow \text{puncak maju } \lambda/4$

Langkah 2. Seperempat periode kemudian, seluruh pola bergeser $\lambda/4$ ke kanan. Partikel merah **tidak** ikut ke kanan, ia turun ke posisi setimbang.



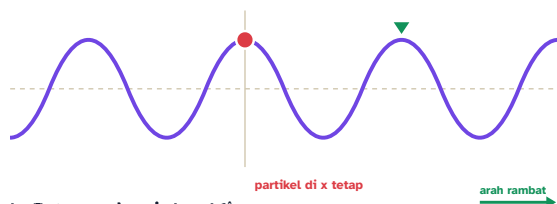
$t = T/2 \rightarrow \text{puncak maju } \lambda/2$

Langkah 3. Setengah periode: partikel merah berada di lembah, sementara puncak hijau sudah maju $\lambda/2$.



$t = 3T/4 \rightarrow \text{puncak maju } 3\lambda/4$

Langkah 4. Tiga perempat periode: partikel merah naik lagi melewati posisi setimbang.



$t = T \rightarrow \text{puncak maju tepat } 1\lambda$

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:

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx), \quad \omega = 2\pi f, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad v = \frac{\omega}{k}$$

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**.

$$y = A \sin \left(2\pi \left(f t - \frac{x}{\lambda} \right) \right)$$

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: $\text{Hz} \cdot \text{s} = 1$ dan $\text{m}/\text{m} = 1$.

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 $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda}$. Jika $\Delta x = \lambda, 2\lambda, \dots$, keduanya **sefase** (bergerak kompak). Jika $\Delta x = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots$, 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** $v_y = \frac{\partial y}{\partial t} = A\omega \cos(\omega t - kx)$ (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.

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 $y = A \sin(\omega t - kx)$: $A = 0,05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$, $\omega = 10\pi \text{ rad/s}$, $k = 2\pi \text{ rad/m}$.

2 $f = \frac{\omega}{2\pi} = 5 \text{ Hz}$ dan $\lambda = \frac{2\pi}{k} = 1 \text{ m}$.

3 $v = \lambda f = 1 \times 5 = 5 \text{ m/s}$, ke arah x positif (tanda minus di antara ωt dan kx).

4 Beda fase: $\Delta\varphi = 2\pi \times \frac{0,25}{1} = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$ (seperempat getaran).

$A = 5 \text{ cm}$, $f = 5 \text{ Hz}$, $\lambda = 1 \text{ m}$, $v = 5 \text{ m/s}$ ke kanan, dan beda fase $\pi/2$. Kecepatan partikel maksimumnya $A\omega = 0,05 \times 10\pi \approx 1,6 \text{ m/s}$, 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.

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

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: $\approx 1,3 \times$ kereta cepat Whoosh (350 km/jam) $\cdot \approx 37\%$ dari bunyi di udara $\cdot \approx 11 \times$ ojek di jalan kota (± 40 km/jam)

$$\text{Cek satuan: } \sqrt{\text{N}/(\text{kg}/\text{m})} = \sqrt{\text{kg m s}^{-2} \cdot \text{m}/\text{kg}} = \text{m/s}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-GEL-TALI](https://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 dawaiinya.

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

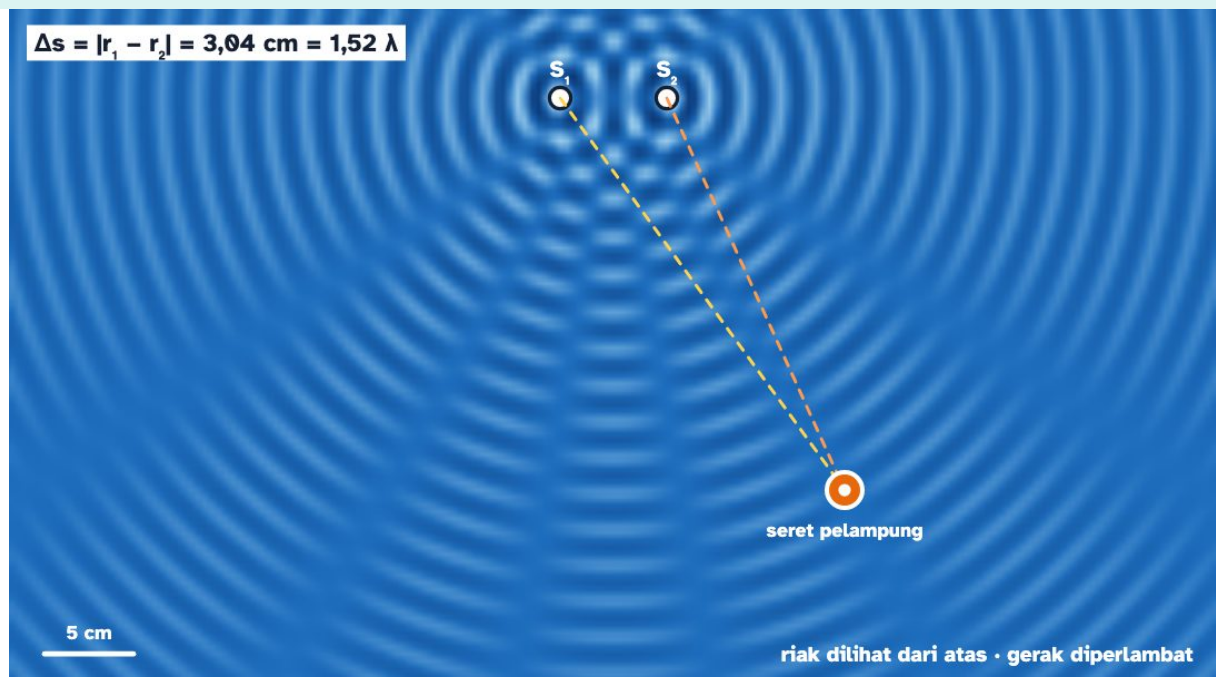
Dua sumber yang bergetar dengan frekuensi sama dan beda fase tetap disebut **sumber koheren**. Di sekitarnya terbentuk pola interferensi yang **diam**: ada garis-garis yang selalu tenang (simpul) dan garis-garis yang bergolak

kuat (perut). Untuk dua sumber sefase, jenis interferensi di suatu titik ditentukan oleh **selisih jarak** titik itu ke kedua sumber:

Selisih lintasan $\Delta s = r_1 - r_2 $	Interferensi	Yang terlihat
$0, \lambda, 2\lambda, \dots = n\lambda$	konstruktif	air bergolak paling kuat
$\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots = (n + \frac{1}{2})\lambda$	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
27,2 cm

Jarak ke S_2
24,2 cm

Selisih lintasan
1,52 λ

Di pelampung
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.

**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

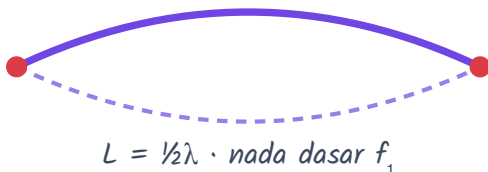
Gelombang yang tiba di ujung tali akan **memantul**. Cara memantulnya bergantung pada ujung tali:

- **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**.

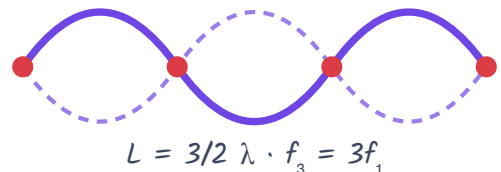
Jika ujung tali digetarkan terus-menerus, gelombang datang dan gelombang pantul bertumpuk. Pada frekuensi tertentu, hasilnya adalah pola yang tidak tampak berjalan, hanya bergoyang di tempat. Inilah **gelombang stasioner**. Titik yang selalu diam disebut **simpul** (S), dan titik yang bergetar paling kuat disebut **perut** (P). Jarak dua simpul berdekatan selalu $\frac{1}{2}\lambda$.

titik merah = simpul (selalu diam)

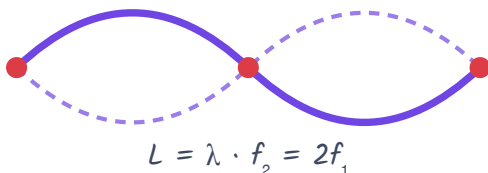
$n = 1$



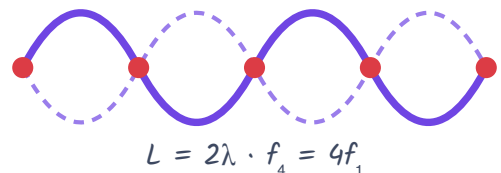
$n = 3$



$n = 2$



$n = 4$

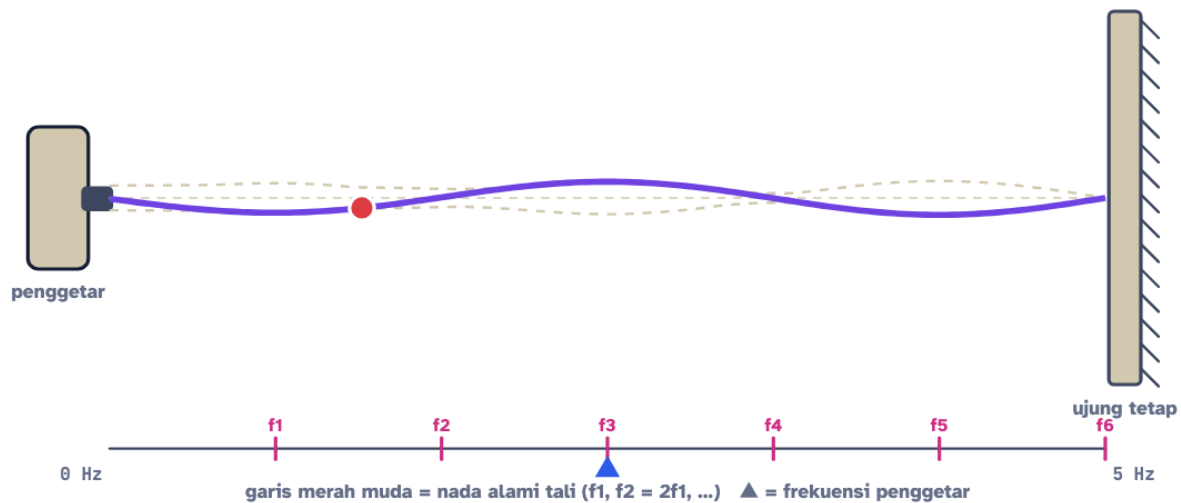


Pola gelombang stasioner pada dawai yang kedua ujungnya terikat. Garis penuh dan putus-putus adalah dua posisi ekstrem.

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:

$$f_n = \frac{nv}{2L} = nf_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

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**.

tali $L = 6 \text{ m}$ Cepat rambat v

10 m/s

Panjang gelombang λ

4 m

Nada dasar $f_1 = v/2L$

0,833 Hz

Keadaan

Resonansi! 3 perut

Pada mode **stasioner**, geser frekuensi perlahan dan perhatikan penanda nada alami $f_1, f_2, f_3, \dots$ 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 $x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \dots$ (simpul) dan maksimum $2A$ di $x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \dots$ (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: $\mu = \frac{0,030 \text{ kg}}{1,5 \text{ m}} = 0,02 \text{ kg/m}$.
- 2 Cepat rambat: $v = \sqrt{F/\mu} = \sqrt{50/0,02} = \sqrt{2.500} = 50 \text{ m/s}$.
- 3 Tiga perut berarti $n = 3$: $L = \frac{3}{2}\lambda$, jadi $\lambda = \frac{2 \times 1,5}{3} = 1 \text{ m}$.
- 4 $f_3 = \frac{v}{\lambda} = \frac{50}{1} = 50 \text{ Hz}$. Cek: $f_1 = \frac{v}{2L} = 16,7 \text{ Hz}$, dan $3 \times 16,7 = 50 \text{ Hz}$. ✓

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 $f_n = n f_1$? 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 $\times$ banyak gelombang per detik.

$$y = A \sin\left(2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

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 $\rightarrow$ gelombang ngebut. Tali yang kendur dan berat $\rightarrow$ gelombang lambat.

⚠ **Jangan sampai terjebak**

- Jangan campur aduk cepat rambat gelombang $v = \lambda f$ (seberapa cepat pola bergeser) dengan kecepatan partikel $v_y = \frac{\partial y}{\partial t} = A\omega \cos(\omega t - kx)$ (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 $f_1, 2f_1, 3f_1, \dots$ yang kamu pelajari di bab ini. Lanjut di Bab 19: Bunyi.

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 diregangkan.

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

Latihan musik di sekolah

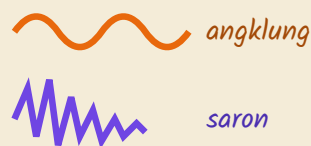
RAKA

Nada "do" angklungku sama dengan "do" saron Pak Guru. Berarti bunyinya sama persis, dong!



SARI

Nadanya sama, tapi "rasanya" beda. Merem pun aku bisa tahu mana angklung, mana saron. Kok bisa, ya?

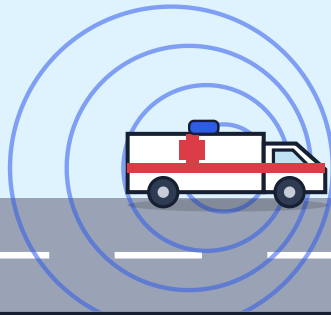


Pulang sekolah, di pinggir jalan

RAKA

Eh, nada sirenenya turun pas ambulansnya lewat! Sopirnya ganti lagu?!

NGIIING... NGOOONG...



KAK NARA

Sirenenya tidak berubah, Rak. Yang berubah adalah **gelombang yang sampai di telingamu**. Ayo kita bongkar rahasia bunyi!

TARSI

Fakta unik: kelelawar "melihat" dengan bunyi!



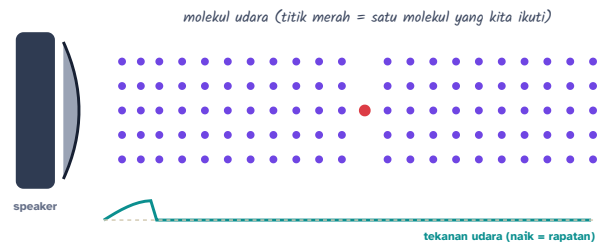
19.1

Bunyi: rapatan dan renggangan yang merambat

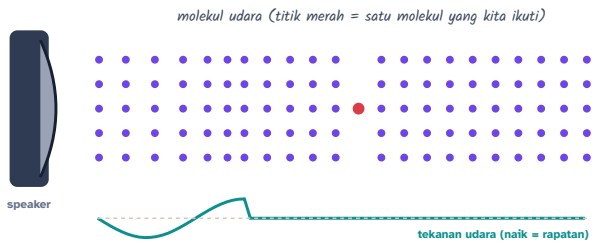
Semua bunyi berasal dari benda yang **bergetar**: dawai sasando, bilah saron, kulit bedug, membran speaker, atau pita suaramu. Benda bergetar itu mendorong udara di depannya sehingga molekul udara berdesakan (**rapatan**), lalu menarik diri sehingga molekul udara merenggang (**renggangan**). Pola rapatan-renggangan ini merambat menjauhi sumber sebagai **gelombang longitudinal**.



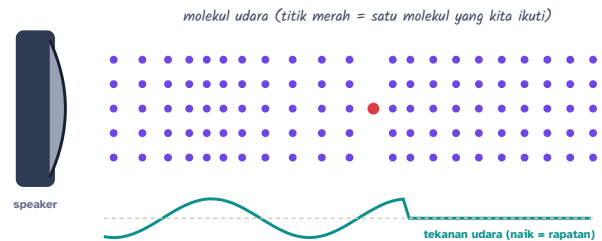
Langkah 1. Membran speaker diam. Molekul udara tersebar merata dan tekanannya sama di mana-mana.



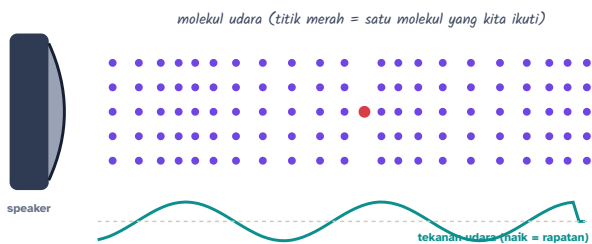
Langkah 2. Membran bergerak ke kanan dan mendorong molekul di depannya. Molekul berdesakan: terbentuk **rapatan**, tekanannya sedikit lebih tinggi.



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 antrai. 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 $\Delta p = -B \frac{\partial s}{\partial x}$, 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

$$s = v t, \quad v \approx 331 + 0,6 T$$

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: $\approx 43\%$ dari tinggi Puncak Jaya · $\approx 39\%$ dari panjang Jembatan Suramadu · $\approx 16 \times$ tinggi Monas

Cek satuan: $\text{m/s} \times \text{s} = \text{m}$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-BUNYI-PETIR](https://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: $s = vt = 347 \times 6 \approx 2.080$ m.

Petir sekitar 2,1 km dari Raka. Aturan "bagi tiga" memberi $6 \div 3 = 2$ 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 (isothermal): $v = \sqrt{P/\rho} \approx 280$ 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:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}.$$

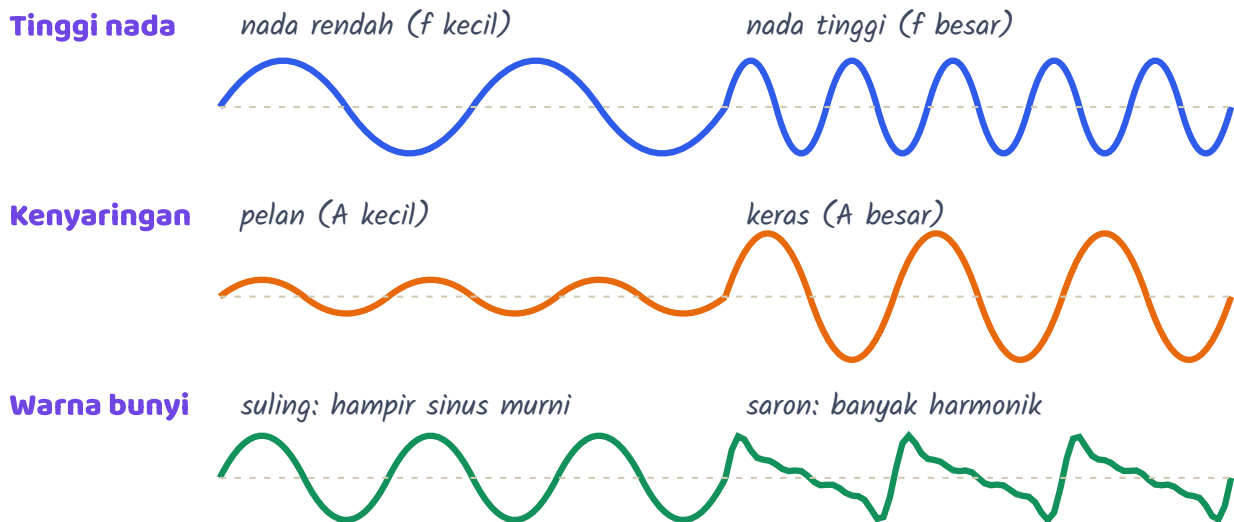
Untuk udara ($\gamma = 1,4$, $M = 0,029$ kg/mol) pada 293 K, hasilnya ± 343 m/s. Perhatikan: $v \propto \sqrt{T}$, tidak bergantung pada tekanan.

