



Physicspedia

BUKU • JILID 1 • BAB 1-12

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 1 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

Cara belajar dengan Physicspedia	4
--	---

BAGIAN A • FONDASI

1	Kenapa Fisika? Membaca Aturan Main Alam	8
2	Besaran, Satuan & Pengukuran	29
3	Vektor & Matematika Secukupnya	53

BAGIAN B • GERAK & GAYA

4	Gerak Lurus	74
5	Gerak Parabola & Gerak Relatif 2D	98
6	Hukum Newton tentang Gerak	120
7	Gesekan & Gerak Melingkar	144
8	Usaha, Energi & Daya	169
9	Momentum, Impuls & Tumbukan	193
10	Rotasi & Keseimbangan Benda Tegar	214
11	Gravitasi & Satelit	235
12	Elastisitas & Getaran Harmonik	257

Cara Belajar dengan Physicspedia

Kenalan dulu, yuk!



Raka

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



Sari

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



Kak Nara

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



Tarsi si Tarsius

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

Cara belajar di Physicspedia

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

1. Komik pembuka

Masalah nyata dari kehidupan sehari-hari.

2. Tebak Dulu!

Pilih prediksi kamu sebelum belajar. Salah tebak itu bagus!

3. Cerita & analogi

Konsep abstrak dibuat konkret dan lucu.

4. Lab Mini

Simulasi yang bisa kamu atur sendiri.

5. Rumus Hidup

Geser nilainya, lihat hasilnya berubah, kumpulkan kartunya.

6. Contoh bertingkat

Contoh → kerjakan bersama → coba sendiri.

7. Awas Jebakan!

Miskonsepsi yang paling sering muncul.

8. Cek Cepat

Tiga pertanyaan untuk menguatkan ingatan.

9. Tantangan Rumah

Eksperimen dengan bahan dapur.

10. Tangga Latihan

Soal dari Pemula sampai Olimpiade.



TIGA MODE BACAAN

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

Pilih jalur belajarmu

SD – SMP

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

Lv 1

Lv 2

SMA • TKA • UTBK

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

Lv 2

Lv 3

IGCSE • IB

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

Lv 4

Lv 5

Olimpiade (OSN)

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

Lv 5

Lv 6

Tangga 6 level soal

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

Peta isi buku

Bagian A • Fondasi

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

Bagian B • Gerak & Gaya

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

Bagian C • Fluida & Panas

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

Bagian D • Gelombang & Cahaya

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

Bagian E • Listrik & Magnet

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

Bagian F • Fisika Modern

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

Bagian G • Fisika untuk Indonesia & Semesta

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

Selaras dengan kurikulum

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

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

01

Kenapa Fisika? Membaca Aturan Main Alam

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

Setelah bab ini, kamu bisa

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

RAHASIA PAPAN CONGKLAK

KOMIK • 4 PANEL

Minggu sore, teras rumah Sari

RAKA

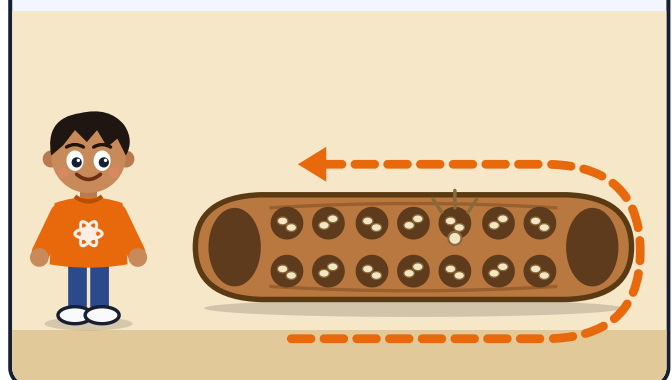
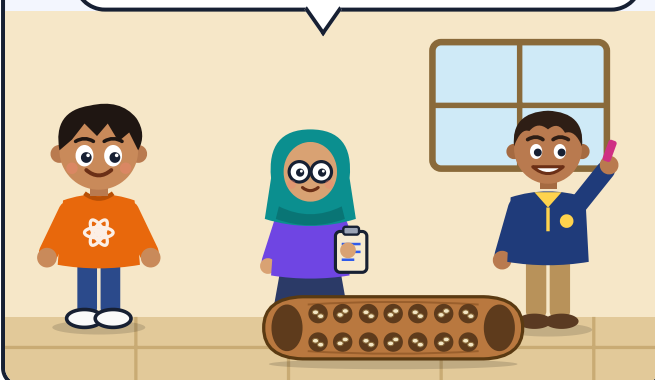
Kalian main apa, sih? Biji kerangnya pindah-pindah terus!

SARI

Congklak! Coba tebak sendiri aturannya. Tapi kamu cuma boleh **menonton**, ya.

RAKA

Hmm... biji diambil dari satu lubang, lalu ditaruh **satu-satu** ke lubang berikutnya... memutar!



RAKA

LHO?! Kok Kak Nara mengambil semua biji di lubang seberang? Curang!

KAK NARA

Hehe, bukan curang. Itu aturan "**nembak**". Jarang muncul, jadi tadi belum kamu lihat.



Kata Kak Nara

KAK NARA

Fisikawan bekerja persis seperti kamu tadi! Alam memainkan "**conglak raksasa**". Kita menonton, menebak aturannya, lalu mengujinya.

SARI

Dan selama apa pun dimainkan, total bijinya tetap 98. Itu juga aturan!



Tebak Dulu!

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

Ya, 20 kali menonton sudah lebih dari cukup.

Ya, karena aturan yang sama terus terulang.

Belum pasti. Ia hanya yakin pada aturan yang sudah terlihat; aturan yang jarang muncul bisa saja belum teramati.

Tidak, karena aturan permainan tidak mungkin ditebak tanpa membaca buku aturan.

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

1.1 Fisika: membaca aturan main alam

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

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

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

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



TAMU DARI MASA LALU

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

Eksperimen ke-0

Total biji: 98 (selalu tetap!)

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



Eksperimen

0

Total biji

98 ✓

Biji di tangan

0

"Nembak" teramati

0x

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



TRIK KAK NARA: RANCANG EKSPERIMENMU

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

1.2 Dari kuark sampai galaksi: skala alam semesta

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

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

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

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

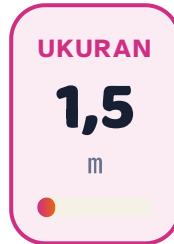
$$x = a \times 10^n \text{ m}$$

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

a Angka depan

n Pangkat sepuluh

x Ukuran m

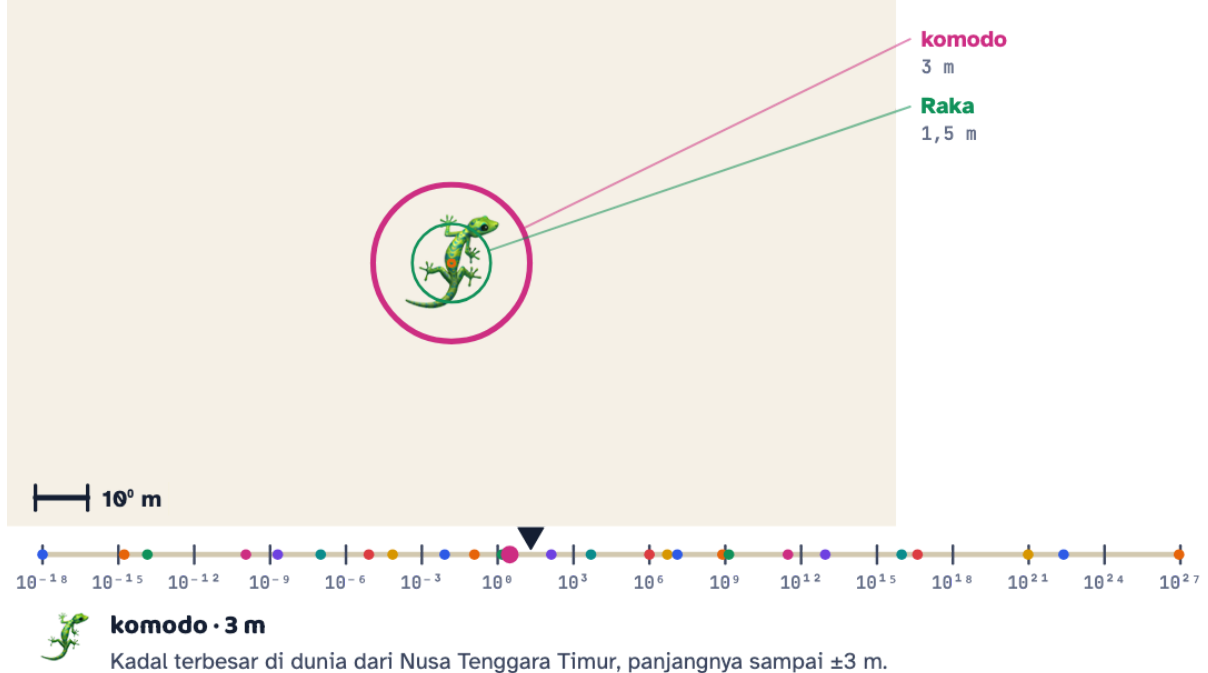


Angka depan **1,5** dengan pangkat **0** menghasilkan ukuran **1,5 m**. Lihat pembandingnya di bawah, lalu coba $n = 7$ (seukuran Bumi) atau $n = -10$ (seukuran atom).

Satuan Nusantara: $\approx 1 \times \text{tinggi Raka} \cdot \approx 188 \times \text{semut rangrang}$

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

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



Lebar layar

20,417 m

Seukuran dengan



komodo

Cahaya melintasi layar dalam

68,1 nanosekon

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

**TRIK KAK NARA: HITUNG LOMPATAN**

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

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

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

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

d Jarak m t Waktu tempuh s

WAKTU TEMPUH

1,28

s

Cahaya menempuh jarak $3,84 \times 10^8$ m dalam **1,28** sekon. Artinya, saat kamu melihat benda sejauh itu, kamu sedang melihat masa lalunya!

Satuan Nusantara: $\approx 4,3 \times$ kedipan mata $\cdot \approx 2\%$ dari satu menit

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

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

CONTOH

Sinar Bulan yang 'terlambat'

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

1 Gunakan $t = d/c$ dengan $c = 3 \times 10^8$ m/s.

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

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

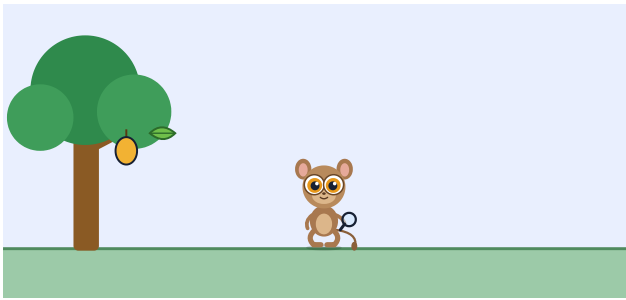


MENGAPA HARUS TAHU SKALA?

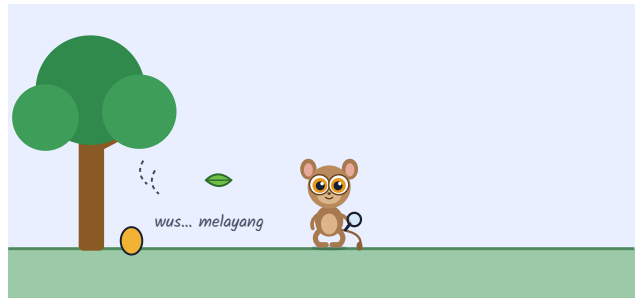
Aturan main alam bisa berbeda di skala yang berbeda. Di skala manusia, hukum Newton juara. Di skala atom (10^{-10} m), berlaku fisika kuantum. Di skala galaksi dan kecepatan mendekati cahaya, berlaku relativitas Einstein. Fisikawan selalu bertanya dulu: "Kita sedang bermain di skala berapa?"

1.3 Metode ilmiah: cara detektif alam bekerja

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



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



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



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



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



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



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



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

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

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



AWAS JEBAKAN

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



Tebak Dulu!

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

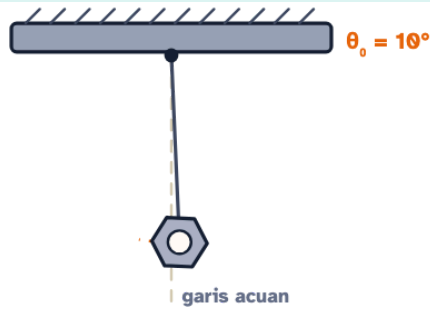
Bandul B, karena benda berat bergerak lebih cepat.

Bandul A, karena benda ringan lebih lincah.

Sama saja: waktu satu ayunannya hampir sama.

Tidak bisa ditebak sama sekali.

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



#	L (m)	m (kg)	θ_0 (°)	T (s)
---	-------	--------	----------------	-------

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

STOPWATCH • ayunan 1/10

3,6 s



Ayunan dihitung

1 / 10

Stopwatch

3,6 s

Periode T = waktu 10 ayunan ÷ 10

—

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



TAMU DARI MASA LALU

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

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

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

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



LANJUT • IB & OLIMPIADE

BANDUL TIDAK BENAR-BENAR "SETIA WAKTU"

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

1.4 Cabang fisika dan empat gaya dasar alam

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



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

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

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

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

**MIMPI BESAR: MENYATUKAN SEMUA GAYA**

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

1.5 Fisika dan teknologi Indonesia

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

**Satelit SATRIA-1**

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

**Listrik dari panas bumi**

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

**Kereta cepat**

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

**Peringatan dini gempa**

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

**Mata ke langit**

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

**Fisika di rumah sakit**

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



FISIKA INDONESIA

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

MITOS

"Fisika itu cuma menghafal rumus."

MITOS

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

FAKTA

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

FAKTA

Tebakan awal disebut **hipotesis**

Teori

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

MITOS

"Fisika tidak ada hubungannya dengan hidupku."

FAKTA

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

1.6 Ilmuwan dan sikap ilmiah

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

Sikap	Artinya	Siapa contohnya
-------	---------	-----------------

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



TAMU DARI MASA LALU

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

Berani menaksir: perkiraan Fermi

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

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

Jumlah butir = jumlah orang $\times$ beras per orang, lalu dibagi massa sebutir beras.

P Penduduk juta orang

m_h Beras per orang per hari g

m_b Massa sebutir beras g

N Butir beras per hari butir

BUTIR BERAS PER HARI

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

butir

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

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

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

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

1 Detak per hari: $70 \times 60 \times 24 \approx 1,0 \times 10^5$.

2 Detak per tahun: $1,0 \times 10^5 \times 365 \approx 3,7 \times 10^7$.

3 Selama 70 tahun: $3,7 \times 10^7 \times 70 \approx 2,6 \times 10^9$.

4 Karena 2,6 lebih kecil dari $\sqrt{10} \approx 3,16$, orde besarnya 10^9 .

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



LANJUT • OLIMPIADE

ATURAN MEMBULATKAN ORDE BESARAN

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

⚡ Cek Cepat

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

Panjang tali memengaruhi periode.

Massa beban memengaruhi periode.

Belum bisa disimpulkan, karena dua variabel diubah bersamaan.

Bandulnya rusak.

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

1,3 sekon

8 menit

1 jam

4 tahun

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

gravitasi

gaya elektromagnetik

gaya lemah

gaya kuat

Kunci Cek Cepat: 1. C • 2. A • 3. D



Tantangan Rumah: bandul mur

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

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

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



RINGKASAN KILAT

Bab 1 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

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



Istilah kunci

fisika

pangkat sepuluh

notasi ilmiah

tahun cahaya

metode ilmiah

variabel

periode

orde besaran



Rumus penting

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

Skala 10^n : menulis ukuran raksasa dan mungil.

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

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

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

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

Perkiraan Fermi: butir beras Indonesia per hari.

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

⚠ Jangan sampai terjebak

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

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

🧩 Teka-teki untuk Bab 2

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

▼ Intip petunjuk

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

02

Besaran, Satuan & Pengukuran: Seni Membandingkan

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

Setelah bab ini, kamu bisa

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

JENGKAL SIAPA YANG BENAR?

KOMIK • 4 PANEL

Jam istirahat, kelas 8B

RAKA

Satu, dua, ... delapan! Panjang meja ini 8 jengkal!

KAK NARA

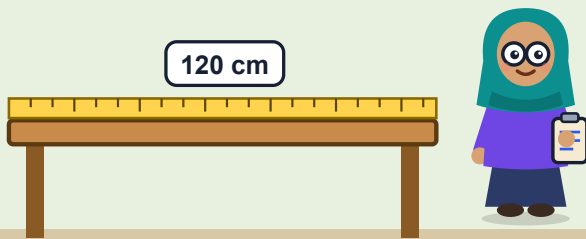
Masa, sih? Coba Kakak ukur... satu, dua... cuma 6 jengkal, tuh.

RAKA

LHO?! Mejanya menyusut?!

SARI

Mejanya tidak berubah. **Jengkal** kalian yang beda! Pakai meteran: **120 cm**. Siapa pun yang mengukur, hasilnya sama.



Rahasianya

KAK NARA

Mengukur itu **membandingkan** dengan patokan yang disepakati semua orang. Itulah **satuan baku**!

RAKA

Oh! Jengkal ku 15 cm, jengkal Kak Nara 20 cm. Pantas!

$$8 \times 15 \text{ cm} = 120 \text{ cm}$$

$$6 \times 20 \text{ cm} = 120 \text{ cm}$$



Tebak Dulu!

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

Raka, karena angkanya lebih besar sehingga lebih teliti.

Kak Nara, karena orang dewasa lebih pandai mengukur.

Keduanya benar, tetapi "jengkal" mereka berbeda panjangnya, jadi angkanya tidak bisa langsung dibandingkan.