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 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, dan tahan sampai kira-kira 1 W/m^2 (sejuta-juta kali lipat!). Karena rentangnya sangat lebar, dipakai skala logaritma bernama **taraf intensitas** dalam desibel (dB):

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}, \quad I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Sumber bunyi	Taraf intensitas (kira-kira)	Catatan
Ambang pendengaran	0 dB	$I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
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	$I \approx 1\text{--}10 \text{ W/m}^2$



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: $\beta_n = \beta_1 + 10 \log n$.

$$\beta = \beta_1 + 10 \log n - 20 \log \frac{r}{r_1}$$

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

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 $n = 1, 2, 3, \dots$

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.

$$\text{Cek satuan: } \frac{1}{\text{m}} \sqrt{\frac{\text{N}}{\text{kg/m}}} = \frac{1}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \text{Hz}$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-BUNYI-DAWAI](https://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**.

Pipa terbuka (dua ujung terbuka)



$$f_1 = v/2L \text{ (nada dasar)}$$



$$f_2 = 2f_1$$



$$f_3 = 3f_1$$

Pipa tertutup (satu ujung tertutup)



$$f_1 = v/4L \text{ (nada dasar)}$$



$$f_3 = 3f_1$$



$$f_5 = 5f_1$$

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.

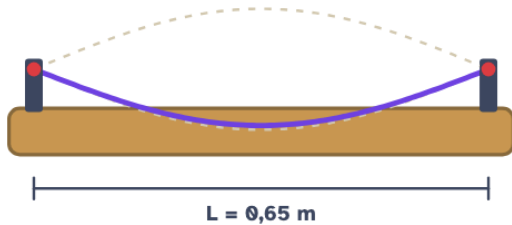
makin tinggi, karena kolom udaranya makin pendek.

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.

Dawai: kedua ujung terikat (simpul)



• merah = simpul simpangan • gerak diperlambat

Nada terdekat

A2 · 1a

110,4 Hz

Cepat rambat v
143,5 m/sPanjang gelombang λ
1,3 mFrekuensi f
110,4 HzNada terdekat
A2 · 1a

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 memperkuat bunyi. Pemain menyetel nada dengan memutar pasak untuk mengubah tegangan dawai, persis seperti rumus $f \propto \sqrt{F}$.

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 $f = \frac{v}{4L} = \frac{340}{4 \times 0,34} = 250$ 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 $f = \frac{v}{2L} = 500$ 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

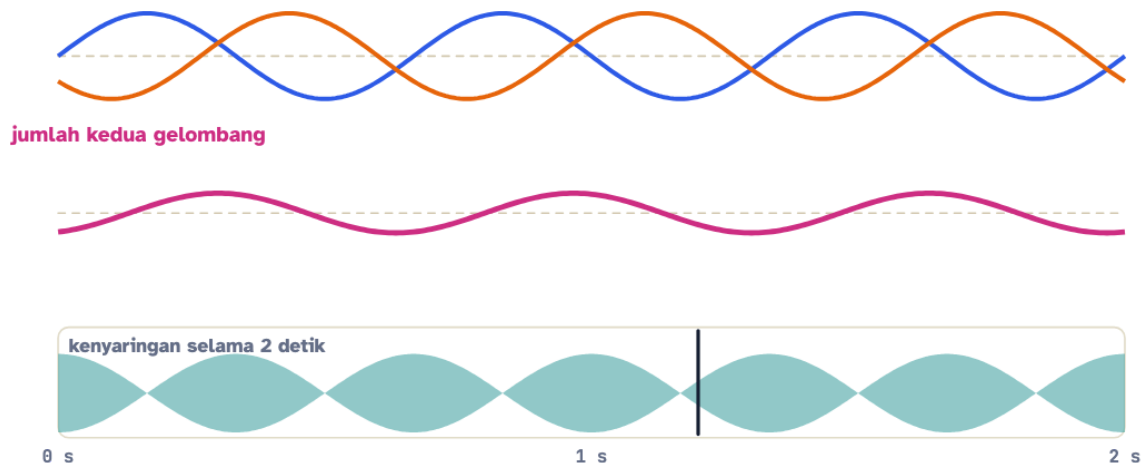
Jika dua sumber bunyi dengan frekuensi yang **hampir sama** berbunyi bersamaan, keduanya bergantian sefase (saling menguatkan) dan berlawanan fase (saling melemahkan). Kenyaringannya naik-turun berirama: "uwung... uwung...". Ini disebut **layangan** (*beats*), dan banyaknya denyut tiap detik adalah:

$$f_L = |f_1 - f_2|$$

LAB MINI Dua garpu tala: dengar layangannya

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-19

Tampilan "strobe": gelombang 1 dibekukan, gelombang 2 bergeser perlahan



Layangan $|f_1 - f_2|$
3 Hz

Nada terdengar (rata-rata)
441,5 Hz

f_2
443 Hz

Keadaan
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.

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 ($3 \rightarrow 5$), 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**.

$$f_p = \frac{v + v_p}{v - v_s} f_s$$

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

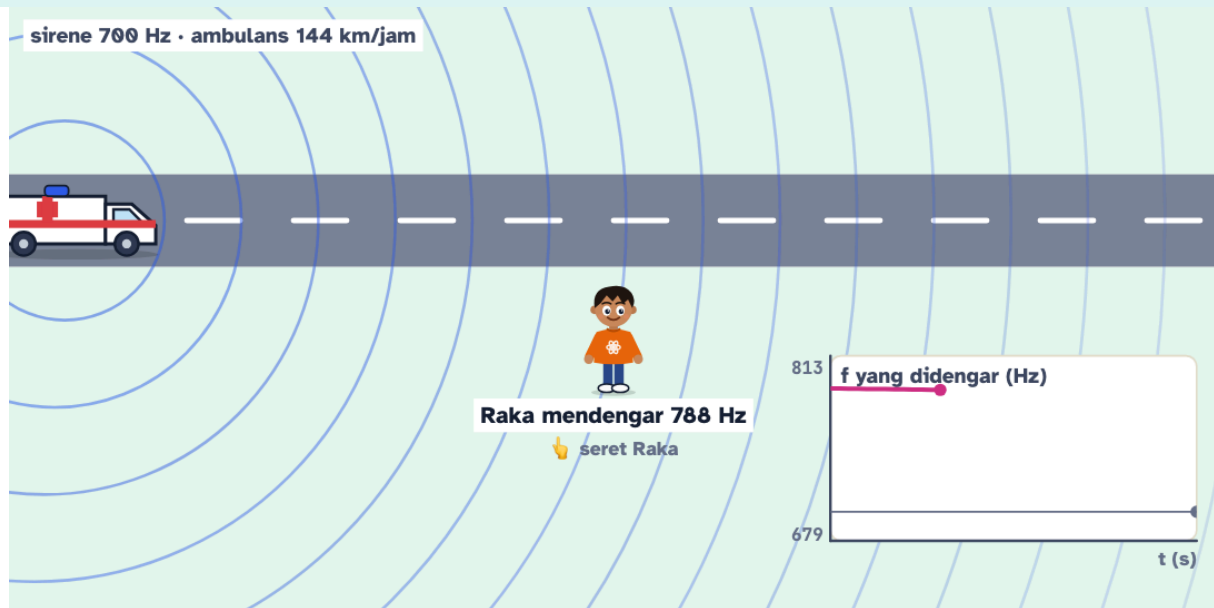
Hz

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: $\frac{\text{m/s}}{\text{m/s}} \times \text{Hz} = \text{Hz}$, 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

788 Hz

Sumber

mendekat ↑ nada tinggi

Kecepatan

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."

MITOS

"Bunyi paling cepat di udara karena udara paling ringan."

FAKTA

Selama ambulans mendekat dengan kecepatan tetap, nadanya tinggi dan **hampir tetap**.
. Yang bertambah adalah **kenyaringannya**.
. Nada turun saat ambulans lewat di depanmu.

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.

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.

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 $v - v_s$): $f_p = \frac{340}{340 - 25} \times 700 = \frac{340}{315} \times 700 \approx 756 \text{ Hz}$.

2 Menjauh: $f_p = \frac{340}{340 + 25} \times 700 = \frac{340}{365} \times 700 \approx 652 \text{ Hz}$.

Nada turun dari $\pm 756 \text{ Hz}$ ke $\pm 652 \text{ Hz}$, selisih $\pm 104 \text{ Hz}$ (lebih lebar daripada jarak nada do ke re). Itulah "lagu" ambulans: NGIIING... NGOOONG...

**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 $\Delta f \approx \frac{2u}{v}f$.

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

$$s = vt, \quad v \approx 331 + 0,6T$$

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.

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

Sore hari, kolam ikan di kampung

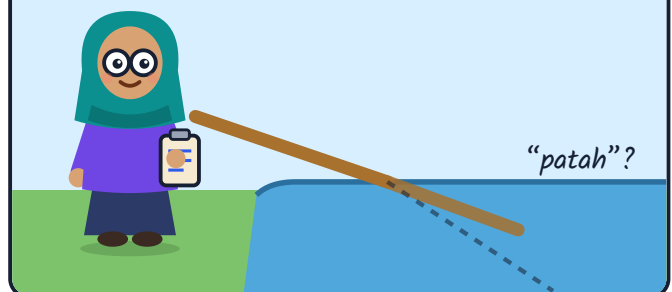
RAKA

Bolaku nyemplung! Tenang, kolamnya cetek kok, paling cuma sepaha. Aku turun ambil, ya!



SARI

Tunggu! Ukur dulu pakai galah. ...Eh, kok galahnya jadi "patah" begitu masuk air?



SARI

Tanda basahanya 120 cm! Itu setinggi dadamu, Rak!

RAKA

Lho?! Dari atas kelihatannya cuma 90 cm...

GLEK!



Kak Nara datang membawa serokan

KAK NARA

Cahaya dari dasar kolam **dibelokkan** saat keluar dari air. Hasilnya, kolam tampak cuma $\pm \frac{3}{4}$ kedalaman aslinya. Bolanya kita ambil pakai serokan saja, ya!



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: $i = r$.

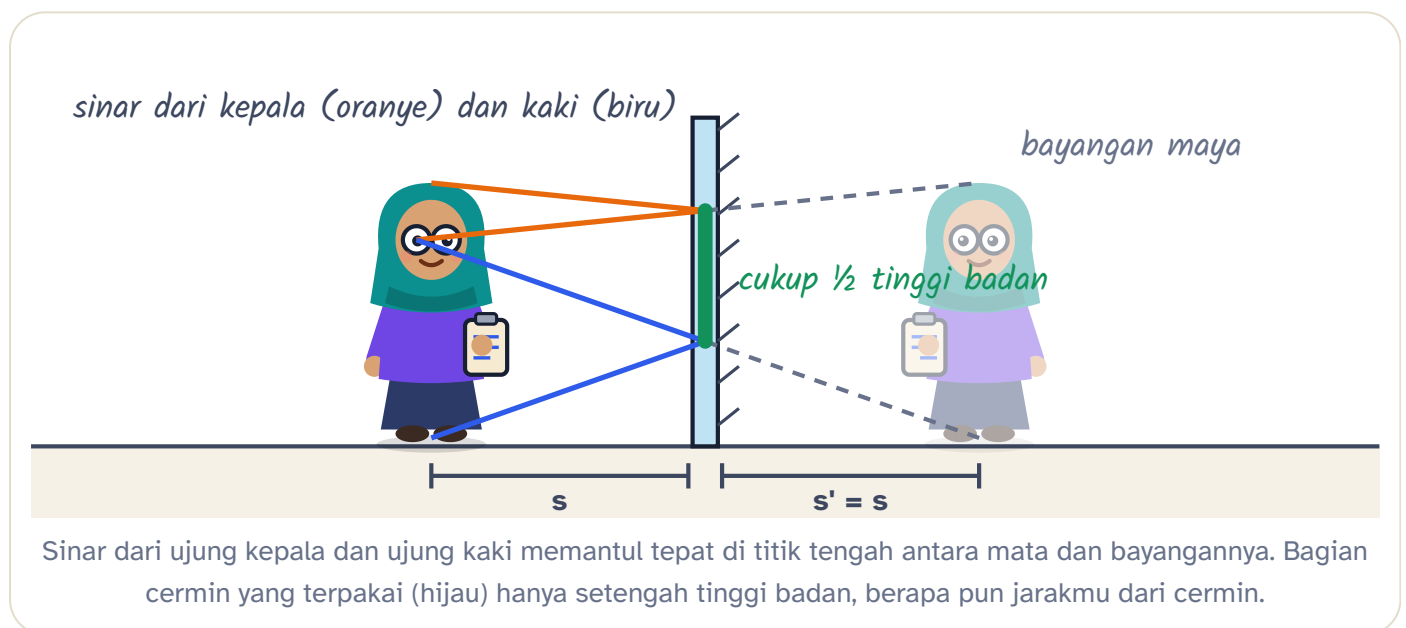
Kedua sudut diukur dari **garis normal**, yaitu garis khayal yang tegak lurus permukaan, bukan dari permukaannya. Ini jebakan favorit soal ujian!

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-sinarinya 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.





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 ($\alpha \rightarrow 0$) 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.

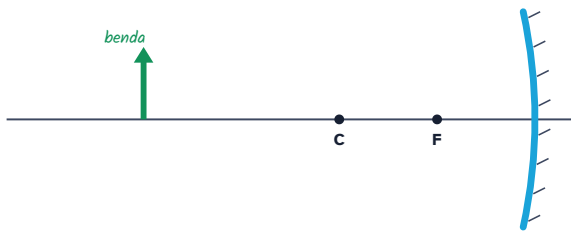
20.2 Cermin cekung dan cermin cembung

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.

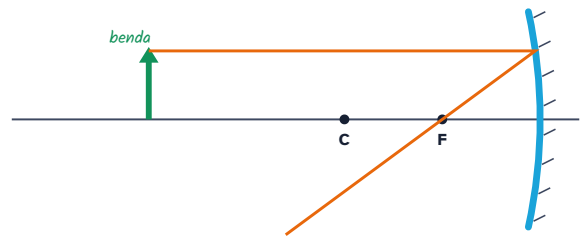
Istilah	Arti
Pusat kelengkungan C	pusat bola asal cermin; jari-jarinya R (di banyak buku ditulis titik M)
Sumbu utama	garis yang melalui C dan titik tengah cermin
Titik fokus F	titik tempat sinar-sinar sejajar sumbu utama berkumpul (cermin cekung) atau seolah-olah berasal (cermin cembung)
Jarak fokus f	jarak F ke cermin: $f = \frac{1}{2}R$

Untuk melukis bayangan, cukup pakai dua dari tiga **sinar istimewa** cermin cekung:

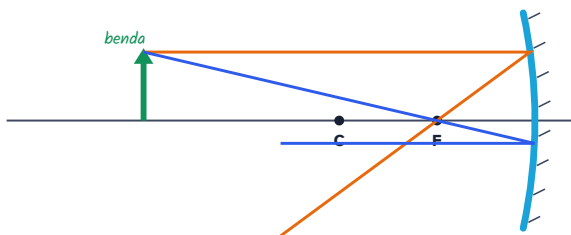
1. sinar datang **sejajar sumbu utama** dipantulkan **melalui F**;
2. sinar datang **melalui F** dipantulkan **sejajar sumbu utama**;
3. sinar datang **melalui C** dipantulkan **kembali ke jalannya semula**.



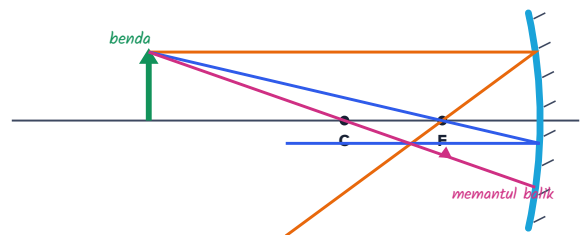
Langkah 1. Cermin cekung dengan titik fokus F dan pusat kelengkungan C . Benda berdiri lebih jauh dari C .



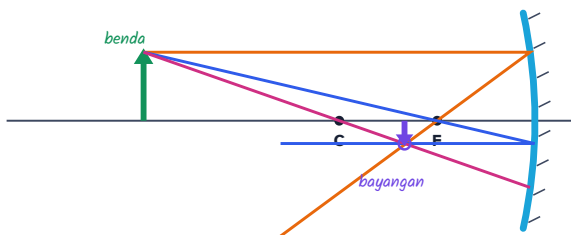
Langkah 2. Sinar 1 datang **sejajar sumbu utama**, lalu dipantulkan **melalui F** .



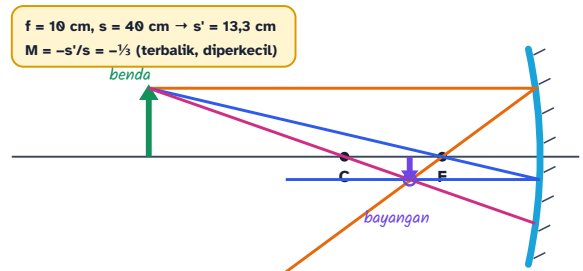
Langkah 3. Sinar 2 datang **melalui F** , lalu dipantulkan **sejajar sumbu utama**.



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 $\leftrightarrow$ 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

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \implies s' = \frac{sf}{s - f}$$

Dekatkan benda ke titik fokus, bayangannya kabur menjauh. Lewati fokus, bayangannya melompat ke sisi lain dan menjadi maya. Geser f ke nilai negatif untuk cermin cembung atau lensa cekung: bayangannya selalu maya, tegak, dan diperkecil.

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-LENDA

**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

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.