Tidak ada yang benar, karena meja tidak bisa diukur dengan tangan.

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

2.1 Mengukur = membandingkan

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

yang dijabarkan.

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

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

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

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

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



FISIKA INDONESIA

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

2.2 Sistem Internasional (SI): 7 besaran pokok

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

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



TRIK KAK NARA: HAFAL 7 BESARAN POKOK

"Pak Mamat Wajib Kirim Surat Jam Imsak": Panjang, Massa, Waktu, Kuat arus, Suhu, Jumlah zat, Intensitas cahaya.

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

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

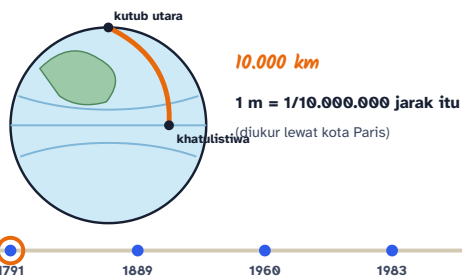
daya	energi $\div$ waktu	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$	watt (W)
tekanan	gaya $\div$ luas	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$	pascal (Pa)



AWAS JEBAKAN

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

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



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



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



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



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



semua satuan SI ditetapkan dari konstanta alam
(ditambah N_A untuk mol dan K_{cd} untuk kandela)



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



TAMU DARI MASA LALU

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

2.3 Awalan dan notasi ilmiah

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

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



TRIK KAK NARA: NAIK-TURUN TANGGA 1.000

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

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

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

**Tebak Dulu!**

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

Ojek, karena 36 lebih besar daripada 10.

Raka, karena sepeda di turunan selalu lebih cepat.

Sama cepat.

Tidak bisa dibandingkan, karena satuannya berbeda.

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

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

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

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

Cukup bagi dengan 3,6, karena $1 \text{ km/jam} = 1.000 \text{ m} \div 3.600 \text{ s} = 1/3,6 \text{ m/s}$.

 $v_{\text{km/jam}}$

Kelajuan km/jam

 $v_{\text{m/s}}$

Kelajuan m/s

KELAJUAN

20

m/s

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

Satuan Nusantara: $\approx 1,8 \times$ ojek di jalan kota ($\pm 40 \text{ km/jam}$) $\approx 21\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)
 $\approx 14 \times$ jalan kaki santai

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

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

CONTOH

Ojek di jalan kota

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

1 Pakai trik: $\text{km/jam} \div 3,6 = \text{m/s}$.

2 $54 \div 3,6 = 15 \text{ m/s}$.

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



AWAS JEBAKAN: LUAS DAN VOLUME

1 m = 100 cm, tetapi **$1 \text{ m}^2 \neq 100 \text{ cm}^2$** ! Persegi 1 m $\times$ 1 m sama dengan 100 cm $\times$ 100 cm = **10.000 cm²**. Untuk volume, faktornya dipangkatkan tiga: $1 \text{ m}^3 = 100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3 = \textbf{1.000.000 cm}^3 = 1.000 \text{ liter}$. Jadi kalau meteran air PDAM-mu bertambah 1 m³, keluargamu sudah memakai 1.000 liter air, kira-kira 53 galon air minum!

Bulan lalu meteran air rumah Sari menunjukkan 1.234 m^3 . Bulan ini 1.252 m^3 . Berapa liter air yang dipakai, dan setara berapa galon 19 liter?

1 Pemakaian: $1.252 - 1.234 = 18 \text{ m}^3$.

2 Kalikan 1: $18 \text{ m}^3 \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 18.000 \text{ L}$.

3 Jumlah galon: $18.000 \div 19 \approx 947 \text{ galon}$.

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

2.5 Dimensi dan analisis dimensi

Dimensi menunjukkan dari besaran pokok apa saja sebuah besaran tersusun, tanpa peduli satuannya.

Kecepatan bisa dalam m/s, km/jam, atau knot, tetapi dimensinya selalu "panjang dibagi waktu": $[L][T]^{-1}$.

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

Analisis dimensi punya dua kegunaan hebat.

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

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

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

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

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

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

*Tali makin panjang, ayunan makin lambat. Gravitasi makin kuat, ayunan makin cepat.
Massa? Tidak ikut!*

L Panjang tali m

g Percepatan gravitasi m/s²

T Periode s

PERIODE

2,01

s

Bandul bertali **1 m** di tempat dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ berayun bolak-balik sekali dalam **2,01** sekon.

Satuan Nusantara: $\approx 6,7 \times \text{kedipan mata} \cdot \approx 3\%$ dari satu menit

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

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



BATAS KEMAMPUAN ANALISIS DIMENSI

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



LANJUT • IB & OLIMPIADE

ANALISIS DIMENSI MERAMAL KECEPATAN TSUNAMI

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

2.6 Alat ukur: dari mistar sampai mikrometer

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

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



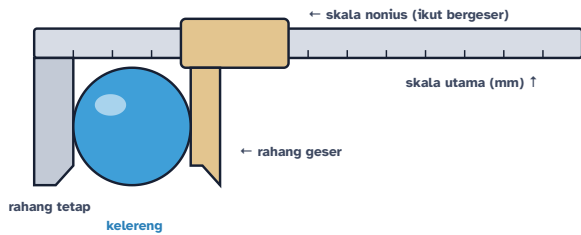
AWAS JEBAKAN: PARALAKS

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

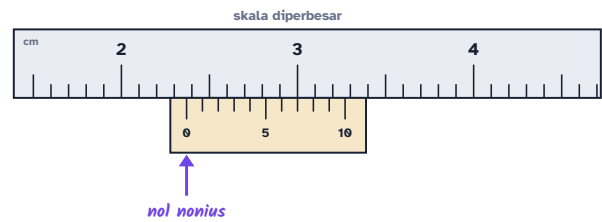
Jangka sorong: penggaris yang punya "kaca pembesar" rahasia

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

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



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



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



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



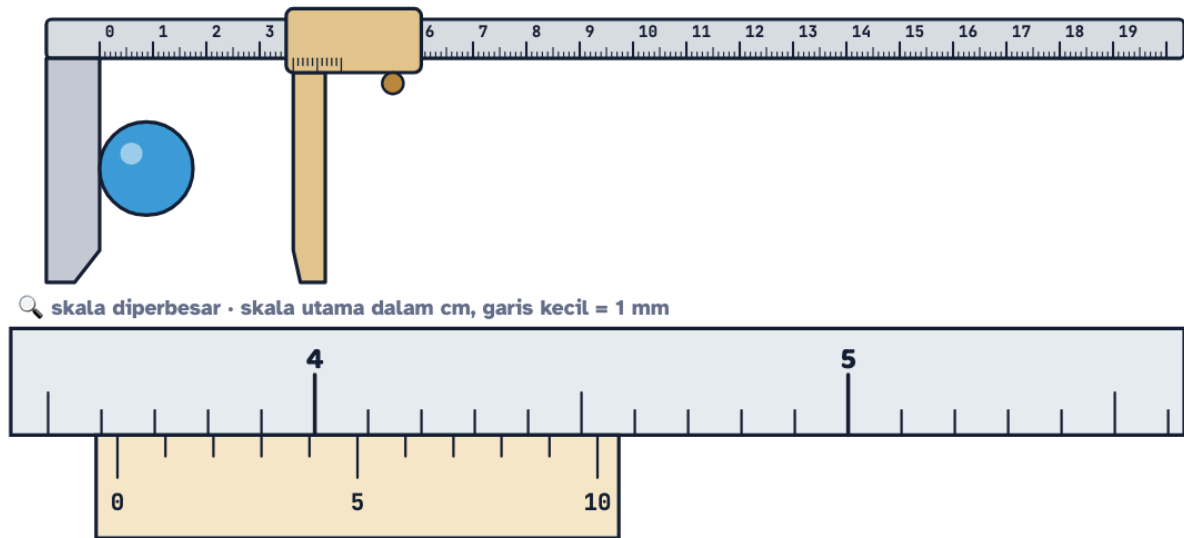
Langkah 4. Cari satu garis nonius yang **paling lurus** (berimpit) dengan sebuah garis skala utama. Di sini garis ke-7, jadi tambahannya $7 \times 0,1 = 0,7$ mm.



garis nonius ke-7 lurus

$$\begin{aligned} 23 \text{ mm} + 7 \times 0,1 \text{ mm} \\ = 23,7 \text{ mm} \\ = 2,37 \text{ cm} \end{aligned}$$

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



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

↔ seret rahang di gambar atas atau di skala perbesaran

Benda

kelereng

Rahang

belum menjepit

Bacaan tepat

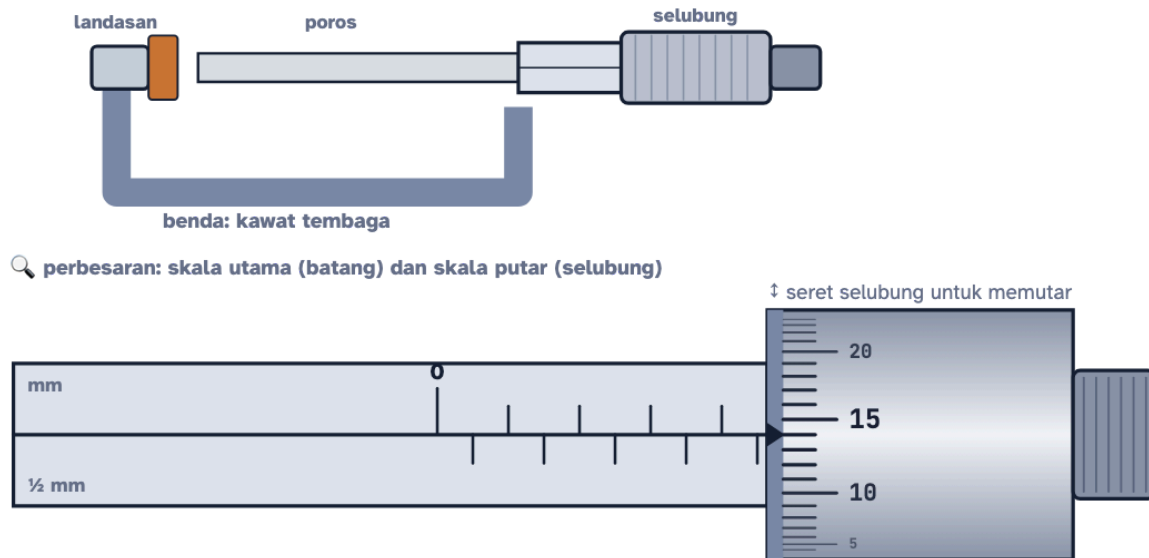
0 dari 0

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

Mikrometer sekrup: memutar sekrup demi 0,01 mm

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

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



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

Benda

kawat tembaga

Poros

belum menjepit

Bacaan tepat

0 dari 0

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

KERJAKAN BERSAMA

Membaca mikrometer

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

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

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

**KESALAHAN NOL DAN KONVENSI KETIDAKPASTIAN**

Jika rahang jangka sorong atau mikrometer ditutup rapat tetapi skala tidak menunjukkan nol, alat itu punya **kesalahan nol**. Misalnya mikrometer menunjukkan $+0,03$ mm saat tertutup. Semua bacaan harus dikurangi $0,03$ mm: hasil = bacaan – kesalahan nol. Ini contoh galat sistematis. Tentang konvensi: banyak buku SMA di Indonesia memakai ketidakpastian $\frac{1}{2}$ nst untuk alat analog. Dalam IB, alat bernonius dan alat digital biasanya diberi ketidakpastian ± 1 nst. Yang penting, tuliskan konvensimu dengan jelas.

2.7 Angka penting, ketidakpastian, presisi, dan akurasi

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

Angka penting (AP)

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

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

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

Ketidakpastian

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

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

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

x Hasil ukur mm

Δx Ketidakpastian mm

KR Ketidakpastian relatif %

KETIDAKPASTIAN RELATIF

0,208
%

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

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

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

Ketidakpastian juga "merambat" ke hasil hitungan:

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

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

1 Luas: $A = 12,0 \times 5,0 = 60 \text{ cm}^2$.

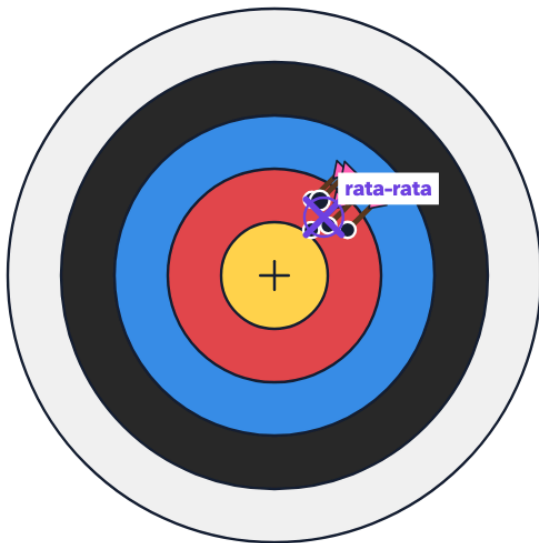
2 Ketidakpastian relatif: $\frac{0,1}{12,0} + \frac{0,1}{5,0} = 0,008 + 0,020 = 0,028 \text{ (2,8\%)}$.

3 Ketidakpastian absolut: $\Delta A = 0,028 \times 60 \approx 1,7 \text{ cm}^2$, dibulatkan menjadi 2 cm^2 .

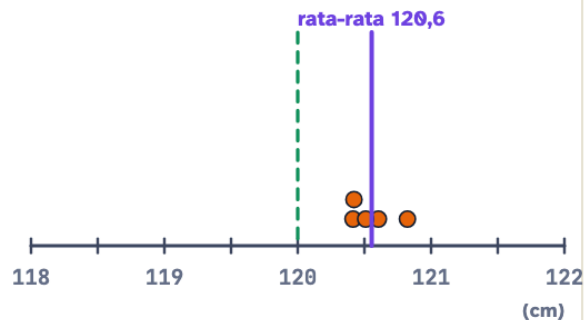
$A = (60 \pm 2) \text{ cm}^2$. Perhatikan: lebar yang pendek menyumbang ketidakpastian relatif terbesar. Untuk memperbaiki hasil, ukur lebarnya dengan alat yang lebih teliti!

Presisi dan akurasi: dua hal yang berbeda

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



Setiap panah = 1 kali mengukur panjang meja
nilai sebenarnya 120,0 cm



Penilaian:

presisi, TIDAK akurat

Galat acak → data menyebar (presisi turun).

Galat sistematis → data bergeser (akurasi turun).

Anak panah

5 / 10

Rata-rata ukur

120,55 cm

Sebaran ($\pm$)

0,17 cm

Penilaian

presisi, TIDAK akurat

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

MITOS

"Presisi dan akurat itu sama saja."

MITOS

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

FAKTA

Presisi

: hasil berulang saling berdekatan.

Akurat

: dekat dengan nilai sebenarnya. Jam dinding yang selalu terlambat tepat 5 menit itu presisi, tetapi tidak akurat.

FAKTA

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

MITOS

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

FAKTA

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



Meteran listrik PLN

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



Meteran air PDAM

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



Pompa SPBU

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



Timbangan pasar

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



GPS di HP

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



"Liter" beras

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

**SIMPANGAN BAKU DAN PENJUMLAHAN KUADRAT**

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

Cek Cepat**Kelajuan 54 km/jam sama dengan...**

54 m/s

15 m/s

150 m/s

5,4 m/s

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

6

5

3

2

Dimensi gaya ($N = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$) adalah...

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

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

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

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

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. C · 3. D



Tantangan Rumah: tebal selebar kertas tanpa mikrometer

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

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

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



RINGKASAN KILAT

Bab 2 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

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



Istilah kunci

Mengukur

satuan

besaran

Sistem Internasional

Besaran turunan

awalan

notasi ilmiah

Dimensi

homogenitas dimensi

nilai skala terkecil

angka penting

ketidakpastian

Presisi

Akurasi

Rumus penting

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

Konversi km/jam → m/s. Cukup bagi dengan 3,6, karena $1 \text{ km/jam} = 1.000 \text{ m} \div 3.600 \text{ s} = 1/3,6 \text{ m/s}$.

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

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

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

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

⚠ Jangan sampai terjebak

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

📖 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=2

🧩 Teka-teki untuk Bab 3

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

▼ Intip petunjuk

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

03

Vektor & Matematika Secukupnya:
Panah, Peta, dan Kemiringan

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

Setelah bab ini, kamu bisa

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

OJEK DAN JARAK YANG MENIPU

KOMIK • 4 PANEL

Sampai di rumah, sore hari

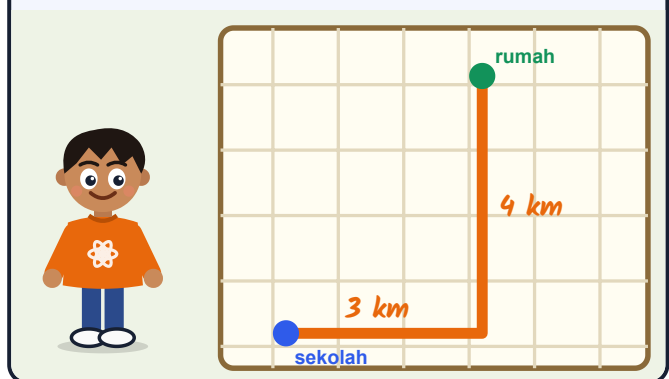
SARI

Aplikasi ojek bilang aku menempuh 7 km.
Padahal rumahku cuma 5 km dari sekolah.
Kok bisa?