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-sinarinya 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 ($\pm$)	Laju cahaya
ruang hampa / udara	1,00	300.000 km/s
es	1,31	229.000 km/s
air	1,33 ($\approx 4/3$)	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 $\rightarrow$ air): sinar **mendekati** normal.
- Dari medium lebih rapat ke kurang rapat (air $\rightarrow$ udara): sinar **menjauhi** normal.
- Sinar yang datang tegak lurus ($\theta_1 = 0$) tidak berbelok, walaupun lajunya tetap berubah.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

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 $45^\circ \rightarrow$ sudut bias $32,1^\circ$. 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 terang. Untuk pengamatan hampir tegak lurus dari atas:

$$h' = h \frac{n_{\text{pengamat}}}{n_{\text{benda}}},$$

sehingga jika dilihat dari udara, $h' = h/n_{\text{air}}$.

$$h' = \frac{h}{n}$$

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?

$$1 \quad h' = \frac{h}{n} = \frac{2,0}{4/3} = 2,0 \times \frac{3}{4}$$

$$2 \quad h' = 1,5 \text{ m.}$$

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

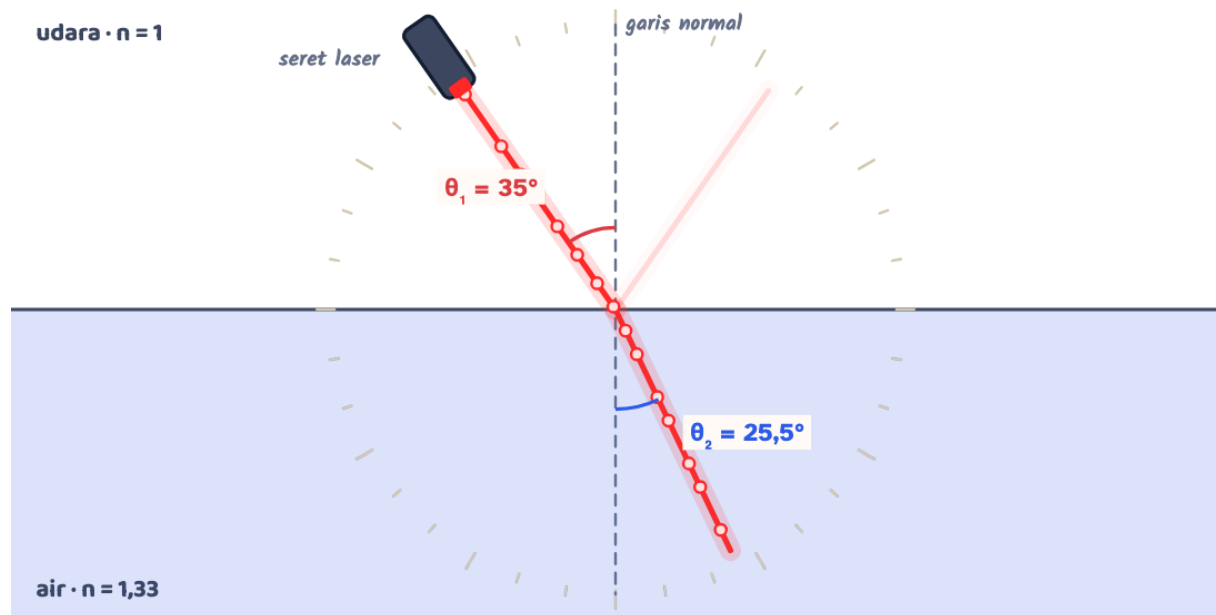
Saat cahaya keluar dari medium rapat ke medium renggang (misalnya dari air ke udara), sinar bias menjauhi normal. Jika sudut datang diperbesar, sinar bias makin miring. Pada satu sudut tertentu, sinar bias tepat menyusur permukaan ($\theta_2 = 90^\circ$). Sudut ini disebut **sudut kritis** θ_c :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2).$$

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 ($\pm$)
air $\rightarrow$ udara	49°
kaca $\rightarrow$ udara	42°
intan $\rightarrow$ 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.



Sudut datang
35 °

Sudut bias
25,5°

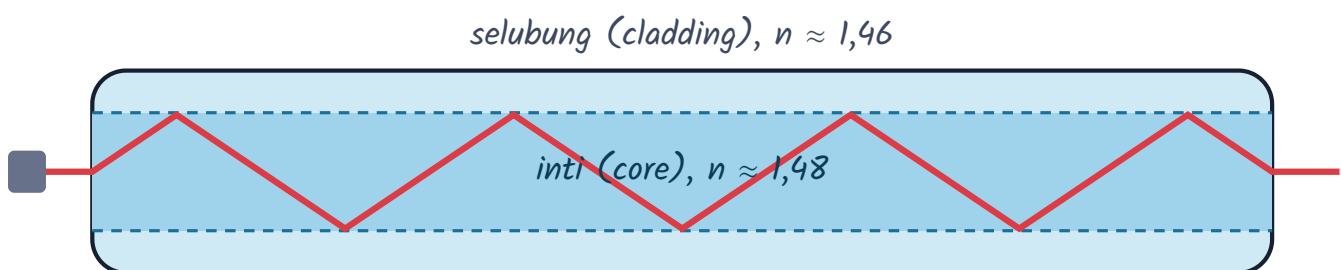
Sudut kritis
tidak ada ($n_1 \leq n_2$)

Dipantulkan
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.



sudut datang di dinding inti > sudut kritis → dipantulkan total

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: MEJIKUHBINIU

Urutan warna pelangi dari yang paling sedikit dibelokkan: **Merah, Jingga, Kuning, Hijau, Biru, Nila, Ungu**. 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 ($\beta = 60^\circ$) memiliki indeks bias 1,50. Berapa sudut deviasi minimumnya?

1 $\sin \frac{1}{2}(60^\circ + D_{\min}) = n \sin 30^\circ$, yaitu $1,50 \times 0,5 = 0,75$.

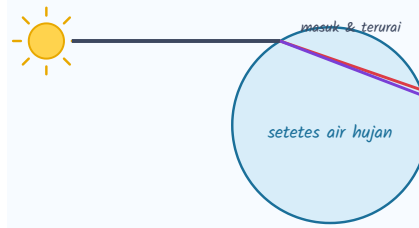
2 $\frac{1}{2}(60^\circ + D_{\min}) = \arcsin 0,75 \approx 48,6^\circ$.

3 $D_{\min} = 2 \times 48,6^\circ - 60^\circ \approx 37,2^\circ$.

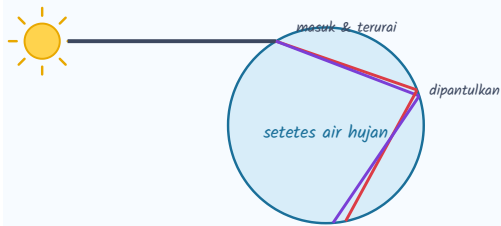
Sinar dibelokkan sekitar 37° . Rumus prisma tipis $(n - 1)\beta = 30^\circ$ meleset cukup jauh, karena 60° jelas bukan sudut "tipis".



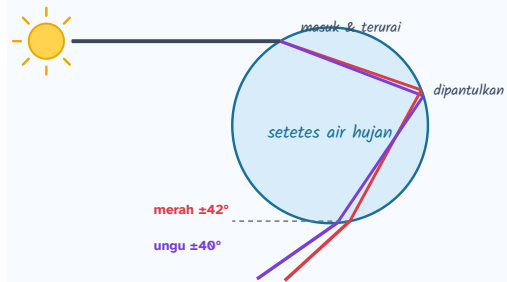
Langkah 1. Sinar Matahari (putih) menuju setetes air hujan yang bulat.



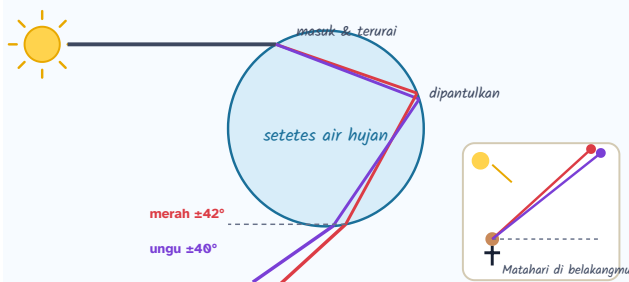
Langkah 2. Saat masuk, cahaya dibiaskan. Ungu dibelokkan sedikit lebih kuat daripada merah, sehingga warna mulai terurai (pemisahan di gambar dilebihkan agar terlihat).



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:

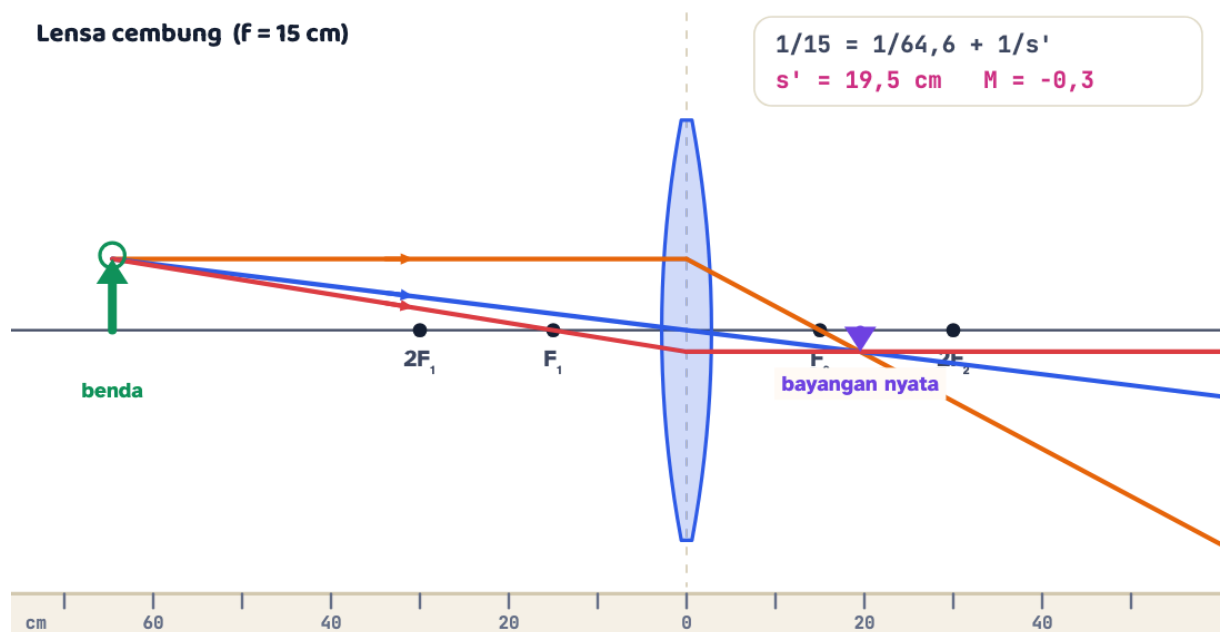
1. sinar **sejajar sumbu utama** dibiaskan **melalui** F_2 (lensa cembung) atau seolah-olah **berasal dari** F_1 (lensa cekung);
2. sinar **melalui pusat optik** lensa diteruskan **tanpa dibelokkan**;
3. sinar yang **melalui** F_1 (lensa cembung) atau yang arahnya **menuju** F_2 (lensa cekung) dibiaskan **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

Lensa cembung ($f = 15 \text{ cm}$)



Jarak benda s
64,6 cm

Jarak bayangan s'
19,5 cm

Perbesaran M
-0,3

Sifat bayangan
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: $P_{\text{gabungan}} = P_1 + P_2$.

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 $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{8} + \frac{1}{400} = \frac{50+1}{400} = \frac{51}{400}$, jadi $f = 400/51 \approx 7,84$ cm.

Gambar diletakkan 8 cm dari lensa cembung berfokus $\pm 7,8$ 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 silier 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.

Miopi (rabun jauh, "mata minus")	PR terbatas, papan tulis kabur	di depan retina	lensa cekung (-)	$P = -\frac{100}{PR \text{ (cm)}}$
Hipermetropi (rabun dekat, "mata plus")	PP > 25 cm, buku kabur	di belakang retina	lensa cembung (+)	$P = 4 - \frac{100}{PP \text{ (cm)}}$
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

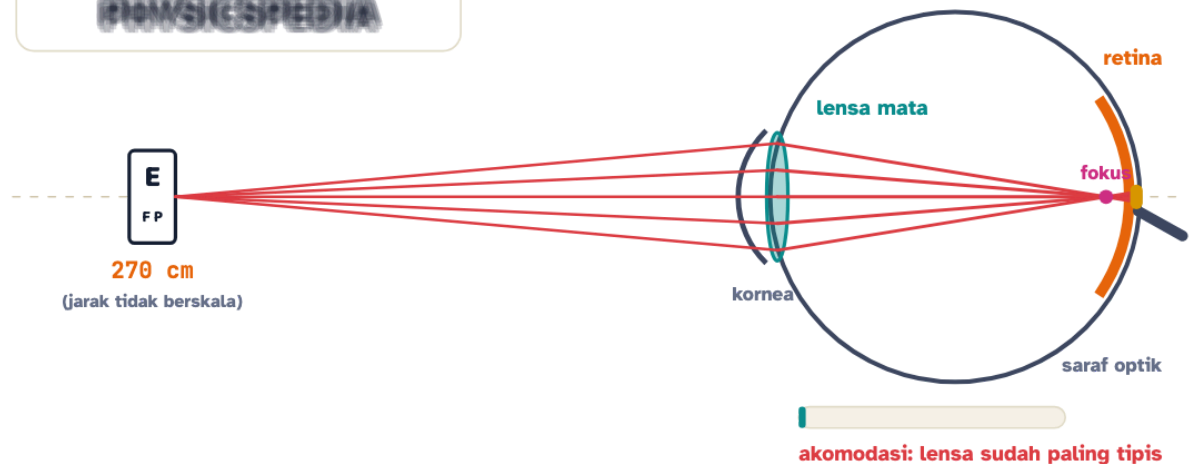
Klinik mata Tarsi: periksa, lalu pasang kacamata

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-20

Yang dilihat tanpa kacamata:

PHYSICSPEDIA

X Kabur



Titik dekat
17 cm

Titik jauh
50 cm

Bayangan jatuh
di depan retina (kabur)

Resep disarankan
-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?

$$P = -\frac{100}{PR}$$

Makin dekat titik jauh matamu, makin besar minus kacamata.

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: $1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$. Angka 100 muncul karena PR ditulis dalam cm.

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

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 $f = -2 \text{ m}$.

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: $s = 25 \text{ cm}$, $s' = -100 \text{ cm}$.
- 2 $\frac{1}{f} = \frac{1}{25} + \frac{1}{-100} = \frac{4-1}{100} = \frac{3}{100}$, jadi $f = 33,3 \text{ cm}$.
- 3 $P = 100/33,3 = +3$ dioptri. Hasilnya sama dengan rumus cepat $P = 4 - 100/PP$, 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. Periksa mata 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:

$$M_{\text{santai}} = \frac{25}{f}, \quad M_{\text{maks}} = \frac{25}{f} + 1,$$

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 $M = \frac{f_{\text{ob}}}{f_{\text{ok}}} = \frac{100}{5} = 20$ 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 biasanya...

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

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"? Gambarkan 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

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \Rightarrow s' = \frac{sf}{s - f}$$

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.

$$P = -\frac{100}{PR}$$

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 sabunya 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.

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

Jam istirahat, halaman sekolah

RAKA

Lihat! Gelembungku warna-warni kayak pelangi!



SARI

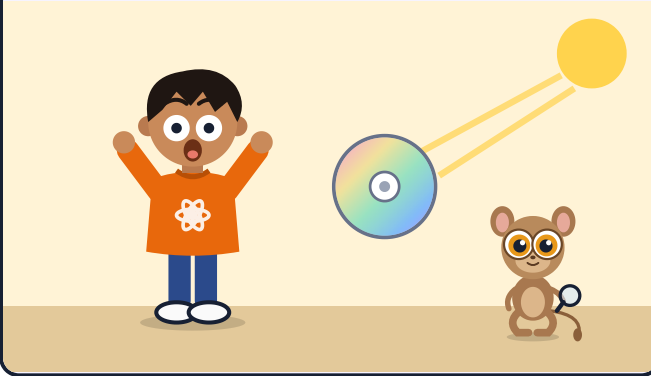
Aneh. Air sabunnya bening, sama sekali nggak ada pewarnanya. Prisma juga nggak ada. Warnanya dari mana?



BLING!

RAKA

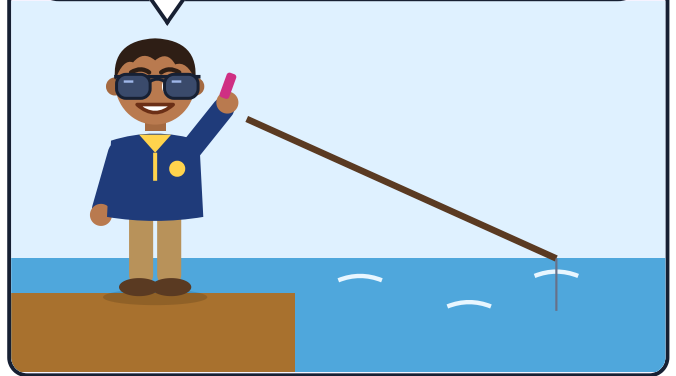
CD bekas Bapak juga ada pelanginya!
Padahal permukaannya cuma plastik mengilap.



Kak Nara memakai kacamata pemancing

KAK NARA

Tidak ada cat di sana. Warna itu lahir dari gelombang cahaya yang **saling menguatkan** dan **saling meniadakan**. Kacamata polaroidku juga memanfaatkan sifat gelombang cahaya!



Tebak Dulu!

Sinar laser merah ditembakkan ke selembur 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?

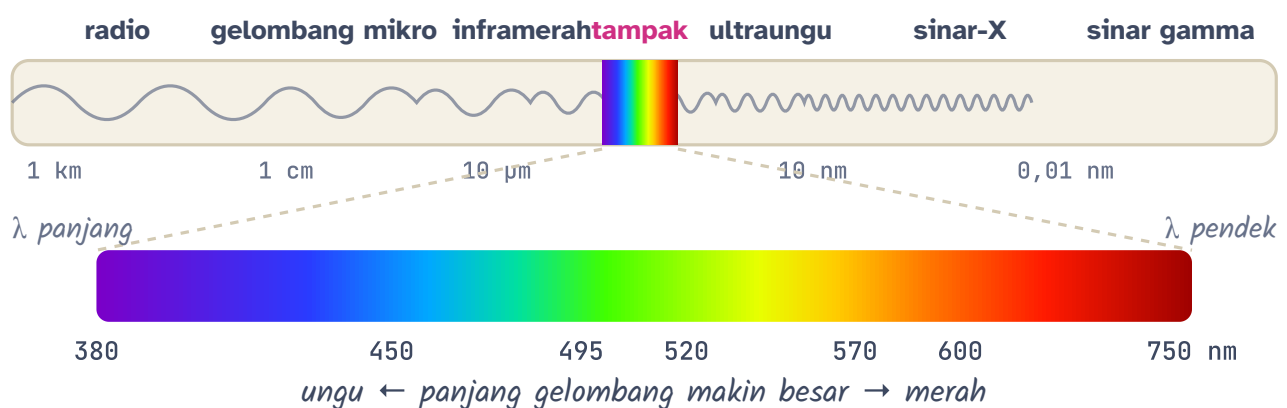
Pada akhir abad ke-17, dua raksasa sains berbeda pendapat. **Isaac Newton** berpendapat cahaya adalah aliran butiran sangat kecil (teori *korpuskular*). Butiran melesat lurus, memantul seperti bola, dan cocok menjelaskan bayangan yang tajam. **Christiaan Huygens** dari Belanda (1678) berpendapat cahaya 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.



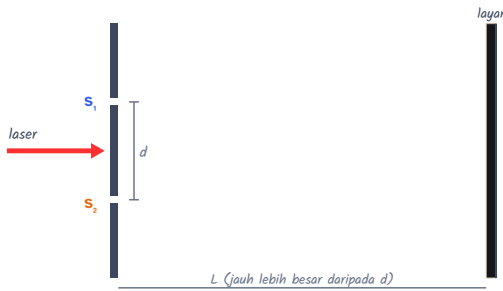
Dari gambar itu dapat diturunkan $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$, yaitu hukum Snell! Perhatikan juga bahwa muka gelombang di kaca lebih rapat: **panjang gelombang memendek** menjadi λ/n , sedangkan **frekuensinya tetap**.

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).