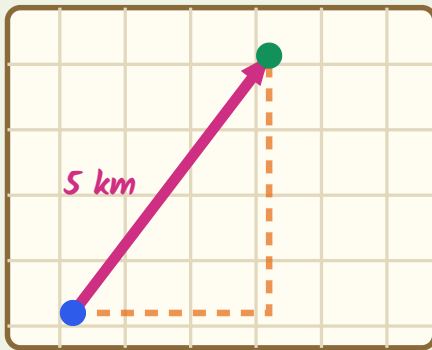
RAKA

Gampang! Kamu lewat 3 km ke timur, lalu
4 km ke utara. $3 + 4 = 7$. Jadi rumahmu 7
km dari sekolah!



SARI

Kalau diukur lurus dari sekolah ke rumah, cuma **5 km**. Segitiga 3-4-5, kan?



Kak Nara menengahi

KAK NARA

Dua-duanya benar! 7 km itu **jarak tempuh**: cuma angka. 5 km ke timur laut itu **perpindahan**: punya besar dan arah. Namanya **vektor**!

RAKA

Panah yang punya arah... vektor!



Tebak Dulu!

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

Pasti 7 N, karena $3 + 4 = 7$.

Pasti 5 N, karena segitiga 3-4-5.

Bisa berapa saja antara 1 N dan 7 N, tergantung arah tarikan mereka.

Pasti 1 N, karena gayanya saling melawan.

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

3.1 Skalar dan vektor

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

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

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

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

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

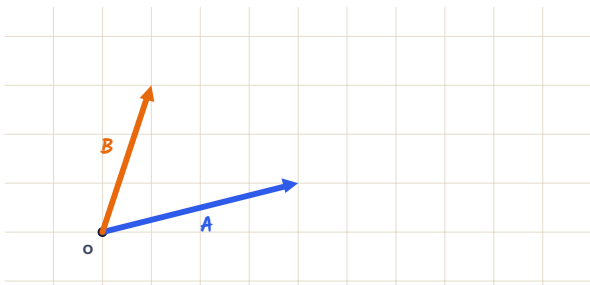


AWAS JEBAKAN: SUDUT ANTARA DUA VEKTOR

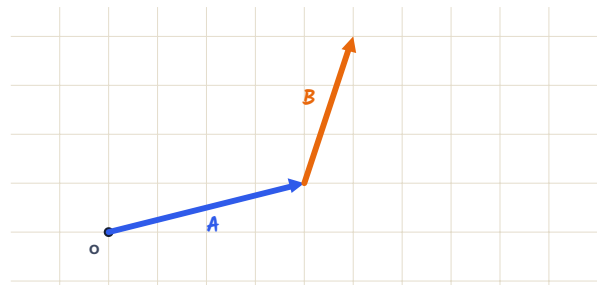
Sudut antara dua vektor diukur ketika **pangkal (ekor) keduanya disatukan**. Kalau kepala satu vektor menempel di ekor vektor lain, sudut yang terlihat di gambar adalah pelurusnya ($180^\circ - \theta$), bukan θ !

3.2 Menjumlahkan dan mengurangi vektor

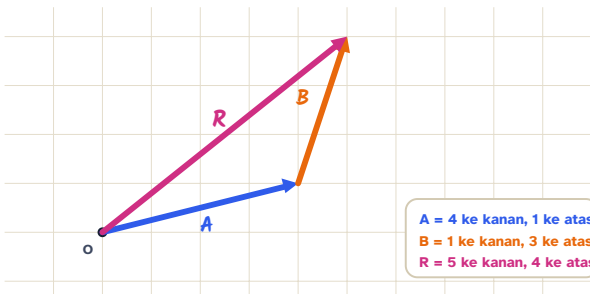
Menjumlahkan vektor artinya mencari satu vektor pengganti yang efeknya sama, yaitu **resultan**. Caranya bisa dengan menggambar:



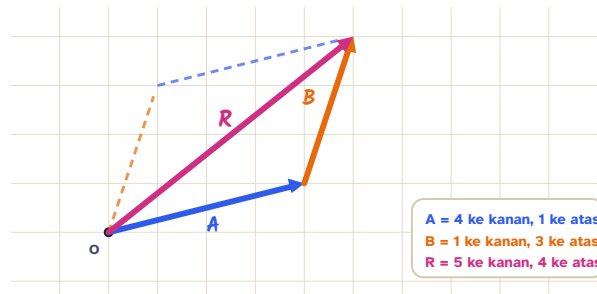
Langkah 1. Dua vektor: A (4 kotak ke kanan, 1 ke atas) dan B (1 kotak ke kanan, 3 ke atas), keduanya berpangkal di O . Berapa $A + B$?



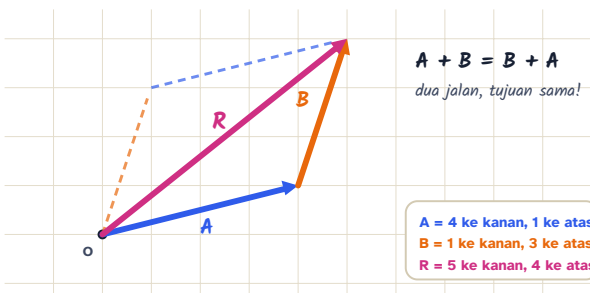
Langkah 2. Metode segitiga (kepala ke ekor): geser B tanpa memutar atau mengubah panjangnya, sampai ekornya menempel di kepala A .



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



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



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

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

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

Searah ($\theta = 0^\circ$) paling besar, berlawanan ($\theta = 180^\circ$) paling kecil, tegak lurus ($\theta = 90^\circ$) jadi Pythagoras.

A Gaya Raka N

B Gaya Sari N

θ Sudut antara keduanya $^\circ$

R Resultan N

RESULTAN

5

N

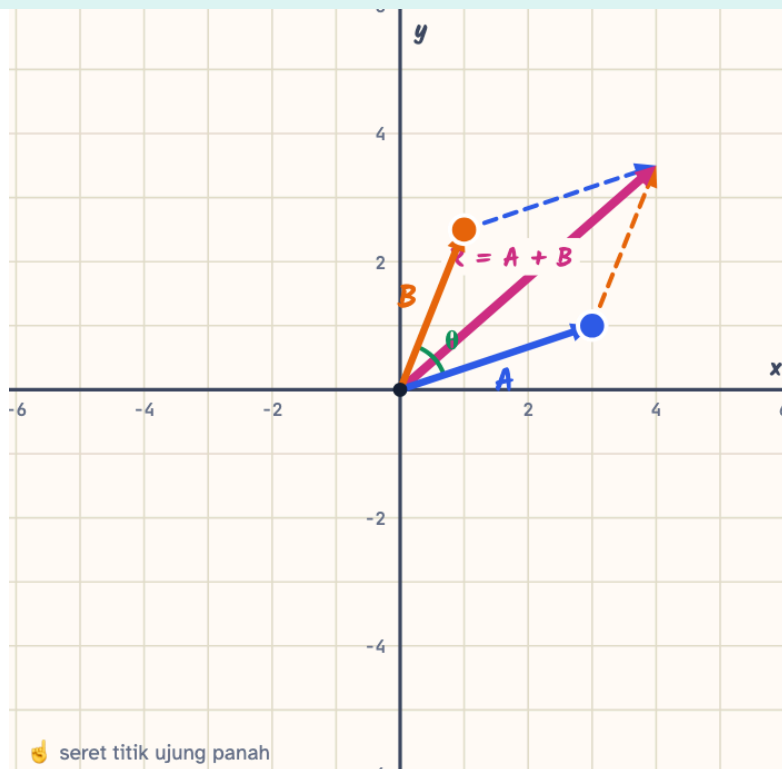
Gaya **3 N** dan **4 N** dengan sudut **90°** menghasilkan resultan **5 N**. Coba $\theta = 0^\circ$, 90° , dan 180° . Resultan selalu di antara selisih dan jumlah kedua gaya.

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

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

LAB MINI Lab vektor: seret ujung panahnya!

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



$$\mathbf{A} = 3\hat{i} + 1\hat{j}$$

$$|\mathbf{A}| = 3,16$$

$$\mathbf{B} = 1\hat{i} + 2,5\hat{j}$$

$$|\mathbf{B}| = 2,69$$

$$\theta \text{ antara A dan B} = 50^\circ$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$$

$$= (3 + 1)\hat{i} + (1 + 2,5)\hat{j}$$

$$= 4\hat{i} + 3,5\hat{j}$$

$$|\mathbf{R}| = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = 5,32$$

$$\text{arah R: } 41^\circ \text{ dari sumbu } +x$$

$$\text{cek: } |\mathbf{R}|^2 = \mathbf{A}^2 + \mathbf{B}^2 + 2\mathbf{A}\mathbf{B} \cos \theta$$

Tekan Tantangan untuk misi.

$|\mathbf{A}|$
3,16

$|\mathbf{B}|$
2,69

Sudut antara A dan B
50 °

Hasil
 $|\mathbf{R}| = 5,32$

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

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

CONTOH Dua tarikan tegak lurus

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

1 Sudutnya 90° , jadi pakai Pythagoras: $R = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{100} = 10 \text{ N}$.

2 Arah: $\tan \alpha = \frac{8}{6}$, sehingga $\alpha \approx 53^\circ$ dari arah timur menuju utara.

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

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

1 $\cos 60^\circ = 0,5$.