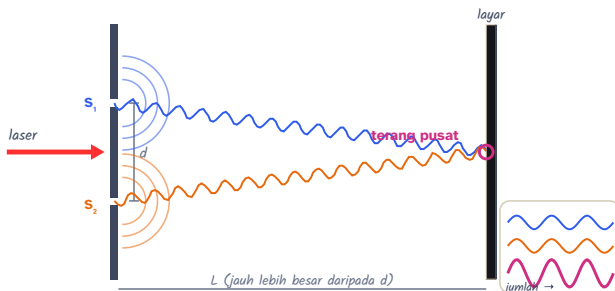
Syaratnya, kedua sumber harus **koheren**: frekuensinya sama dan beda fasenya tetap. Dua senter biasa tidak koheren, karena cahayanya terdiri atas jutaan "paket" gelombang yang fasenya berubah acak triliunan kali per detik, sehingga polanya berganti terlalu cepat untuk dilihat. Akal Young: ambil **satu** sumber cahaya, lalu belah menjadi dua dengan dua celah. Kedua celah lalu bergetar serempak.



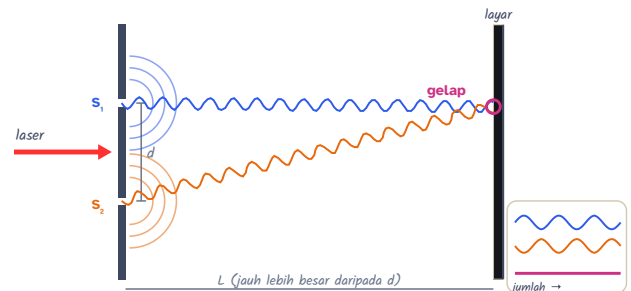
Langkah 1. Laser menyinari penghalang yang memiliki dua celah sempit S_1 dan S_2 berjarak d . Layar diletakkan sejauh L .



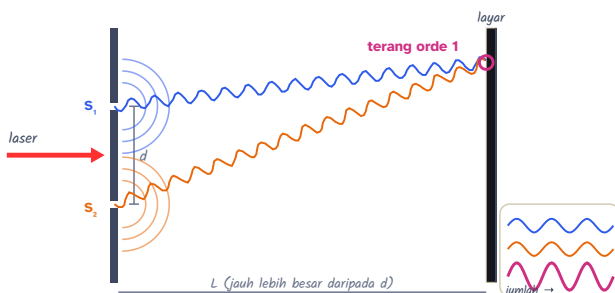
Langkah 2. Menurut Huygens, tiap celah menjadi sumber gelombang baru. Karena berasal dari laser yang sama, keduanya bergetar serempak (koheren).



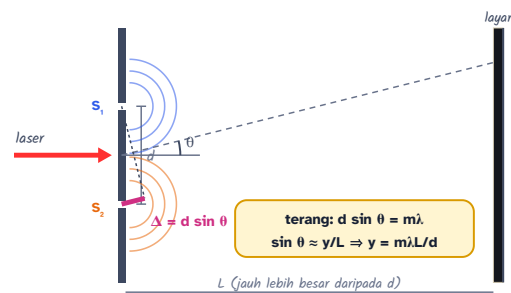
Langkah 3. Titik tengah layar berjarak **sama** dari kedua celah. Puncak bertemu puncak, sehingga terbentuk terang pusat. Kotak kecil menunjukkan gelombang biru + oranye = gelombang ungu yang besar.



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 sesungguhnya, 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	$d \sin \theta = m\lambda$	$y_m = \frac{m\lambda L}{d}$, dengan $m = 0, 1, 2, \dots$
gelap ke- m	$d \sin \theta = (m - \frac{1}{2})\lambda$	$y = \frac{(m - \frac{1}{2})\lambda L}{d}$, dengan $m = 1, 2, \dots$

Jarak antara dua pita terang yang berdekatan (atau dua pita gelap yang berdekatan) disebut **lebar pita** Δy :

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d}$$

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

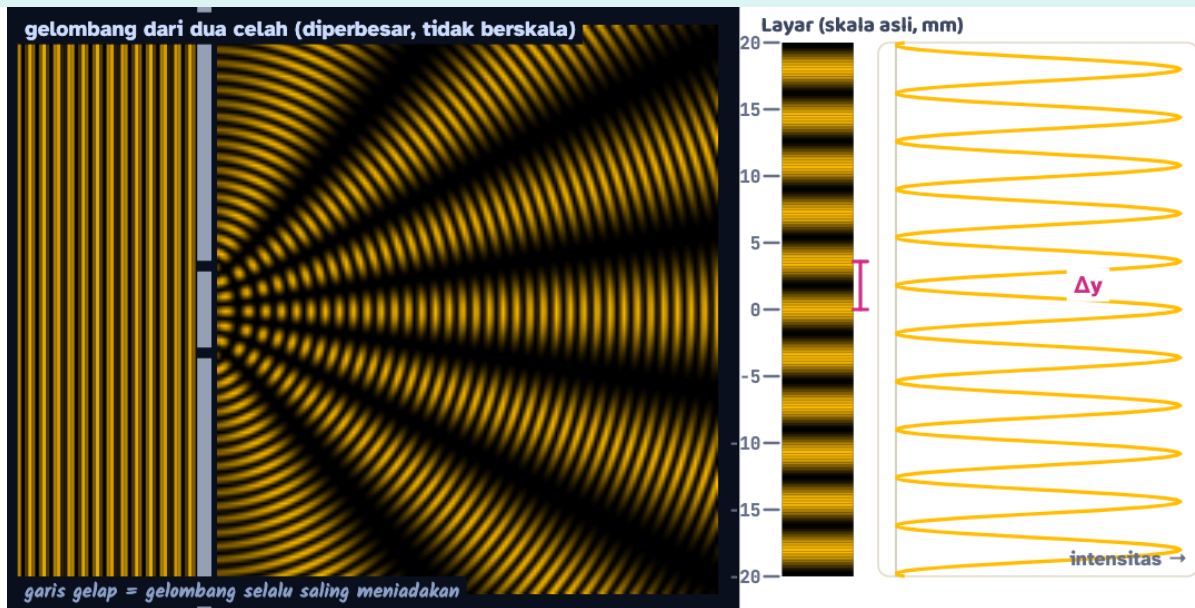
Cahaya **600** nm, layar **1,5** m, celah berjarak **0,3** mm → pita terang berulang setiap **3** mm.

Cek satuan: $\frac{\text{m} \cdot \text{m}}{\text{m}} = \text{m}$. Hati-hati: ubah nm dan mm ke meter dulu!

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-YOUNG-PITA](https://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
3,6 mm

Warna
jingga (600 nm)

Di titik yang diklik
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.

$$2 \quad \Delta y = \frac{\lambda L}{d} = \frac{(600 \times 10^{-9})(1,5)}{0,30 \times 10^{-3}}.$$

$$3 \quad \Delta y = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

Pita terang berulang setiap 3,0 mm, cukup lebar untuk diukur dengan penggaris biasa.

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: $y_4 = \frac{4\lambda L}{d}$.

2 $\lambda = \frac{y_4 d}{4L} = \frac{(10,0 \times 10^{-3})(0,25 \times 10^{-3})}{4 \times 1,20}$.

3 $\lambda \approx 5,2 \times 10^{-7} \text{ m} = 520 \text{ nm}$.

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 $\frac{(n - 1)tL}{d}$.

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:

$$\text{terang (diperkuat): } 2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

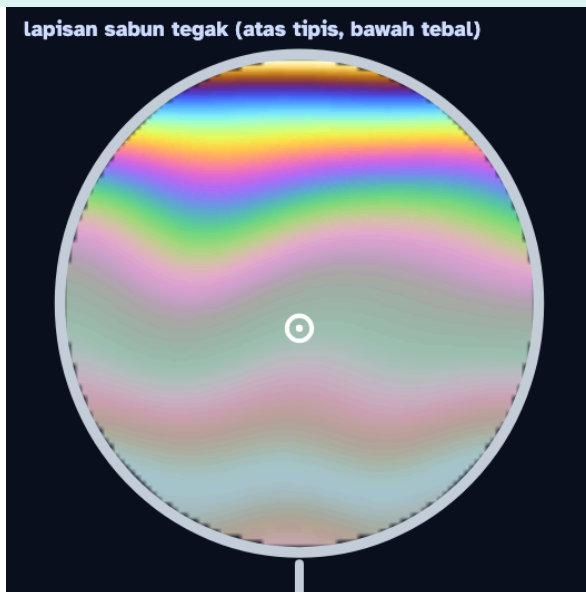
Setiap ketebalan "memilih" warna yang diperkuat. Karena tebal dinding gelembung berbeda-beda dan terus berubah saat air sabun mengalir turun, warnanya berputar-putar seperti pusaran pelangi. Menjelang pecah, bagian atas gelembung menjadi sangat tipis dan tampak **hitam**: kedua pantulan saling meniadakan untuk semua warna.

LAB MINI

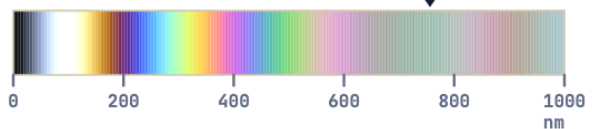
Gelembung sabun dan minyak di aspal basah

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-21

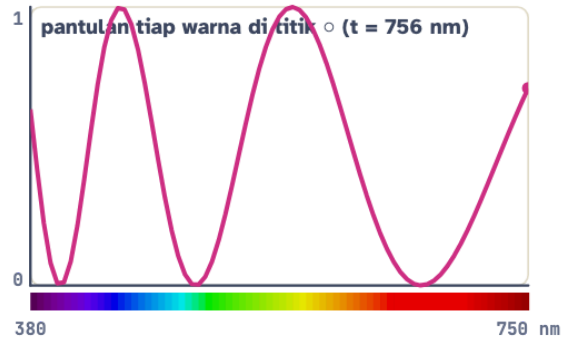
lapisan sabun tegak (atas tipis, bawah tebal)



Tebal lapisan → warna pantulan



pantulan tiap warna di titik (t = 756 nm)



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.

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. $t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{532}{4 \times 1,33} \text{ nm}$.

3. $t = 100 \text{ nm}$.

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 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

$$a \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

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 $1,6 \mu\text{m}$, sehingga CD bekerja seperti kisi berkerapatan ± 625 garis/mm. Itulah pelangi di CD bekas Raka!

$$\sin \theta = m \lambda N$$

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 °

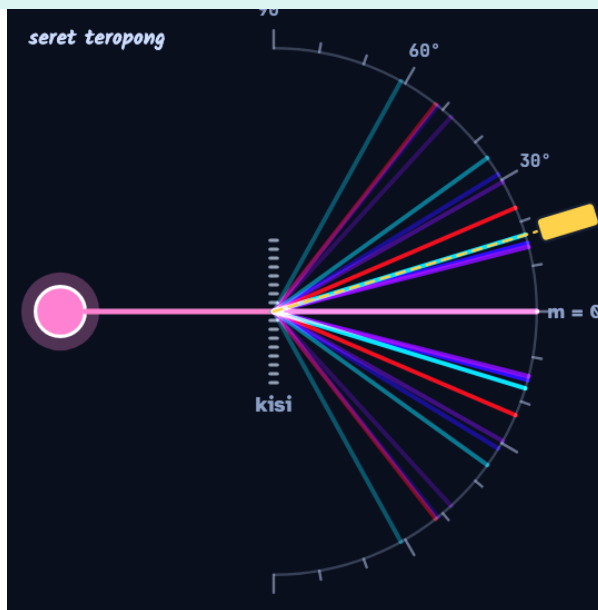
SUDUT PITA TERANG

17,5
°

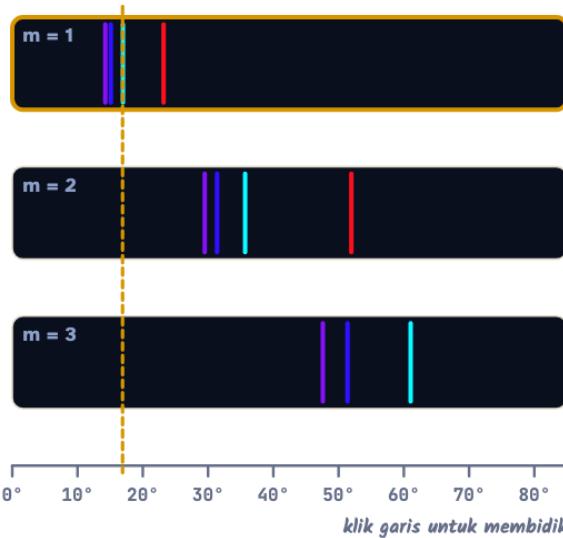
Kisi **500** garis/mm, cahaya **600** nm, orde **1** → pita terang pada sudut **17,5°**. Jika muncul '—', berarti $\sin \theta$ akan lebih dari 1: orde itu tidak ada!

Cek satuan: N dalam garis/mm diubah menjadi garis/m ($\times 1000$), dan λ dalam meter, sehingga $m\lambda N$ tidak bersatuan.

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



Yang tampak di teropong, per orde



Jarak celah d
1,667 μm

$\lambda = d \sin \theta / m$
484,5 nm

Di teropong

✓ **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!

CD bekerja seperti kisi 625 garis/mm. Laser merah 650 nm disorotkan tegak lurus ke CD. Pada sudut berapa saja pita terang muncul?

1 $d = \frac{1}{625} \text{ mm} = 1,6 \text{ } \mu\text{m} = 1600 \text{ nm.}$

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 ($0,74 \text{ } \mu\text{m}$) 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 , $\theta \approx x/L$.

$$L_{\text{maks}} = \frac{x D}{1,22 \lambda}$$

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](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-DAYA-URAI)

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?

$$1 \quad \theta_{\min} = 1,22 \times \frac{550 \times 10^{-9}}{5 \times 10^{-3}} \approx 1,34 \times 10^{-4} \text{ rad.}$$

$$2 \quad L = \frac{x}{\theta_{\min}} = \frac{1,5}{1,34 \times 10^{-4}} \approx 11.000 \text{ m.}$$

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 $I = I_0 \cos^2 \theta$.

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Searah (0°): lolos semua. Miring 45° : lolos setengahnya. Tegak lurus (90°): padam.

 I_0 Intensitas cahaya terpolarisasi W/m^2 θ Sudut antarsumbu $^\circ$ I Intensitas yang lolos W/m^2

INTENSITAS YANG LOLOS

100 W/m^2

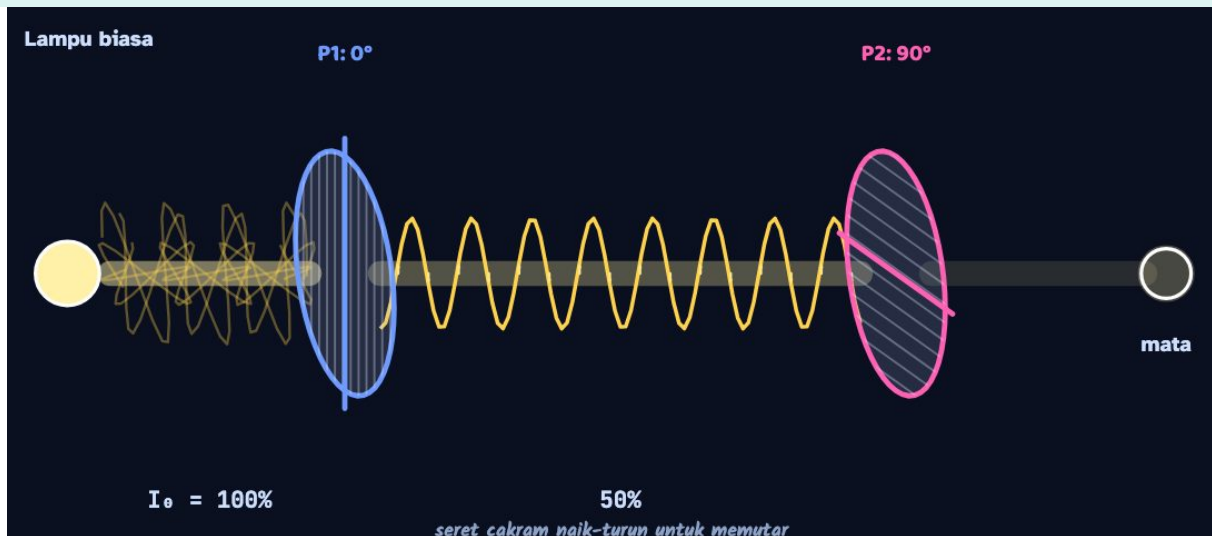
Cahaya **400** W/m^2 menembus analisator yang miring **60°** → tersisa **100** W/m^2 .

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](https://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
50 %

Setelah tengah
– (tidak dipasang)

Sampai ke mata
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."

MITOS

"Menambah polarisator di antara dua polarisator bersilang pasti tetap gelap."

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, kacamataanya polaroid.

FAKTA

Justru menjadi terang lagi! Polarisor tengah bersudut 45° "memutar" arah getaran sedikit demi sedikit:

$$\frac{1}{2}I_0 \cdot \cos^2 45^\circ \cdot \cos^2 45^\circ = \frac{1}{8}I_0$$

. Polarisor tidak hanya menyaring, tetapi juga menentukan arah getaran baru.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MEMUTAR POLARISASI HAMPIR TANPA KEHILANGAN

Gunakan N polarisor yang sumbunya berturut-turut diputar $90^\circ/N$. Cahaya terpolarisasi yang melewatinya keluar dengan arah getaran yang berputar 90° dan intensitas $I = I_0 \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{2N}\right) \right]^N$. Untuk N besar, $\cos^2 x \approx 1 - x^2$, sehingga $I \approx I_0 \left(1 - \frac{\pi^2}{4N}\right) \rightarrow I_0$. 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 polarisor. 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.

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.