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

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

MITOS

"3 N + 4 N pasti 7 N."

MITOS

"Perpindahan sama saja dengan jarak tempuh."

FAKTA

Hanya jika keduanya

searah

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

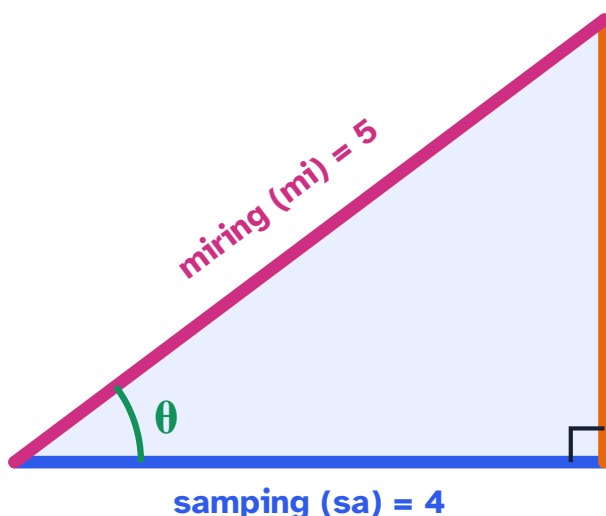
FAKTA

Jarak tempuh adalah panjang lintasan (skalar).

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

3.3 Menguraikan vektor: sindemi, kosami, tandesa

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



$$\sin \theta = \text{de}/\text{mi}$$

$$\text{SIN-DE-MI} \cdot 3/5 = 0,6$$

$$\cos \theta = \text{sa}/\text{mi}$$

$$\text{KO-SA-MI} \cdot 4/5 = 0,8$$

$$\tan \theta = \text{de}/\text{sa}$$

$$\text{TAN-DE-SA} \cdot 3/4 = 0,75$$

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



TRIK KAK NARA: SINDEMI, KOSAMI, TANDESA

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

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

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

RUMUS HIDUP

Komponen mendatar sebuah vektor

$$A_x = A \cos \theta$$

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

 A

Tegangan tali layangan N

 θ Sudut terhadap tanah $^\circ$ A_x

Komponen mendatar N

KOMPONEN MENDATAR

15,97

N

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

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

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

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

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

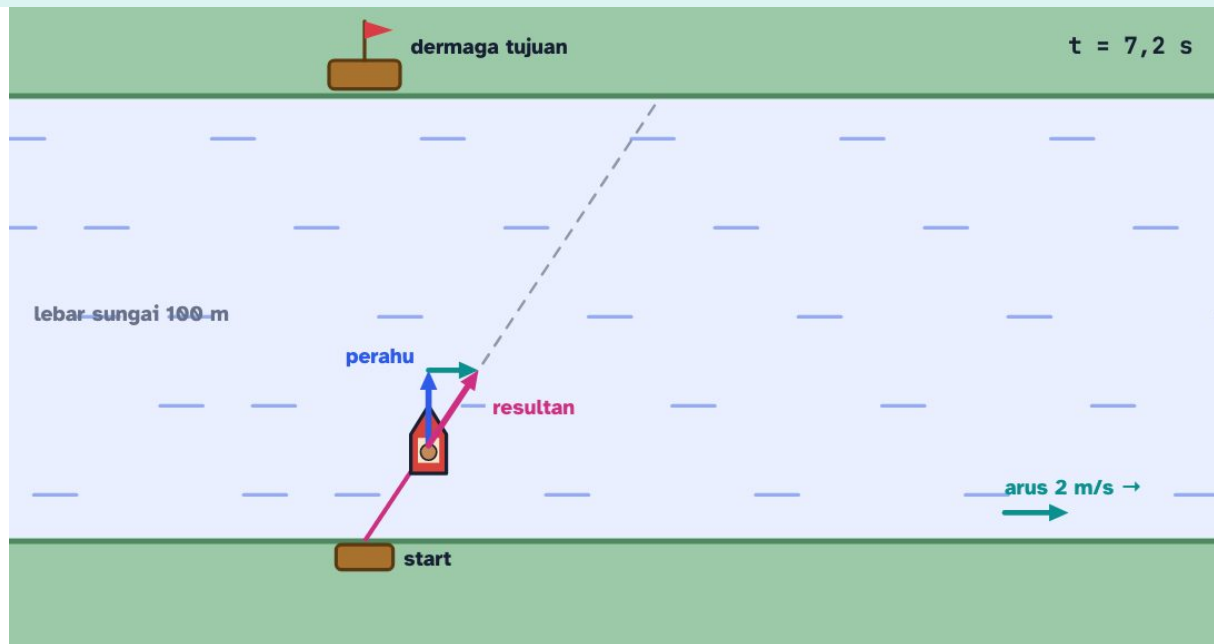
16 N menarik mendatar (mengajak Raka berjalan) dan 12 N menarik ke atas (sedikit mengangkat lengannya).



AWAS JEBAKAN: SUDUT DARI SUMBU YANG MANA?

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

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



Kecepatan resultan
3,61 m/s

Waktu menyeberang
33,3 s

Hanyut dari dermaga
66,7 m

Keadaan
menyeberang...

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



FISIKA INDONESIA

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

3.4

Vektor satuan: $\hat{i}$, $\hat{j}$, $\hat{k}$

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

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

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



TRIK KAK NARA: PISAHKAN DOMPETNYA

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

Vektor posisi $\mathbf{r} = x\hat{i} + y\hat{j}$ menunjuk letak sebuah benda dari titik asal. **Perpindahan** adalah selisih dua vektor posisi: $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$. Vektor satuan searah A diperoleh dengan membagi vektor itu dengan besarnya: $\hat{A} = A/|A|$.

CONTOH Perpindahan ojek di peta

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

1 $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (5 - 2)\hat{i} + (5 - 1)\hat{j} = 3\hat{i} + 4\hat{j} \text{ km.}$

2 $|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ km.}$

$\Delta\mathbf{r} = 3\hat{i} + 4\hat{j} \text{ km, besarnya 5 km, sama seperti di komik!}$



LANJUT • IB & OLIMPIADE

KOSINUS ARAH

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

3.5 Perkalian titik dan perkalian silang

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

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

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \theta = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$$

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

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

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

 F

Gaya tarik N

 s

Perpindahan m

 θ

Sudut gaya dan perpindahan °

 W

Usaha J

USAHA

250

J

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

Satuan Nusantara: $\approx 6\%$ dari 1 kkal (kalori makanan)

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

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

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

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

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

$A = 3\hat{i} + 1\hat{j}$ dan $B = 1\hat{i} + 2\hat{j}$. Hitung $A \cdot B$ dan $A \times B$.

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

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

MITOS

"Perkalian titik dua vektor menghasilkan vektor."

MITOS

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

FAKTA

Perkalian

titik

menghasilkan

skalar

(contoh: usaha). Perkalian

silang

yang menghasilkan vektor (contoh: torsi).

FAKTA

Jika gaya tegak lurus gerak (

$\theta = 90^\circ$

), usahanya nol. Jika berlawanan arah gerak, usahanya negatif. Contohnya gaya gesek yang memperlambat benda.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

HUKUM KOSINUS, HUKUM SINUS, DAN DETERMINAN

Hukum kosinus lahir dari perkalian titik: $|A + B|^2 = (A + B) \cdot (A + B) = A^2 + B^2 + 2A \cdot B$. Pada segitiga vektor $A + B = R$, hukum sinus berlaku: $\frac{A}{\sin \alpha} = \frac{B}{\sin \beta} = \frac{R}{\sin \gamma}$, dengan setiap sudut

berhadapan dengan sisinya. Perkalian silang tiga dimensi paling mudah dihitung dengan

determinan: $A \times B = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$. Volume balok miring (paralelepipedum) yang dibentuk tiga vektor adalah $|A \cdot (B \times C)|$.



TAMU DARI MASA LALU

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

3.6 Grafik dan kemiringan

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

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



Tebak Dulu!

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

Ojek A lebih jauh dari pangkalan.

Ojek A bergerak lebih cepat.

Ojek A sedang naik tanjakan.

Ojek A sedang dipercepat.

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

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

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

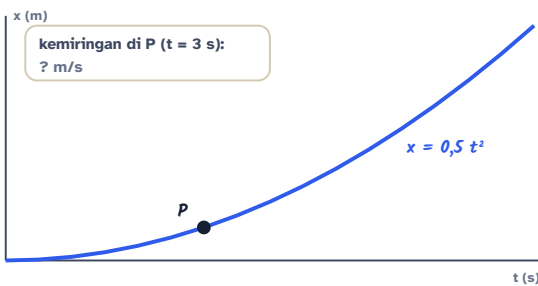


TRIK MELURUSKAN GRAFIK

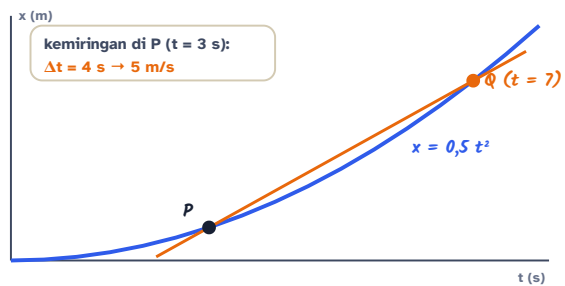
Grafik lengkung sulit dibaca kemiringannya. Triknya: ganti sumbu agar grafiknya lurus. Untuk bandul, $T \propto \sqrt{L}$ melengkung, tetapi T^2 terhadap L lurus dengan kemiringan $4\pi^2/g$. Dari kemiringan itu kita bisa menghitung g . Trik ini sangat sering dipakai dalam praktikum IGCSE dan IB.

3.7 Mini-kalkulus: turunan dan integral

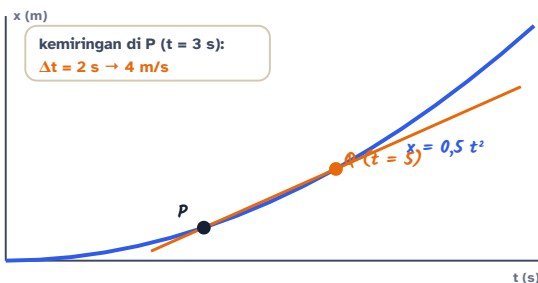
Bagaimana kalau grafiknya melengkung? Kemiringannya berubah di setiap titik. Kecepatan **sesaat** adalah kemiringan **garis singgung** di titik itu. Kalkulus memberi cara menghitungnya. Ikuti animasinya:



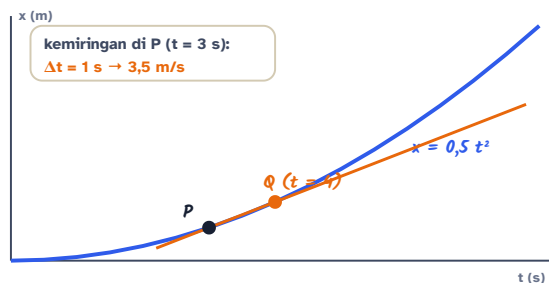
Langkah 1. Posisi motor yang mulai ngegas dari diam: $x = 0,5 t^2$. Berapa kecepatannya tepat pada $t = 3$ s (titik P)? Grafiknya melengkung, jadi kemiringannya terus berubah.



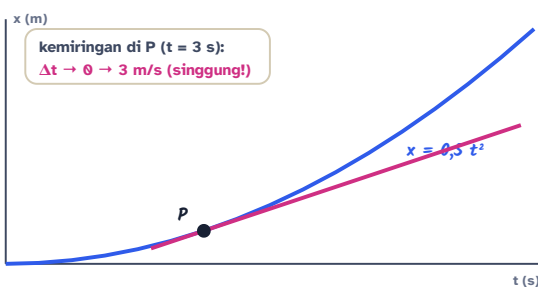
Langkah 2. Ambil titik kedua Q pada $t = 7$ s. Kemiringan **garis potong** PQ: $\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{24,5 - 4,5}{4} = 5$ m/s. Itu kecepatan *rata-rata*, bukan *sesaat*.



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



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



Langkah 5. Jika $\Delta t \rightarrow 0$, garis potong menjadi **garis singgung** dengan kemiringan 3 m/s. Inilah **turunan**: $v = \frac{dx}{dt} = t = 3$ m/s.

Turunan $\frac{dx}{dt}$ adalah laju perubahan sesaat, yaitu kemiringan garis singgung. Untuk fungsi pangkat ada aturan sakti:

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

RUMUS HIDUP Kemiringan garis singgung (turunan)

$$v = \frac{d}{dt} (k t^2) = 2 k t$$

Untuk gerak $x = k t^2$, kemiringan grafik makin curam seiring waktu: motornya makin ngebut!

k

Konstanta k m/s²

t

Saat t s

v

Kecepatan sesaat m/s

KECEPATAN SESAAT

3

m/s

Untuk $x = 0,5 t^2$, kemiringan garis singgung pada $t = 3$ s adalah **3** m/s. Itulah angka yang ditunjukkan spidometer pada saat itu.

Satuan Nusantara: $\approx 2,1 \times$ jalan kaki santai $\cdot \approx 27\%$ dari ojek di jalan kota (± 40 km/jam) $\cdot \approx 3\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

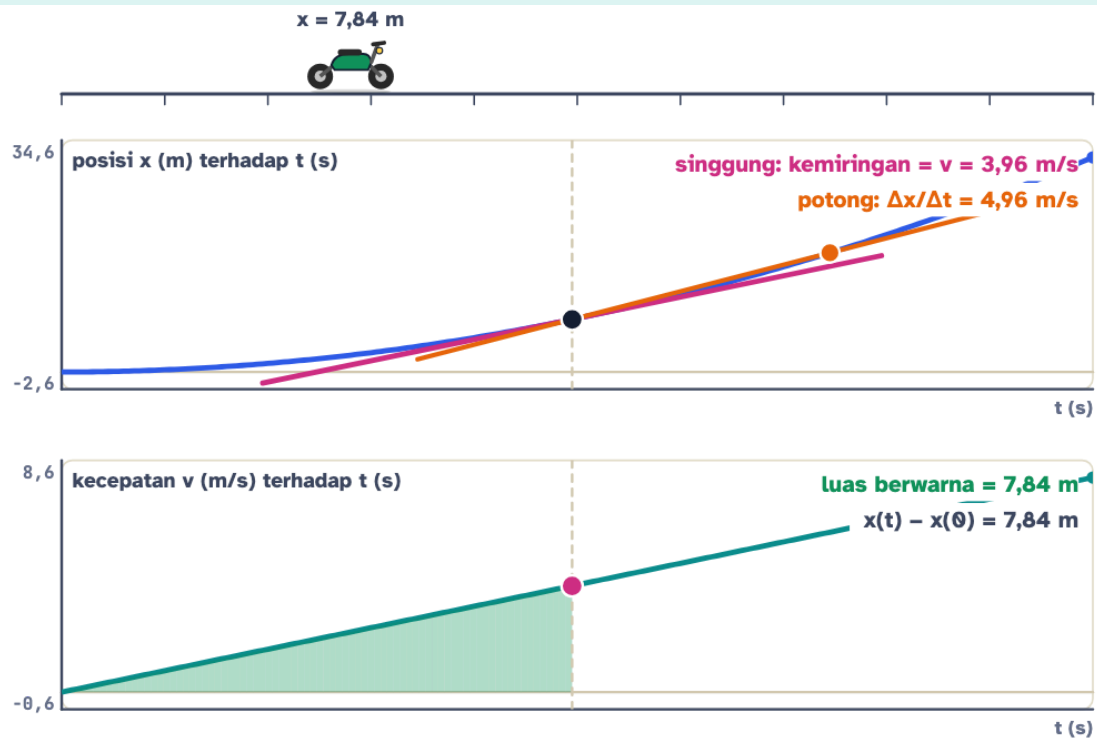
Cek satuan: $\frac{m}{s^2} \times s = \frac{m}{s}$. Satuan turunan = satuan x dibagi satuan t .

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

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

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

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

Posisi $x(t)$ **7,84 m**Kemiringan singgung $= v$ **3,96 m/s**Kemiringan potong $\Delta x / \Delta t$ **4,96 m/s**Luas di bawah v **7,84 m**

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

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

COBA SENDIRI Turunan dua kali

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

- 1 Turunkan sekali: $v = \frac{dx}{dt} = 6t^2 - 6t$. Pada $t = 2$: $v = 24 - 12 = 12$ m/s.
- 2 Turunkan lagi: $a = \frac{dv}{dt} = 12t - 6$. Pada $t = 2$: $a = 24 - 6 = 18$ m/s².
- 3 Cek dengan integral: $\int_0^2 (6t^2 - 6t) dt = [2t^3 - 3t^2]_0^2 = 16 - 12 = 4 \text{ m} = x(2) - x(0)$. ✓

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

**TAMU DARI MASA LALU**

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

**LANJUT • IB & OLIMPIADE****KOTAK ALAT KALKULUS UNTUK OLIMPIADE**

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



Aplikasi ojek

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



Layangan

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



Perahu dan pesawat

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



Spidometer dan odometer

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



Kunci roda motor

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



Gim dan animasi

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

Cek Cepat

Manakah yang merupakan besaran vektor?

massa

suhu

gaya

energi

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

17 N

13 N

7 N

60 N

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

t^3

$3t$

$6t^2$

$6t$

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. D

Tantangan Rumah: peta harta karun 3-4-5

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

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

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

 RINGKASAN KILAT **Bab 3 dalam 3 menit**

✓ Kamu sekarang bisa...