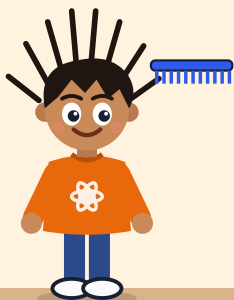
RAMBUT LANDAK & ANGKOT YANG MENGGIGIT

KOMIK • 4 PANEL

Pagi, sebelum berangkat sekolah

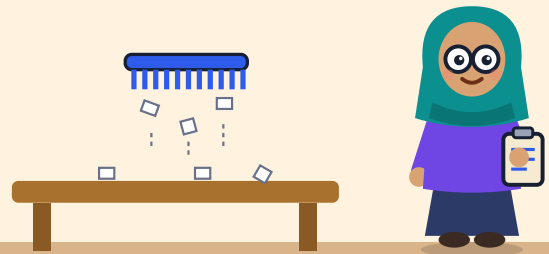
RAKA

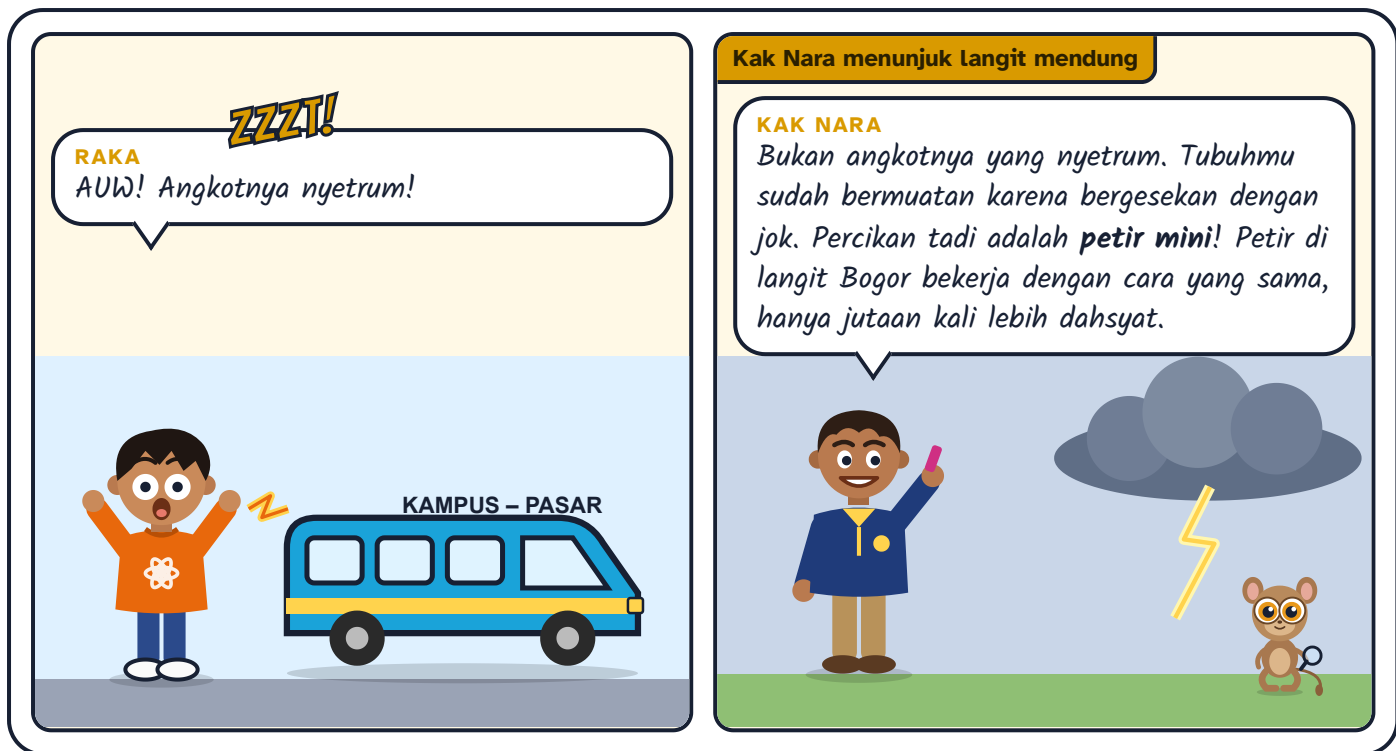
Lihat, rambutku jadi landak gara-gara disisir! Kok bisa berdiri sendiri?



SARI

Sisirmu juga bisa menarik sobekan kertas ini, tanpa menyentuh sama sekali! Gaya apa ini?





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 $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$: $q = ne$. 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 $+5 \text{ nC}$.

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
0 satuan

Muatan rambut
0 satuan

Muatan elektroskop
0 satuan

Daun elektroskop
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 ($1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$). Berapa banyak elektron yang berpindah ke balon?

$$1 \quad n = \frac{|q|}{e} = \frac{8 \times 10^{-9}}{1,6 \times 10^{-19}}$$

$$2 \quad n = 5 \times 10^{10} \text{ elektron.}$$

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:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2.$$

Rumus ini bercerita: gaya sebanding dengan hasil kali kedua muatan, dan berbanding terbalik dengan **kuadrat** jaraknya. Jarak dijadikan dua kali, gaya tinggal seperempat. $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$ 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** $\text{cm} \rightarrow F = \text{-5,4 N}$. Tanda + berarti tolak-menolak, tanda – berarti tarik-menarik.

Satuan Nusantara: $\approx 5,4 \times \text{berat apel kecil } (\pm 100 \text{ g}) \cdot \approx 2\%$ dari berat karung beras 25 kg

Cek satuan: $\frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{\text{C} \cdot \text{C}}{\text{m}^2} = \text{N}$. Ubah μC ke C dan cm ke m dulu!

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

Muatan $q_A = +2 \mu\text{C}$ di $x = 0$, $q_B = -3 \mu\text{C}$ di $x = 30 \text{ cm}$, dan $q_C = +1 \mu\text{C}$ di $x = 60 \text{ cm}$. Berapa gaya total pada q_C ?

1 Gaya A pada C (tolak, ke kanan): $F_{AC} = \frac{9 \times 10^9 \cdot 2 \times 10^{-6} \cdot 1 \times 10^{-6}}{0,6^2} = 0,05 \text{ N}.$

2 Gaya B pada C (tarik, ke kiri): $F_{BC} = \frac{9 \times 10^9 \cdot 3 \times 10^{-6} \cdot 1 \times 10^{-6}}{0,3^2} = 0,30 \text{ N}.$

3 Ambil kanan positif: $\Sigma F = 0,05 - 0,30 = -0,25 \text{ N}.$

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:

$$E = \frac{F}{q_{\text{uji}}}, \quad E = k \frac{q}{r^2} \text{ untuk muatan titik.}$$

Satuannya N/C (sama dengan V/m). Arah medan adalah arah gaya pada muatan uji **positif**: menjauhi muatan positif dan menuju muatan negatif.

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

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 $1 \mu\text{C}$ di sana akan merasakan gaya 9.000×10^{-6} N.

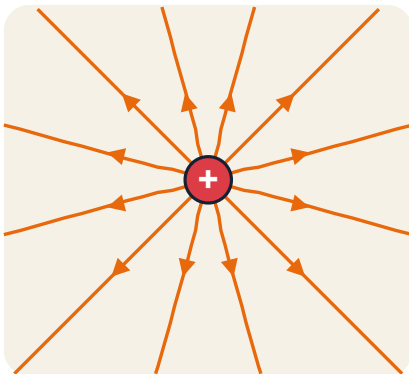
Cek satuan: $\text{N/C} = \text{V/m}$. Udara kering mulai 'bobol' (terjadi percikan) pada medan sekitar $3 \times 10^6 \text{ V/m}$.

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

Faraday menggambarkan medan dengan **garis gaya** (garis medan):

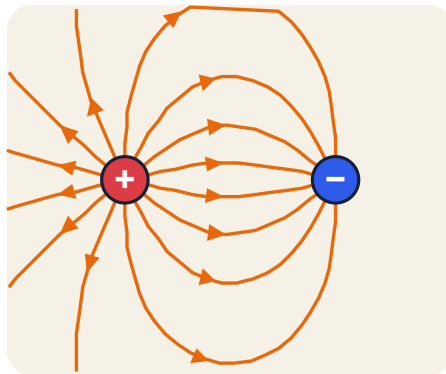
- garis keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif;
- arah garis di suatu titik adalah arah medan di titik itu;
- makin rapat garisnya, makin kuat medannya;
- garis medan tidak pernah berpotongan.

(a) satu muatan +



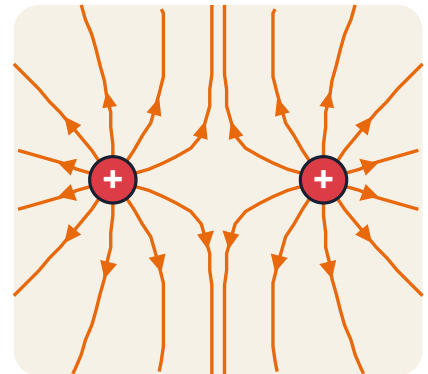
menyebar ke segala arah

(b) dipol: + dan -



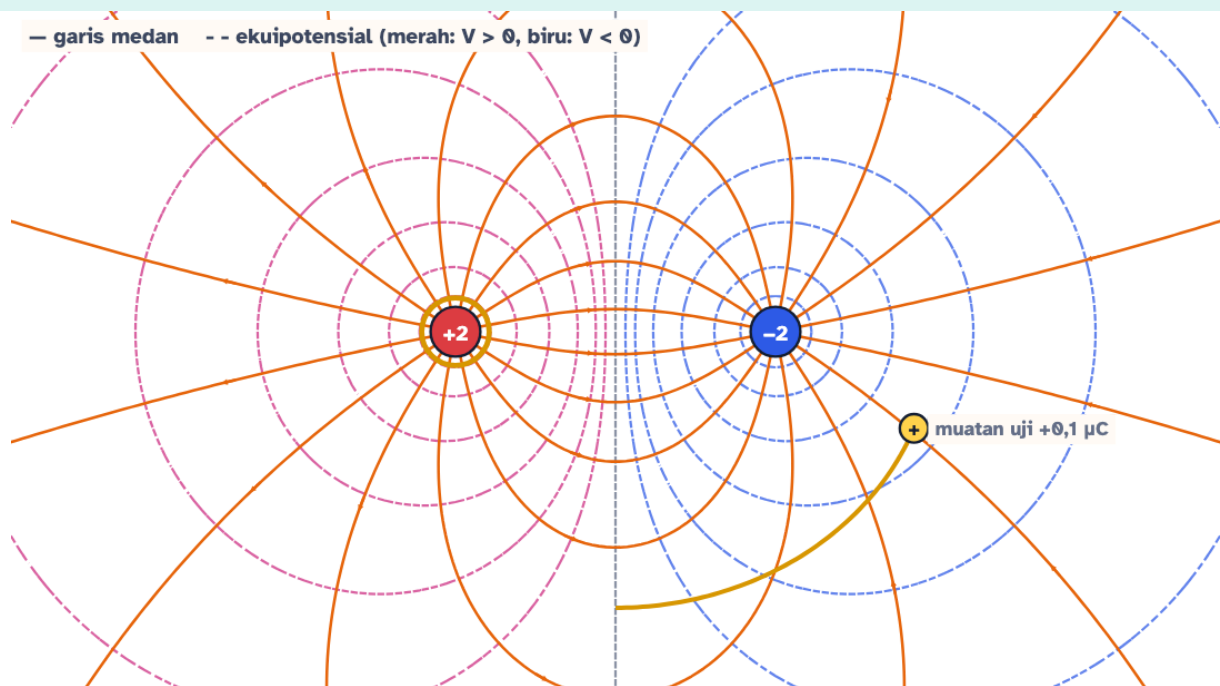
dari + menuju -

(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.



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 **ekuipotensi**al. Lalu seret **muatan uji** kuning ke suatu tempat dan tekan **Jalankan**. Apakah ia selalu bergerak tepat mengikuti garis medan?

Muatan $+4 \mu\text{C}$ dan $+1 \mu\text{C}$ 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 $k \frac{4}{x^2} = k \frac{1}{(30-x)^2} \Rightarrow \frac{30-x}{x} = \frac{1}{2}$.
- 3 $60 - 2x = x \Rightarrow x = 20 \text{ cm}$.

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 memutarinya 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

$$\Phi = \oint E \cdot dA = \frac{Q_{\text{dalam}}}{\epsilon_0}.$$

Dengan memilih permukaan yang simetris, medan berbagai benda bisa dihitung dalam satu baris.

Bola bermuatan Q (di luar bola): $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, seolah semua muatan terkumpul di pusat. Di dalam

kulit bola: $E = 0$. **Kawat panjang** bermuatan λ per meter: $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$. **Bidang luas** bermuatan σ per m^2 : $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$, tidak bergantung jarak! Dua bidang bermuatan berlawanan (kapasitor)

menghasilkan $E = \sigma/\epsilon_0$ 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.

$$V = k \frac{q}{r}, \quad E_p = k \frac{q_1 q_2}{r}, \quad W = q \Delta V.$$

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**: $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, 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 $E_k = e \Delta V = 1000 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-16} \text{ J}.$

2 $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \times 10^{-16}}{9,11 \times 10^{-31}}}.$

3 $v \approx 1,9 \times 10^7 \text{ m/s}.$

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 :

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

Keping lebih luas dan lebih rapat menampung lebih banyak muatan. Isolator di antaranya (dielektrik) melipatgandakan kapasitasnya.

 ϵ_r

Permitivitas relatif

 A Luas keping cm^2 d

Jarak keping mm

 C

Kapasitas pF

KAPASITAS

88,5

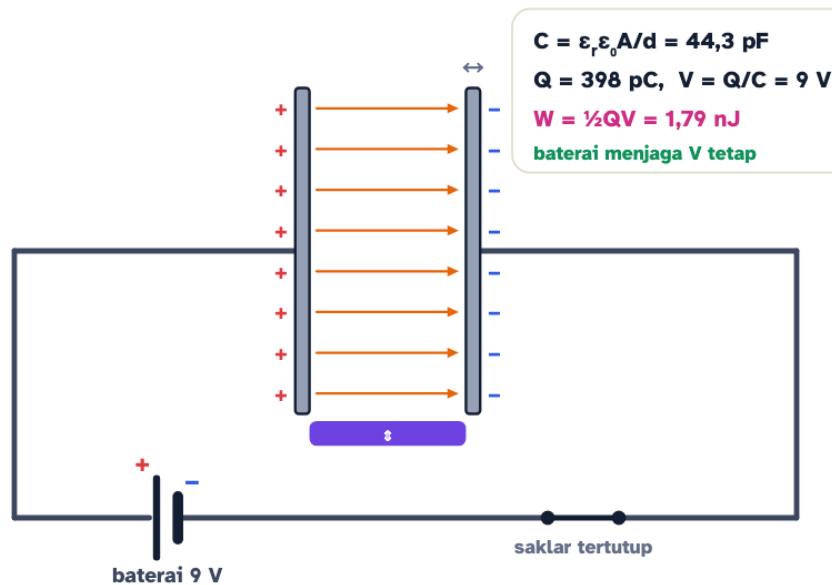
pF

Keping **100** cm^2 berjarak **1** mm dengan $\epsilon_r = 1 \rightarrow C = \mathbf{88,5}$ pF.

Cek satuan: $\frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{C}^2}{\text{N m}} = \frac{\text{C}}{\text{V}} = \text{F}.$

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



Kapasitas C
44,3 pF

Muatan Q
398 pC

Tegangan V
9 V

Medan E
2.250 V/m

Energi W
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:

$$W = \frac{1}{2} C V^2$$

Tegangan dua kali lipat, energinya empat kali lipat. Itulah sebabnya kilat lampu kamera dan alat pacu jantung memakai tegangan tinggi.

CKapasitas μF **V**Tegangan V **W**Energi tersimpan J

ENERGI TERSIMPAN

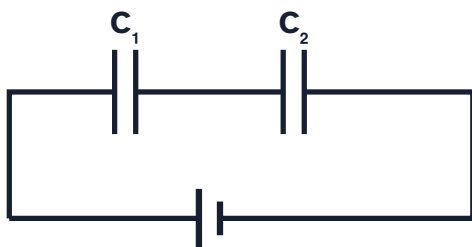
8,17**J**

Kapasitor **150** μF yang diisi sampai **330** V menyimpan **8,17** J , dan bisa melepaskannya dalam sepersekian milidetik!

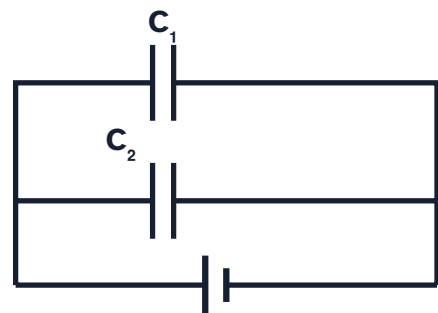
Cek satuan: $\text{F} \cdot \text{V}^2 = \frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot \text{V}^2 = \text{C V} = \text{J}$. Bentuk lain: $W = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C}$.

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

Susunan seri dan paralel



seri: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
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.

Kapasitor $3\ \mu\text{F}$ dan $6\ \mu\text{F}$ disusun seri, lalu dihubungkan ke baterai $12\ \text{V}$. Berapa kapasitas pengganti, muatan, dan tegangan pada tiap kapasitor?

1 $\frac{1}{C} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$, jadi $C = 2\ \mu\text{F}$.

2 $Q = CV = 2 \times 12 = 24\ \mu\text{C}$, sama pada kedua kapasitor (susunan seri).

3 $V_1 = Q/C_1 = 24/3 = 8\ \text{V}$ dan $V_2 = 24/6 = 4\ \text{V}$. Cek: $8 + 4 = 12\ \text{V}$. ✓

Kapasitor yang lebih kecil justru menanggung tegangan yang lebih besar. Perancang rangkaian harus memastikan tegangan ini tidak melampaui batas kapasitor.

Kapasitor defibrilator $100\ \mu\text{F}$ diisi sampai $2.000\ \text{V}$, lalu dikosongkan melalui dada pasien dalam sekitar $5\ \text{ms}$. Berapa energi yang dilepaskan dan berapa daya rata-ratanya?

1 $W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}(100 \times 10^{-6})(2000)^2 = 200\ \text{J}$.

2 $P = \frac{W}{t} = \frac{200}{5 \times 10^{-3}} = 40.000\ \text{W}$.

Energi $200\ \text{J}$ setara energi untuk mengangkat $2\ \text{kg}$ setinggi $10\ \text{m}$, tetapi dilepaskan dalam $5\ \text{ms}$ sehingga dayanya $40\ \text{kW}$, setara sekitar seratus rice cooker yang menyala bersamaan. Kejutan singkat ini dapat "mengatur ulang" irama jantung yang kacau.



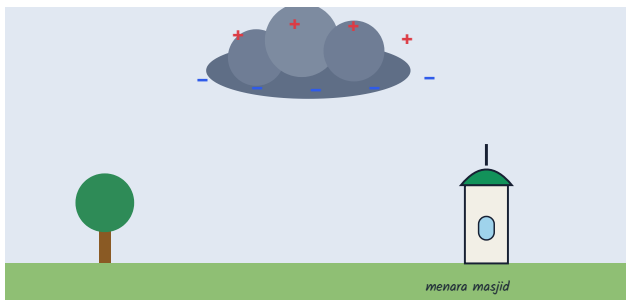
LANJUT • IB & OLIMPIADE

PENGISIAN KAPASITOR LEWAT HAMBATAN

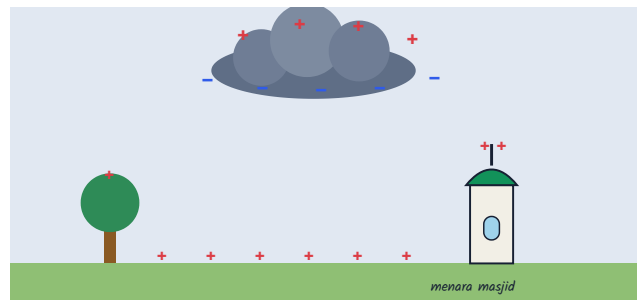
Jika kapasitor diisi lewat hambatan R , muatannya tidak langsung penuh: $Q(t) = Q_0(1 - e^{-t/RC})$. Besaran $\tau = RC$ (dalam sekon) disebut **konstanta waktu**. Setelah 1τ , kapasitor terisi 63%, dan setelah 5τ hampir penuh. Saat dikosongkan, $Q = Q_0e^{-t/RC}$. Sirkuit RC dipakai pada lampu kilat, lampu sein yang berkedip, dan penunda waktu. Kamu akan bertemu hambatan R di Bab 23.

22.7 Petir dan penangkal petir

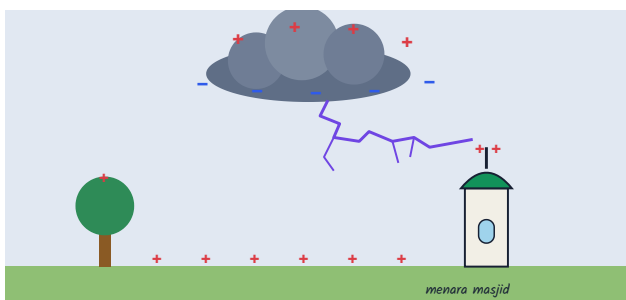
Petir adalah percikan listrik statis raksasa. Bagaimana prosesnya? Ikuti animasi berikut.



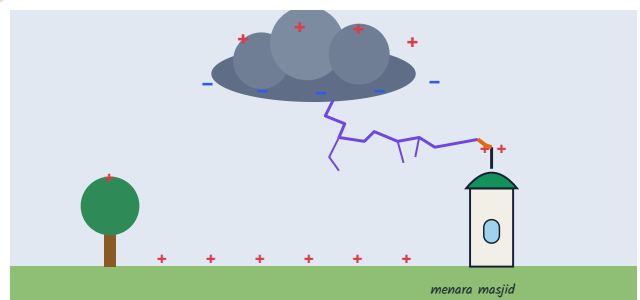
Langkah 1. Di dalam awan kumulonimbus, butiran es dan butiran es lunak (*graupel*) saling bertumbukan, sehingga muatannya terpisah. Bagian atas awan cenderung positif, dan bagian bawahnya negatif.



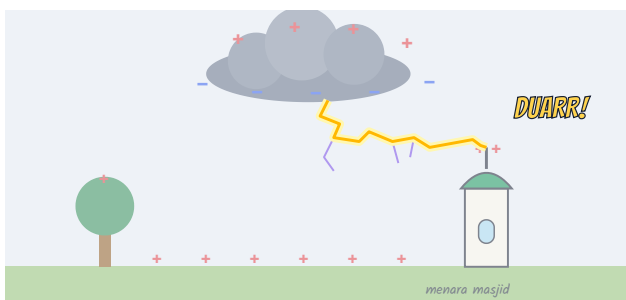
Langkah 2. Muatan negatif di dasar awan menginduksi permukaan tanah di bawahnya menjadi positif. Muatan positif paling banyak berkumpul di benda yang tinggi dan runcing, seperti pohon dan ujung penangkal petir.



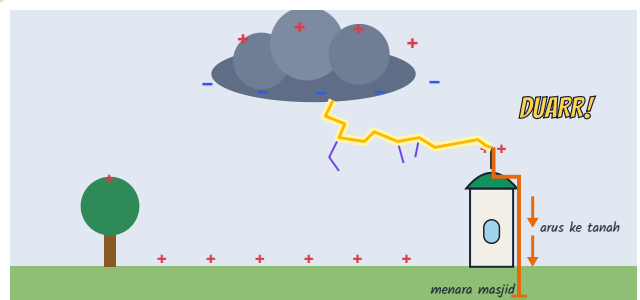
Langkah 3. Saat medannya cukup kuat, udara mulai "bobol". Lidah petir bertingkat (*stepped leader*) turun sambil bercabang, puluhan meter setiap langkah.



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 memanaskan 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."

MITOS

"Berteduh di bawah pohon saat hujan petir itu aman karena terlindung."

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.

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

$\frac{1}{3}$ kali semula

$\frac{1}{9}$ 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 $1/r^2$.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

Kapasitas kapasitor keping sejajar. Keping lebih luas dan lebih rapat menampung lebih banyak muatan. Isolator di antaranya (dielektrik) melipatgandakan kapasitasnya.

$$W = \frac{1}{2} C V^2$$

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.

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**, **sekring**, dan **kabel ground**, serta mempraktikkan aturan aman listrik.

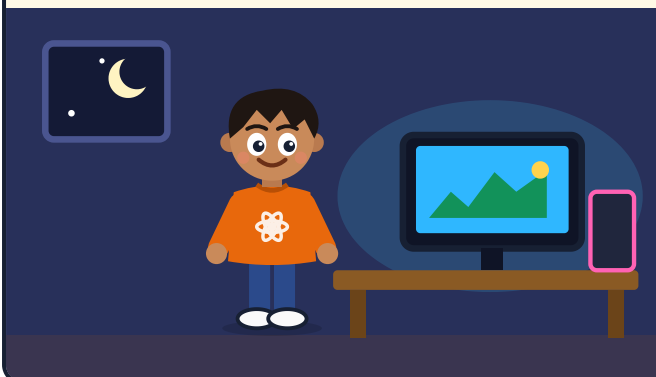
TOKEN TENGAH MALAM

KOMIK · 4 PANEL

Pukul 23.40, kamar Raka

RAKA

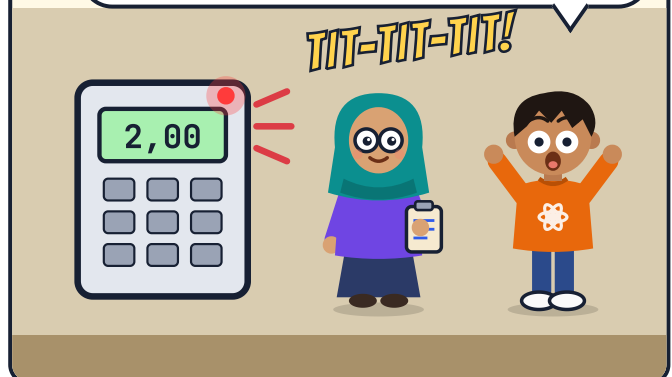
Satu ronde lagi... eh, sepuluh ronde lagi deh!
Mumpung besok libur!

**SARI**

Rak! Meteran tokennya bunyi. Sisanya
tinggal 2 kWh!

RAKA

Hah?! Masa main game bikin token
habis?



Besok paginya

KAK NARA

Komputer + monitor ± 300 W. Main 6 jam berarti 1,8 kWh. Itu setara kulkas menyala hampir dua hari!

RAKA

Jadi game-ku "makan" token...



$$\begin{aligned} 300 \text{ W} \times 6 \text{ jam} \\ &= 1.800 \text{ Wh} \\ &= 1,8 \text{ kWh} \end{aligned}$$



SARI

Berarti listrik bisa dihitung kayak uang jajan, ya?

KAK NARA

Tepat! Tapi kenalan dulu dengan arus, tegangan, dan hambatan.



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.

$$I = \frac{Q}{t}$$

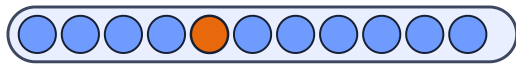
Rumus ini bercerita: *arus = banyaknya muatan yang lewat dibagi waktunya*. I adalah arus (ampere, A), Q adalah muatan (coulomb, C), dan t adalah waktu (sekon, s). Jadi 1 ampere = 1 coulomb per detik. Satu elektron hanya bermuatan $1,6 \times 10^{-19}$ C, sehingga arus 1 A berarti sekitar **6,25 miliar 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.

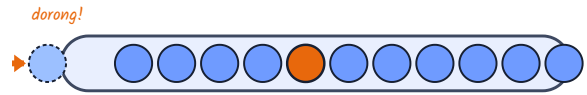
Peristiwa	Arus (kira-kira)
Lampu indikator LED kecil	0,02 A
Lampu LED 9 W di rumah (220 V)	0,04 A
Kipas angin 40 W	0,2 A
Rice cooker saat memasak (± 400 W)	1,8 A
Pengisian cepat HP (kabel USB)	2–3 A
Starter mobil dari aki	100–200 A
Sambaran petir	puluhan ribu ampere (± 30.000 A)
Arus lewat tubuh yang sudah berbahaya	$\pm 0,03$ A (30 mA)

Mengapa lampu langsung menyala?

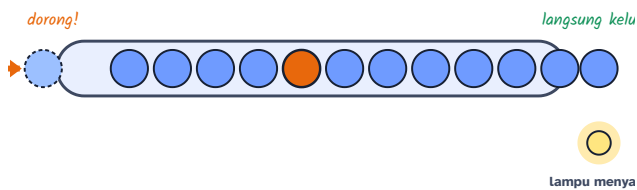
Kabel logam sudah **penuhi** elektron bebas sejak awal. Baterai atau PLN tidak "mengisi" kabel dengan elektron baru. Sumber listrik hanya **mendorong** elektron yang sudah ada. Ikuti animasinya:



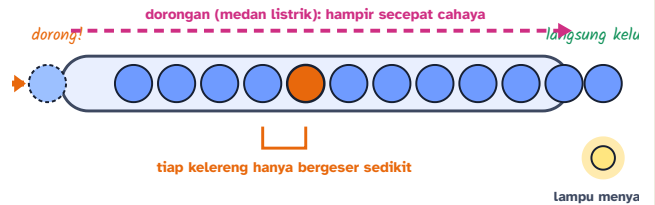
Langkah 1. Kabel ibarat pipa yang **sudah penuh** kelereng. Setiap kelereng mewakili elektron bebas. Perhatikan kelereng oranye.



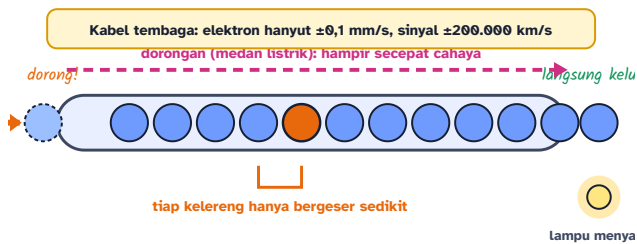
Langkah 2. Baterai (atau PLN) mendorong satu kelereng masuk dari kiri. Semua kelereng ikut bergeser bersamaan.



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: $\pm 0,1$ mm/s. Sinyal listriknya merambat $\pm 2/3$ 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.

**KECEPATAN HANYUT**

Jika dalam kabel ada n elektron bebas per m^3 , masing-masing bermuatan e , dan semuanya hanyut dengan kecepatan v_d melewati penampang A , maka $I = nev_d A$. Untuk tembaga, $n \approx 8,5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Kabel rumah 1 mm^2 yang mengalirkan 1 A memberi $v_d = \frac{1}{8,5 \times 10^{28} \cdot 1,6 \times 10^{-19} \cdot 10^{-6}} \approx 7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. 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 $1 \text{ volt} = 1 \text{ joule per coulomb}$. Baterai $1,5 \text{ V}$ memberi setiap coulomb muatan $1,5 \text{ J}$ 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**:

$$V_{\text{jepit}} = \varepsilon - Ir \quad \text{dan} \quad I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

**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 $1,5 \text{ V}$ 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

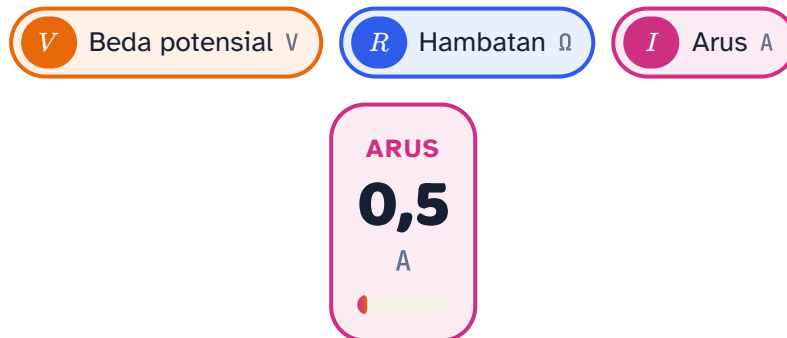
Coba bandingkan mengalirkan air lewat selang besar dan lewat sedotan. Sedotan lebih "menghambat". Di kabel, elektron yang hanyut terus bertumbukan dengan ion-ion logam yang bergetar. Tumbukan inilah sumber **hambatan listrik** R , satuannya **ohm** (Ω). Hambatan juga yang membuat elemen setrika dan rice 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

$$I = \frac{V}{R}$$

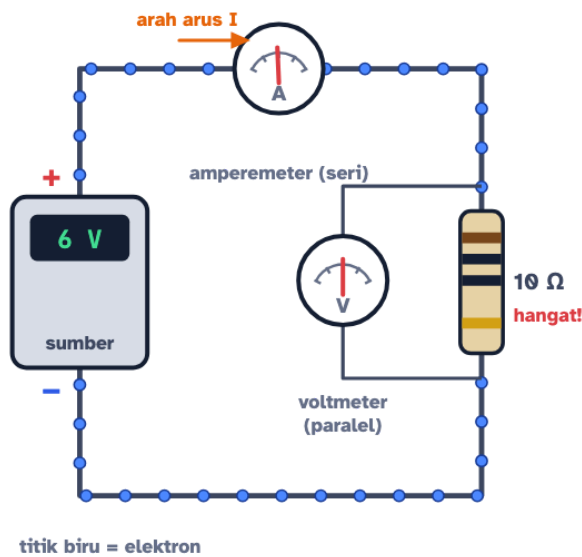
Arus = tegangan dibagi hambatan. Dorongan makin kuat, arus makin deras. Jalan makin sempit, arus makin kecil.



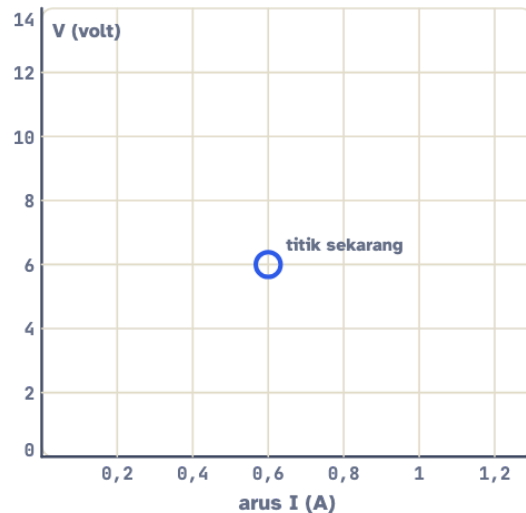
Tegangan **6 V** mendorong muatan melewati hambatan **12 Ω** , sehingga arusnya **0,5 A**. Gandakan tegangannya: arusnya ikut berlipat dua!

$$\text{Cek satuan: } \frac{V}{\Omega} = \frac{V}{V/A} = A$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-DINAMIS-OHM](https://aurumgen.my.id/physicspedia#rm-dinamis-ohm)



Grafik V-I (kemiringan = hambatan R)



Voltmeter

6 V

Amperemeter

0,6 A

 $R = V / I$ 10 Ω

Titik tercatat

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).

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Hambatan = hambatan jenis bahan $\times$ panjang $\div$ luas penampang. Panjang menambah, tebal mengurangi.

 ρ Hambatan jenis $\text{n}\Omega \text{ m}$ L Panjang kawat m A Luas penampang mm^2 R Hambatan kawat Ω

HAMBATAN KAWAT

0,113 Ω

Kawat sepanjang **10** m dengan penampang **1,5** mm^2 dan hambatan jenis **17** $\text{n}\Omega \text{ m}$ memiliki hambatan **0,113** Ω .

Cek satuan: $\frac{\Omega \text{ m} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = \Omega$. Ingat ubah mm^2 ke m^2 : $1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$.

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

Bahan	Hambatan jenis ρ ($\Omega \text{ m}$, $\pm 20^\circ \text{C}$)	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 $^{\circ}\text{C}$ 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: **Hitam** 0, **Cokelat** 1, **Merah** 2, **Oranye** 3, **Kuning** 4, **Hijau** 5, **Biru** 6, **Ungu** 7, **Abu-abu** 8, **Putih** 9. Hafalkan sebagai "**HiCo MeO KuHi BiU APu**". Gelang 1 dan 2 adalah angka, gelang 3 adalah banyaknya nol. Kuning-ungu-merah berarti $4\text{-}7\text{-}00 = 4.700\ \Omega$. Gelang emas berarti toleransi $\pm 5\%$.



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 $6\ \Omega$. Berapa arus yang mengalir? (Anggap hambatan dalam baterai sangat kecil.)

1 Dua sel seri: $V = 1,5 + 1,5 = 3\ \text{V}$.

2 Hukum Ohm: $I = \frac{V}{R} = \frac{3}{6} = 0,5\ \text{A}$.

Arusnya 0,5 A. Artinya, setiap detik 0,5 coulomb muatan melewati filamen lampu.

23.4 Rangkaian seri dan paralel

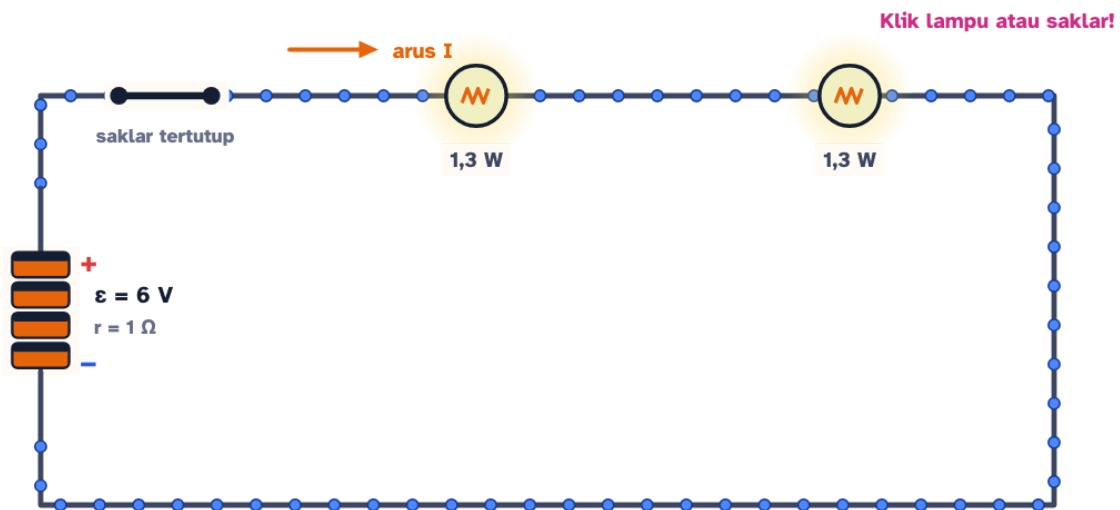
Lampu hias murah yang dililitkan di pohon saat Lebaran atau Natal sering punya "penyakit": satu lampu putus, *seluruh* untaian padam. Lampu di rumahmu tidak begitu. Kalau lampu kamar mandi putus, lampu ruang tamu tetap menyala. Bedanya ada pada cara lampu disusun.

	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: $I = I_1 + I_2 + \dots$

Tegangan	terbagi: $V = V_1 + V_2 + \dots$	sama di semua cabang
Hambatan pengganti	$R_s = R_1 + R_2 + \dots$ (makin besar)	$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$ (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
12 Ω

Arus dari baterai
0,46 A

Tegangan jepit
5,54 V

Daya tiap lampu
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.

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

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.

Hambatan $6\ \Omega$ dan $3\ \Omega$ disusun paralel. Susunan itu lalu dihubungkan seri dengan hambatan $4\ \Omega$, dan semuanya dipasang pada baterai 12 V (hambatan dalam diabaikan). Tentukan arus total dan arus di hambatan $6\ \Omega$.

1 Bagian paralel: $R_p = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2\ \Omega$.

2 Ditambah seri $4\ \Omega$: $R_{\text{total}} = 2 + 4 = 6\ \Omega$.

3 Arus total: $I = \frac{12}{6} = 2\text{ A}$. Arus ini melewati hambatan $4\ \Omega$.

4 Tegangan pada bagian paralel: $V_p = IR_p = 2 \times 2 = 4\text{ V}$.

5 Arus di $6\ \Omega$: $I_6 = 4/6 \approx 0,67\text{ A}$. (Cek: di $3\ \Omega$ mengalir $4/3 \approx 1,33\text{ A}$, dan $0,67 + 1,33 = 2\text{ A}$. ✓)

Arus total 2 A. Hambatan $6\ \Omega$ hanya sebagian $\approx 0,67\text{ A}$. 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 berpotensi 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."

MITOS

"Burung tidak tersengat di kabel listrik karena kakinya bersisik dan kebal listrik."

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).

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

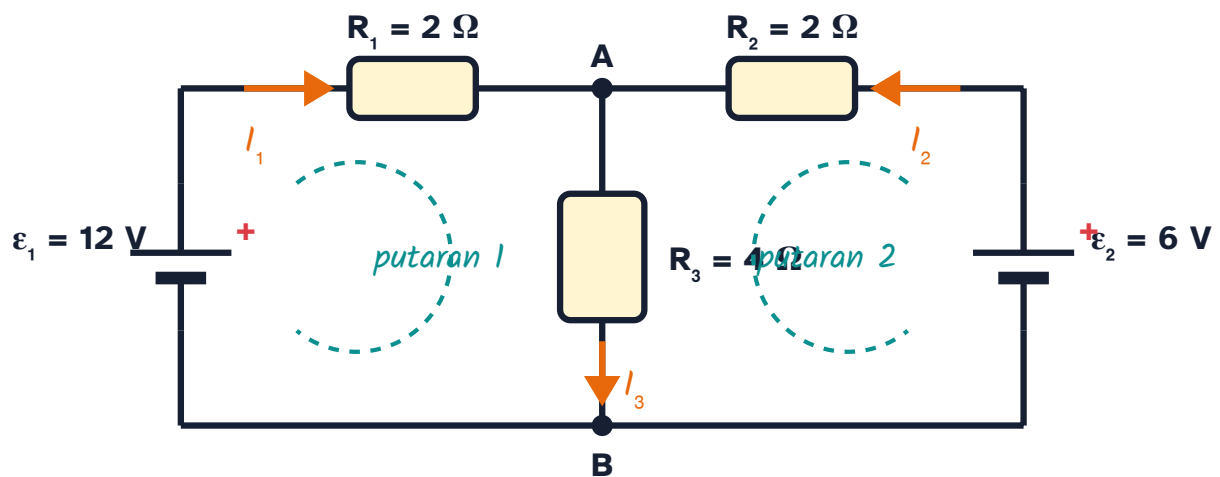
Beberapa rangkaian tidak bisa disederhanakan menjadi seri dan paralel, misalnya rangkaian dengan dua baterai di cabang yang berbeda. Untuk itu kita punya dua aturan sakti dari Gustav Kirchhoff.

Hukum I Kirchhoff (aturan simpang). Jumlah arus yang masuk ke sebuah titik cabang sama dengan jumlah arus yang keluar: $\sum I_{\text{masuk}} = \sum I_{\text{keluar}}$.

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: $\sum \mathcal{E} = \sum IR$.

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: $I_3 = (6 - 2I_3) + (3 - 2I_3) \rightarrow 5I_3 = 9 \rightarrow I_3 = 1,8 \text{ A}$.
- 5 Maka $I_1 = 6 - 3,6 = 2,4 \text{ A}$ dan $I_2 = 3 - 3,6 = -0,6 \text{ A}$.

$I_1 = 2,4 \text{ A}$, $I_3 = 1,8 \text{ A}$, dan $I_2 = -0,6 \text{ A}$. 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).

**MENGUBAH GALVANOMETER MENJADI AMPEREMETER DAN VOLTMETER**

Galvanometer sangat peka. Misalnya jarumnya penuh pada arus $I_g = 1 \text{ mA}$, dan hambatan kumparannya $R_g = 50 \Omega$. Agar bisa mengukur sampai 1 A, pasang **hambatan shunt** kecil secara paralel supaya sebagian besar arus "melipir": $R_{sh} = \frac{I_g R_g}{I - I_g} = \frac{0,001 \times 50}{0,999} \approx 0,05 \Omega$. Agar bisa mengukur sampai 10 V, pasang **hambatan depan** besar secara seri: $R_d = \frac{V}{I_g} - R_g = 10\,000 - 50 = 9\,950 \Omega$. 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 $W = VQ = VIt$.

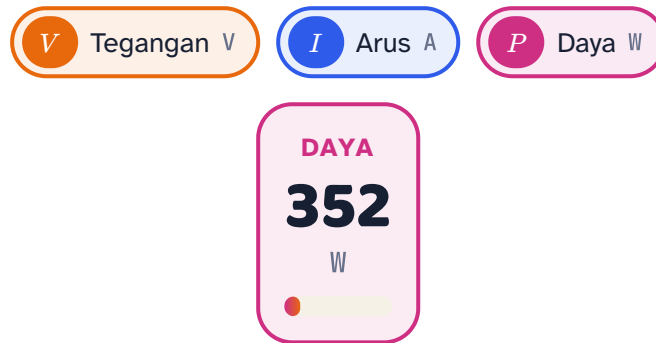
Daya listrik adalah energi per detik:

$$P = \frac{W}{t} = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

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.

$$P = V I$$

Daya = tegangan $\times$ arus. Energi per coulomb dikali banyaknya coulomb per detik = energi per detik.



Alat yang bekerja pada **220 V** dengan arus **1,6 A** memakai daya **352 W**, yaitu **352 joule** setiap detik.

Satuan Nusantara: $\approx 88\%$ dari rice cooker saat memasak $\cdot \approx 6\%$ dari mesin motor bebek $\cdot \approx 35 \times$ lampu LED

$$\text{Cek satuan: } V \cdot A = \frac{J}{C} \cdot \frac{C}{s} = \frac{J}{s} = W$$

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-DINAMIS-DAYA](https://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: $I = 220/1\,694 \approx 0,13\text{ A}$, sehingga lampu 40 W memakai $\pm 20\text{ W}$, sedangkan lampu 100 W hanya $\pm 8\text{ W}$. (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. $1\text{ kWh} = 1\,000\text{ W} \times 3\,600\text{ s} = \mathbf{3,6\text{ juta joule}}$. Inilah "barang" yang kamu beli saat membeli token.

$$\text{Energi (kWh)} = \frac{P\text{ (W)} \times t\text{ (jam)}}{1\,000}$$

$$\text{Biaya} = \text{Energi (kWh)} \times \text{tarif per kWh}$$

$$\text{Biaya} = \frac{P t n}{1000} \times \text{tarif}$$

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

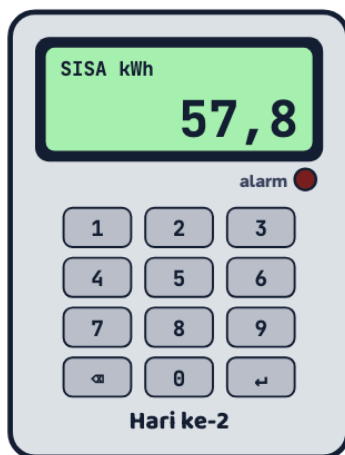
78.300

rupiah

Alat **300** W yang menyala **6** jam sehari selama **30** hari memakai energi $300 \times 6 \times 30 / 1000$ kWh. Dengan contoh tarif Rp**1.450**/kWh, biayanya ±Rp**78.300**.

Cek satuan: $\text{kW} \times \text{jam} = \text{kWh}$, lalu $\text{kWh} \times \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}} = \text{Rp}$

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



token Rp100.000 $\approx$ 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 $\pm$ Rp162.000 per bulan (contoh tarif Rp1.450/kWh)

Token Rp100.000 habis dalam $\pm$ 18,5 hari

Energi per hari
3,72 kWh

Energi per bulan (30 hari)
111,7 kWh

Biaya per bulan
Rp162.000

Token habis dalam
 $\pm$ 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: $\frac{300 \times 6}{1000} = 1,8$ kWh.

2 Energi sebulan: $1,8 \times 30 = 54$ kWh.

3 Biaya: $54 \times 1\,450 = 78\,300$, jadi $\pm$ Rp78.300.

Sekitar Rp78.300 sebulan, hampir setara token Rp100.000! Mengurangi main game 2 jam sehari menghemat $\pm$ 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 sehabisan.

23.7 Instalasi listrik rumah dan keselamatan

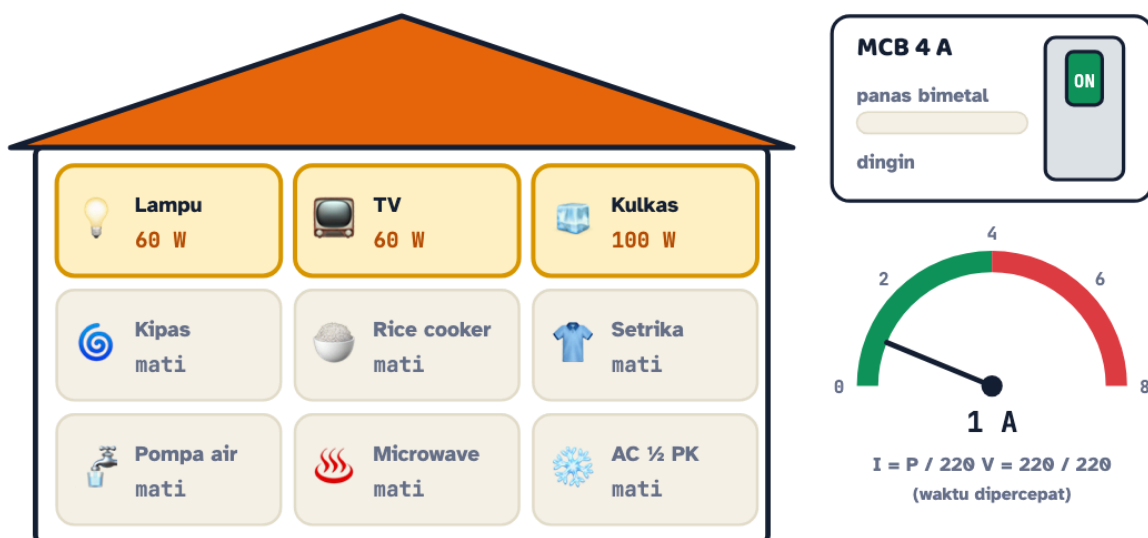
Listrik masuk ke rumahmu lewat kabel dari tiang PLN, lalu melewati **meteran kWh** dan **MCB** (pemutus arus mini). Dari sana, listrik dibagi ke cabang-cabang **paralel**: lampu, stop kontak, pompa air. Di dalam dinding ada tiga jenis kabel:

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 memanaskan 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**: $900 \text{ VA} \approx 4 \text{ A}$, $1.300 \text{ VA} \approx 6 \text{ A}$, $2.200 \text{ VA} \approx 10 \text{ A}$ (karena $220 \text{ V} \times 6 \text{ A} \approx 1.300 \text{ VA}$).

LAB MINI Njglek! Uji batas MCB rumahmu

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-23



Daya total

220 W

Arus total

1 A

Batas MCB

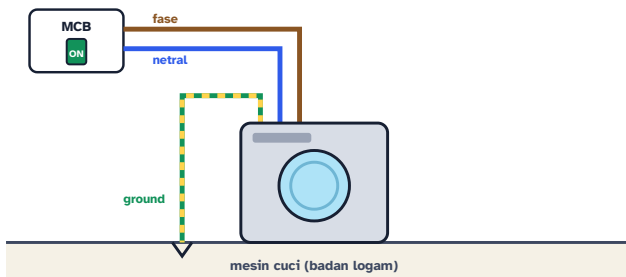
4 A

Status

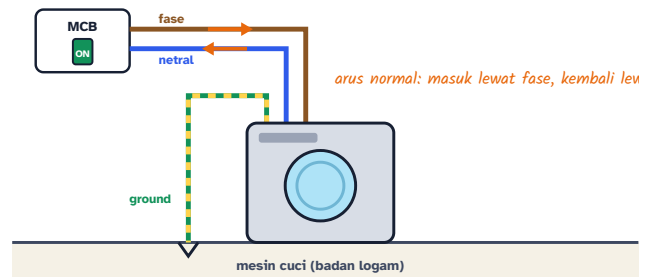
Aman

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.

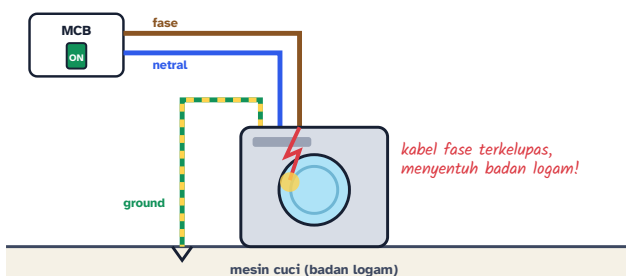
Kabel ground: penyelamat yang sering diremehkan



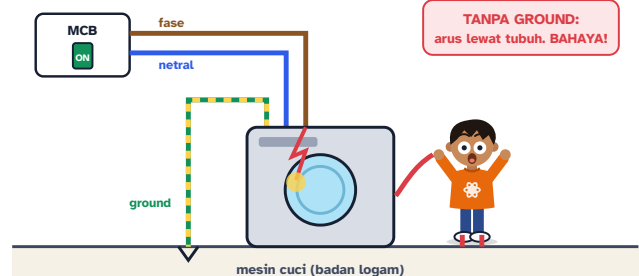
Langkah 1. Mesin cuci terhubung ke tiga kabel: **fase** (cokelat) membawa ± 220 V, **netral** (biru) sebagai jalur kembali, dan **ground** (hijau-kuning) yang disambungkan ke badan logam mesin dan ke tanah.



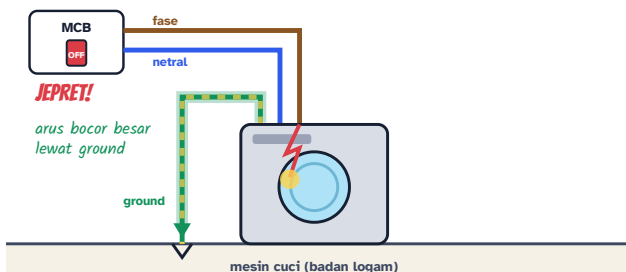
Langkah 2. Keadaan normal: arus masuk lewat kabel fase, memutar motor, lalu kembali lewat netral. Kabel ground tidak dialiri arus.



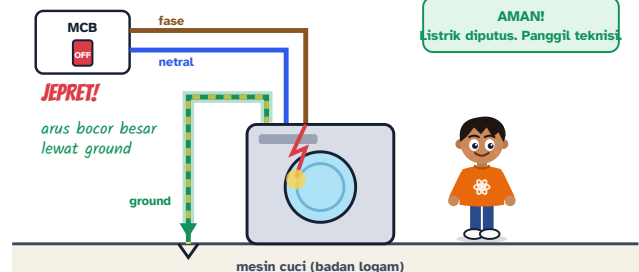
Langkah 3. Kerusakan: isolasi kabel fase di dalam mesin terkelupas dan menyentuh badan logam. Sekarang badan mesin ikut bertegangan.



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 fitting 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."

MITOS

"Charger atau TV yang tidak dipakai tetapi masih tercolok tidak memakai listrik sama sekali."

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.

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 ($P = I^2 R$). 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

 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 $\times$ panjang $\div$ 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 $\times$ 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) $\times$ jam per hari $\times$ jumlah hari $\times$ 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.

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

Perkemahan Pramuka, malam hari

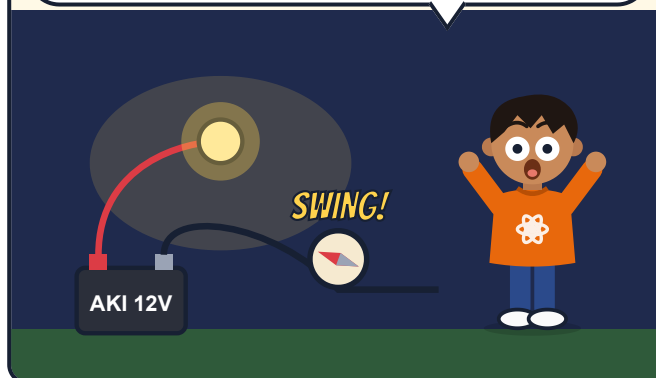
RAKA

Utara ke sana! Regu Elang, ikuti kompasku!



RAKA

Lho?! Jarumnya belok ke kabel lampu! Kompasku rusak?





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.

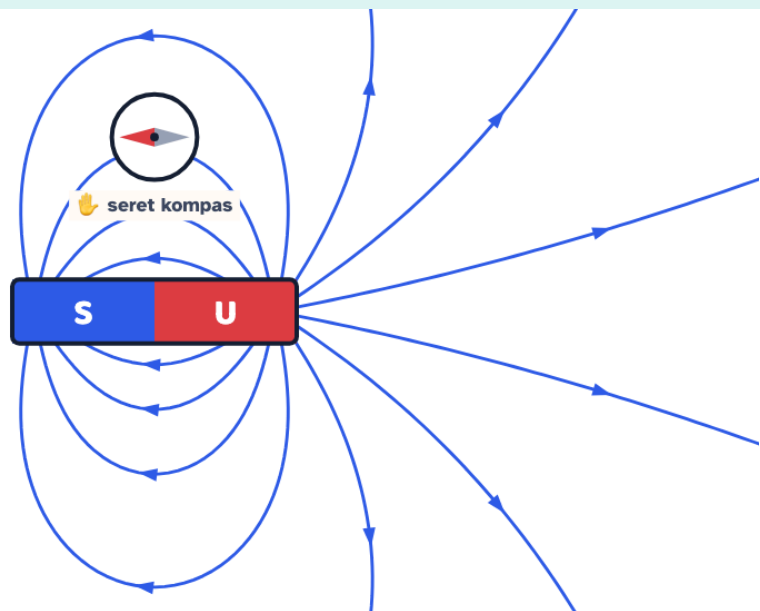
Satu potongan masih bermagnet, potongan lainnya tidak.

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)

180°

Kuat medan (relatif)

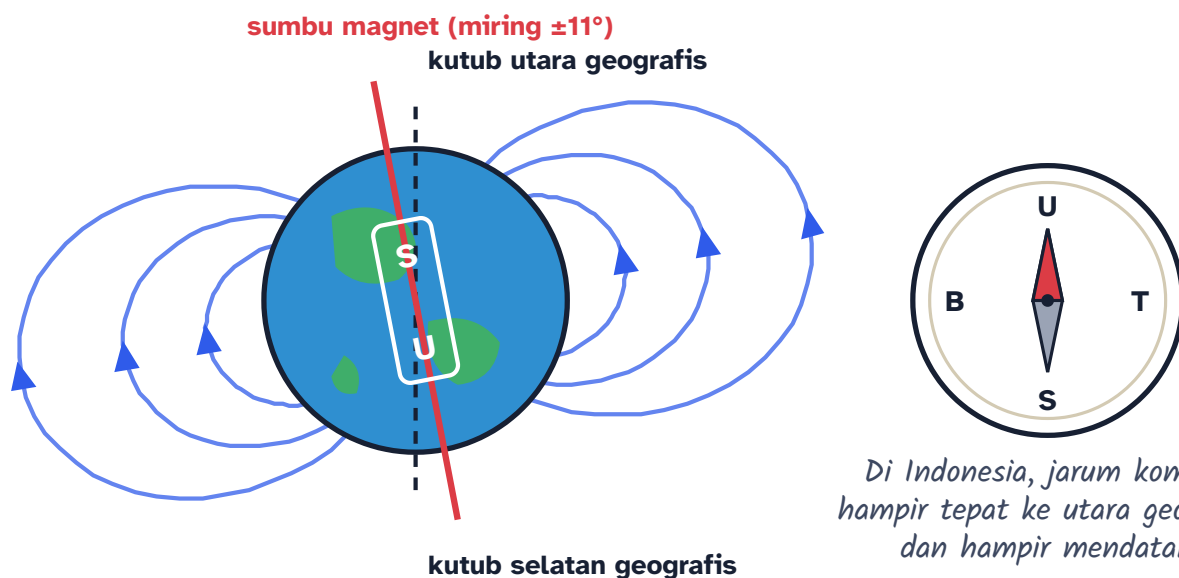
×1

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	$\pm 40 \mu\text{T}$ ($0,00004 \text{ T}$)
Magnet hiasan kulkas	$\pm 5 \text{ mT}$
Kabel 10 A, pada jarak 5 cm	$\pm 40 \mu\text{T}$
Magnet neodimium kecil (di permukaannya)	$\pm 0,5\text{--}1 \text{ T}$
Mesin MRI di rumah sakit	1,5–3 T
Magnetar (sejenis bintang neutron)	sampai $10^{10}\text{--}10^{11} \text{ T}$

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 genggam tangan kanan**: genggam kawat dengan tangan kanan, arahkan **ibu jari searah arus**, maka **lipatan keempat jari** menunjukkan arah putaran medan magnet.



ibu jari = arus, lipatan jari = medan
 arus keluar layar: medan berlawanan jarum jam

Kiri: aturan genggam tangan kanan. Kanan: kawat dilihat dari ujungnya. Simbol $\odot$ berarti arus keluar dari layar menuju kamu (seperti melihat ujung panah), dan $\otimes$ 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

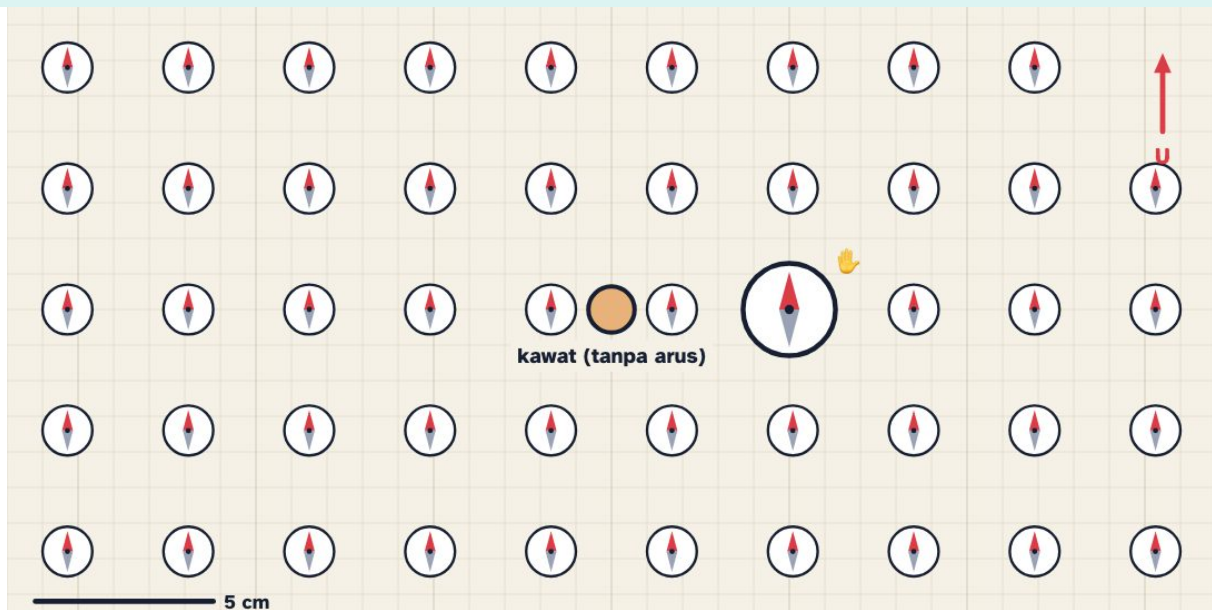
40

μT

Arus **10 A** pada jarak **5 cm** menghasilkan medan **40 μT** . Medan magnet Bumi di Indonesia $\pm 40 \mu\text{T}$. Jika medan kawat jauh lebih besar dari itu, kompas di dekatnya akan menunjuk mengikuti kawat, bukan ke utara.

Cek satuan: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}$, sehingga $\frac{\text{T m/A} \cdot \text{A}}{\text{m}} = \text{T}$. Ingat: $1 \mu\text{T} = 0,000001 \text{ T}$.

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



Medan kawat di kompas besar

0 μT

Jarak ke kawat

5 cm

Jarum kompas besar

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 $B = \frac{\mu_0 NI}{2R}$. Satu sisi lingkaran berlaku seperti kutub U, sisi lainnya kutub S.

**LANJUT • IB & OLIMPIADE****HUKUM BIOT-SAVART DAN HUKUM AMPÈRE**

Setiap potongan kawat kecil $d\mathbf{l}$ yang membawa arus I menyumbang medan $d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$ (hukum Biot-Savart). Jika diintegrasikan sepanjang kawat lurus tak hingga, hasilnya $B = \mu_0 I / (2\pi a)$. Pada sumbu lingkaran berjari-jari R , sejauh x dari pusatnya: $B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$. Untuk bentuk yang simetris, **hukum Ampère** lebih cepat: $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{dilingkupi}}$. 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: GENGAMAN 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

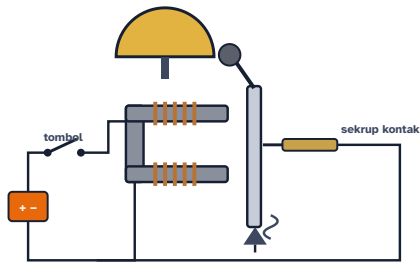
Solenoid **500** lilitan sepanjang **20** cm berarus **2** A menghasilkan medan **6,28** mT di dalamnya, ratusan kali medan magnet Bumi. Masukkan inti besi, maka medannya bisa ratusan hingga ribuan kali lebih kuat lagi!

Cek satuan: $\frac{T \cdot m/A \cdot A}{m} = T$. Yang penting adalah kerapatan lilitan $n = N/L$ (lilitan per meter): $B = \mu_0 n I$.

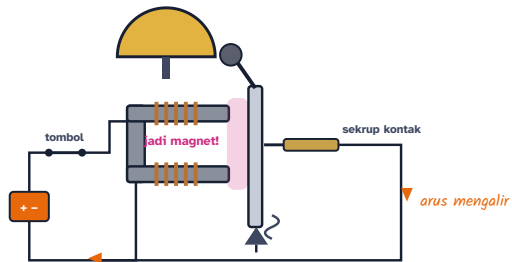
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-MAGNET-SOLENOID

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

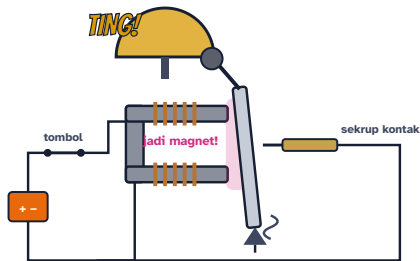
saklar. Kekuatannya bisa diatur lewat arus dan jumlah lilitan. Besi **lunak** dipakai karena kemagnetannya langsung hilang saat arus diputus. Baja akan tetap bermagnet.



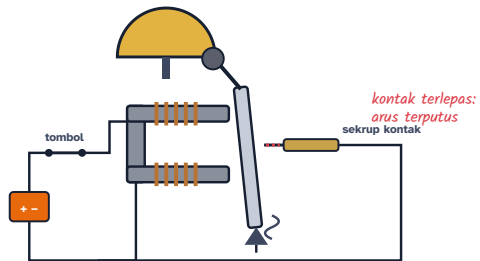
Langkah 1. Bel listrik sekolah terdiri atas **elektromagnet** (inti besi berbentuk U yang dililit kawat), **jangkar** besi lunak berpegas dengan pemukul di ujungnya, sebuah gong, dan **sekrup kontak**.



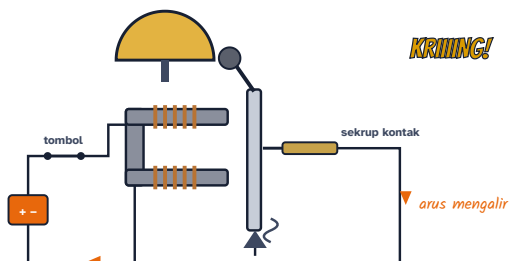
Langkah 2. Tombol ditekan: rangkaian tertutup, arus mengalir lewat kumparan, dan inti besi menjadi magnet.



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: **KRIING!**



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

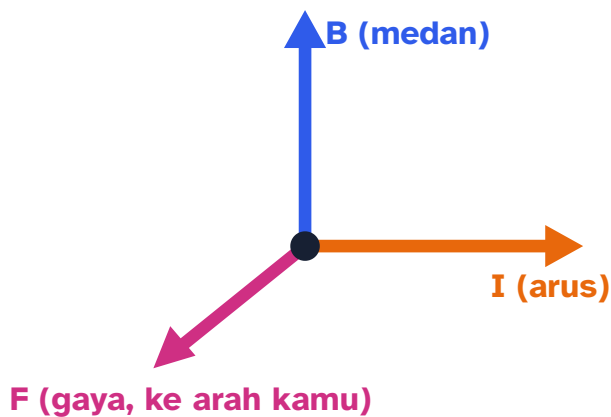
Kawat **0,3** m berarus **5** A dalam medan **0,2** T dengan sudut **90°** mengalami gaya **0,3** N. Coba ubah sudut ke **0°**: gayanya lenyap!

Satuan Nusantara: ≈ 30% dari berat apel kecil (±100 g)

Cek satuan: T · A · m = N. Dari sinilah definisi tesla: 1 T = 1 N/(A 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.

Lingkar, dengan kelajuan tetap.

Spiral yang makin mengecil sampai proton berhenti.

Lingkar! 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 $r = \frac{mv}{qB}$. 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

$$r = \frac{mv}{qB}$$

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 **1e** yang melaju **500** km/s dalam medan **100** mT berputar dengan jari-jari **5,18** cm.

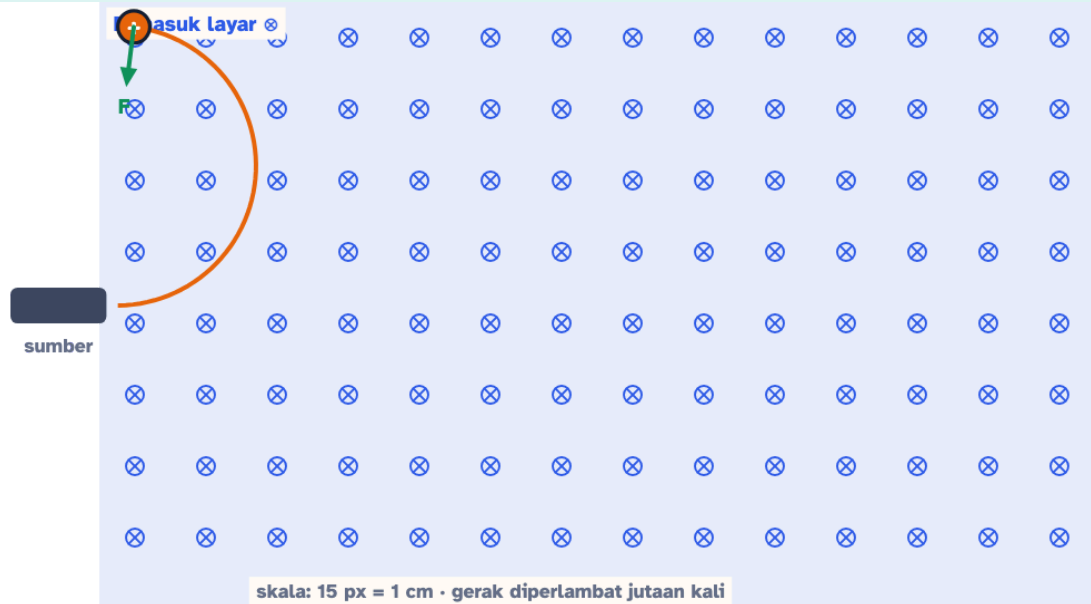
Cek satuan: $\frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{C} \cdot \text{T}} = \frac{\text{kg m/s}}{\text{C} \cdot \text{N}/(\text{A m})} = \text{m}$, karena $\text{C} = \text{A s}$ dan $\text{N} = \text{kg m/s}^2$.

RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-MAGNET-JARI](https://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 $r = mv_{\perp}/(qB)$

5,22 cm

Periode $T = 2\pi m/(qB)$

$6,56 \times 10^{-7} \text{ s}$

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: $L = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$. Karena tegak lurus, $\sin 90^\circ = 1$.

2 $F = BIL = 0,5 \times 3 \times 0,2 = 0,3 \text{ N}$.

Gayanya 0,3 N, kira-kira seberat sepertiga apel kecil. Inilah gaya yang memutar motor listrik.

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.

$$1 \quad r = \frac{mv}{qB} = \frac{1,67 \times 10^{-27} \times 2 \times 10^6}{1,6 \times 10^{-19} \times 0,4} \approx 5,2 \times 10^{-2} \text{ m} \approx 5,2 \text{ cm.}$$

$$2 \quad \text{Periode: } T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \times 1,67 \times 10^{-27}}{1,6 \times 10^{-19} \times 0,4} \approx 1,6 \times 10^{-7} \text{ s.}$$

Jari-jarinya $\pm 5,2$ 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 $f = \frac{qB}{2\pi m}$. **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 $\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$. Dulu, definisi resmi ampere memakai gaya ini.



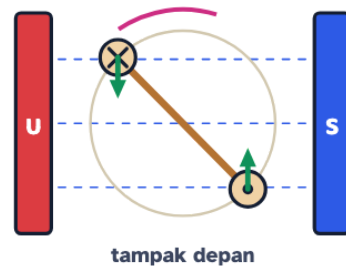
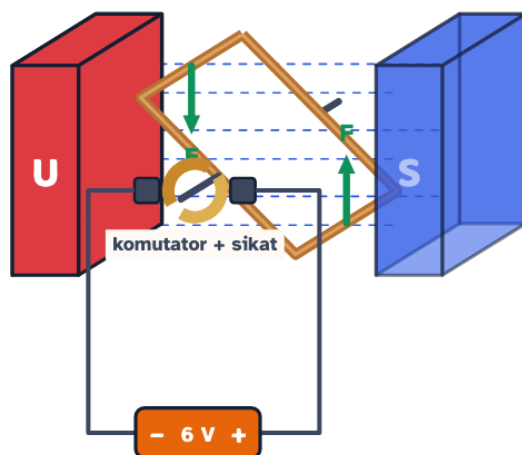
TAMU DARI MASA LALU

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.



Arus kumparan

0,5 A

Kecepatan

23 rpm

Torsi

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 , torsi $\tau = NIAB \sin \phi$, 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 $\theta = \frac{NAB}{k} I$ 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.



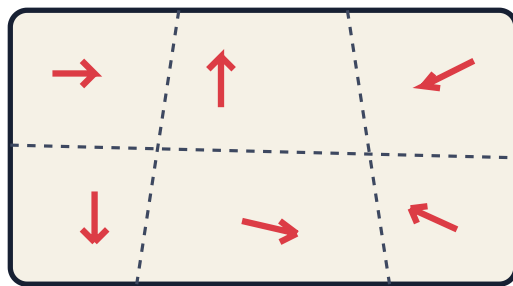
Pengeras suara

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

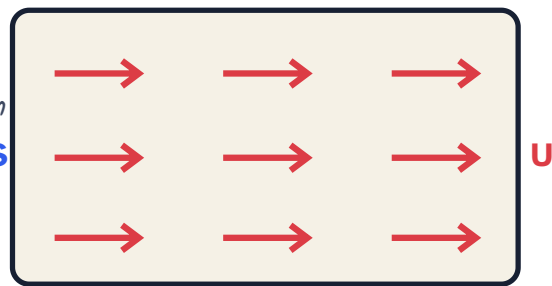
Mengapa besi ditarik magnet, sedangkan aluminium tidak? Setiap elektron berperilaku seperti magnet super kecil, karena berputar pada porosnya (*spin*) dan beredar mengelilingi inti. Pada kebanyakan bahan, magnet-magnet mini itu saling meniadakan. Berdasarkan responsnya terhadap medan magnet, bahan dibagi 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: domain acak

dimagnetkan



magnet: domain searah

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 $\pm 770^\circ\text{C}$), dipukul-pukul keras, atau diletakkan dalam medan bolak-balik yang makin melemah. Pada suhu Curie, getaran panas mengacak domain-domainnya.



FAKTA UNIK DARI TARSİ: 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."

MITOS

"Ujung utara jarum kompas menunjuk ke kutub utara magnet Bumi."

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!

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".

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.

Di sebuah alat spektrometer, ion-ion melewati daerah dengan medan listrik $E = 3,0 \times 10^4 \text{ V/m}$ dan medan magnet $B = 0,060 \text{ T}$ 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 $0,060 \text{ T}$, berapa jari-jari lintasannya?

- 1 Lolos lurus jika gaya listrik = gaya magnet: $qE = qvB$, jadi $v = \frac{E}{B} = \frac{3,0 \times 10^4}{0,060} = 5,0 \times 10^5 \text{ m/s}$.
- 2 Perhatikan bahwa muatan q dicoret, sehingga semua ion dengan kelajuan ini lolos, apa pun muatan dan massanya.
- 3 Di daerah bermedan magnet saja: $r = \frac{mv}{qB} = \frac{1,67 \times 10^{-27} \times 5,0 \times 10^5}{1,6 \times 10^{-19} \times 0,060} \approx 8,7 \times 10^{-2} \text{ m}$.

Kelajuan yang lolos $5,0 \times 10^5 \text{ m/s}$, dan jari-jari proton $\pm 8,7 \text{ cm}$. 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 **sementara 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 $\times$ arus $\times$ panjang kawat dalam medan $\times$ 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.