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

🔑 Istilah kunci

skalar

vektor

resultan

menguraikan

radian

vektor satuan

Vektor posisi

Perpindahan

kemiringan

garis singgung

turunan

Turunan

Integral

📊 Rumus penting

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

Resultan dua vektor. Searah ($\theta = 0^\circ$) paling besar, berlawanan ($\theta = 180^\circ$) paling kecil, tegak lurus ($\theta = 90^\circ$) jadi Pythagoras.

$$A_x = A \cos \theta$$

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

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

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

$$v = \frac{d}{dt} (k t^2) = 2 k t$$

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

⚠️ Jangan sampai terjebak

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

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=3

🧩 Teka-teki untuk Bab 4

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

▼ Intip petunjuk

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

04 Gerak Lurus: Cepat, Lambat, dan Makin Ngebut

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

Setelah bab ini, kamu bisa

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

OJEK VS KERETA CEPAT

KOMIK • 4 PANEL

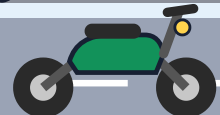
Stasiun kereta cepat, pagi hari

RAKA

Kereta ini bisa 350 km/jam! Semua kendaraan pasti kalah, dari detik pertama!

**SARI**

Lihat jalan di samping rel. Begitu lampu hijau, ojek itu melesat duluan!

**WUSSS!**

RAKA

Lho? Kereta tercepat kok kalah sama ojek?

SARI

Kecepatan puncak itu baru tercapai beberapa menit kemudian, Rak.



KAK NARA

Ojek juara **percepatan**, kereta juara **kecepatan**. Dua hal yang berbeda! Yuk, kita ukur gerak dengan teliti.



kecepatan
 $\neq$
percepatan



Tebak Dulu!

Anggap ojek punya **percepatan** 3 m/s^2 dan kereta cepat $0,5 \text{ m/s}^2$. Keduanya berangkat bersamaan dari keadaan diam. Setelah 5 detik, siapa yang berada di depan?

Kereta cepat, karena kecepatan maksimumnya jauh lebih besar.

Ojek, karena kecepatannya bertambah jauh lebih cepat.

Sama, karena keduanya mulai dari diam pada saat yang sama.

Tidak bisa ditentukan tanpa mengetahui massa kendaraannya.

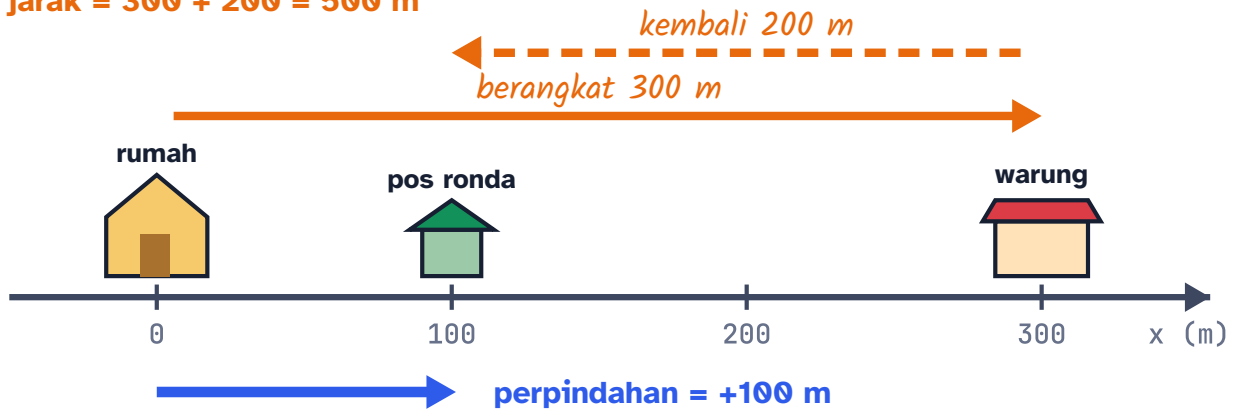
Jawabannya: ojek. Setelah 5 s, kecepatan ojek sudah 15 m/s (54 km/jam) dan ia menempuh $\frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 5^2 = 37,5 \text{ m}$. Kereta cepat baru $2,5 \text{ m/s}$ dan menempuh $6,25 \text{ m}$. Kecepatan puncak 350 km/jam baru penting setelah beberapa menit. Di awal, yang menentukan adalah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

4.1 Posisi, jarak, dan perpindahan

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

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

$$\text{jarak} = 300 + 200 = 500 \text{ m}$$



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

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

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



TRIK KAK NARA: ODOMETER VS GARIS LURUS

Odometer motor menghitung **jarak**: angkanya terus bertambah, ke mana pun kamu pergi.

Perpindahan itu seperti tarik garis lurus dari titik awal ke titik akhir di peta, lalu beri tanda arah.

4.2 Kelajuan dan kecepatan

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

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

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

Yang bergerak	Kelajuan ($\pm$)	Dalam m/s

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



TRIK KAK NARA: BAGI 3,6

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

CONTOH Naik ojek ke sekolah

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

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

Kelajuan rata-ratanya 24 km/jam ($\approx 6,7 \text{ m/s}$). Spidometer mungkin sempat menunjukkan 40 km/jam, tetapi berhenti di lampu merah menurunkan rata-ratanya.



AWAS JEBAKAN: RATA-RATA KELAJUAN $\neq$ KELAJUAN RATA-RATA

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



FISIKA INDONESIA: KERETA CEPAT JAKARTA-BANDUNG

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

4.3 Percepatan: seberapa cepat kecepatan berubah

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

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

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

Situasi	Kecepatan v	Percepatan a
Motor diparkir	0	0
Kereta cepat melaju tetap 350 km/jam di rel lurus	sangat besar	0
Ojek baru lepas dari lampu merah	kecil	besar ($\pm 3 \text{ m/s}^2$)
Bola tepat di puncak lemparan ke atas	0	9,8 m/s ² ke bawah

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

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



AWAS JEBAKAN TANDA

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

MITOS

"Kalau percepatannya nol, berarti bendanya diam."

MITOS

"Spidometer menunjukkan kelajuan rata-rata perjalanan."

FAKTA

Percepatan nol berarti kecepatan

tidak berubah

. Kereta cepat yang melaju tetap 350 km/jam di rel lurus punya percepatan nol, padahal sangat cepat!

FAKTA

Spidometer menunjukkan kelajuan

sesaat

. Kelajuan rata-rata dihitung dari jarak total dibagi waktu total, termasuk saat berhenti di lampu merah.

4.4 GLB: Gerak Lurus Beraturan

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

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

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

CONTOH Mobil di jalan tol

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

1 Ubah waktu ke jam: 20 menit = $\frac{1}{3}$ jam.

2 $s = v t = 90 \times \frac{1}{3} = 30$ km.

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

4.5 GLBB dan tiga persamaan "sakti"

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

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

$$v = v_0 + at$$

Kecepatan akhir = kecepatan awal + (tambahan kecepatan setiap detik $\times$ lamanya).

 v_0

Kecepatan awal m/s

 a Percepatan m/s^2 t

Waktu s

 v

Kecepatan akhir m/s

KECEPATAN AKHIR

10

m/s

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

Satuan Nusantara: $\approx 91\%$ dari ojek di jalan kota (± 40 km/jam) $\cdot \approx 7,1 \times$ jalan kaki santai $\cdot \approx 10\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

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

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

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

$$s = \frac{1}{2}(v_0 + v)t = \frac{1}{2}(v_0 + v_0 + at)t = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

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

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

v_0 Kecepatan awal m/s

a Percepatan m/s²

t Waktu s

s Perpindahan m

PERPINDAHAN

100

m

Bagian GLB: 0×10 . Bagian percepatan: $\frac{1}{2} \times 2 \times 10^2$. Totalnya **100** m dari titik awal.

Satuan Nusantara: $\approx 95\%$ dari panjang lapangan sepak bola $\cdot \approx 76\%$ dari tinggi Monas $\cdot \approx 2\%$ dari tinggi Puncak Jaya

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

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

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

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



TRIK KAK NARA: CARI BESARAN YANG "ABSEN"

GLBB punya lima besaran: v_0, v, a, t, s . Setiap persamaan sakti tidak memuat satu besaran:

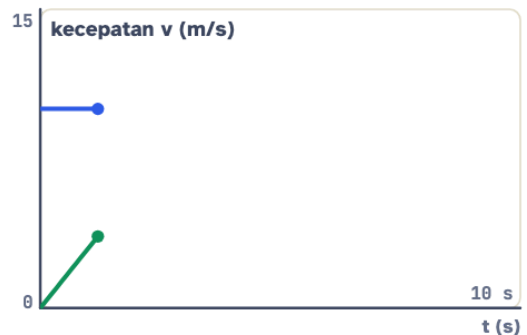
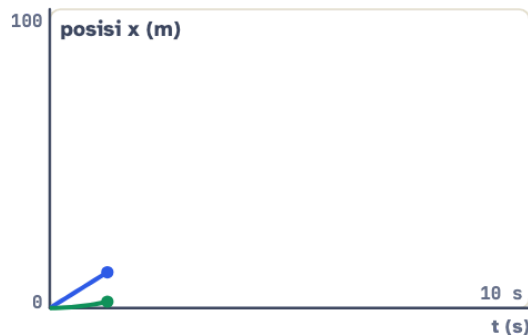
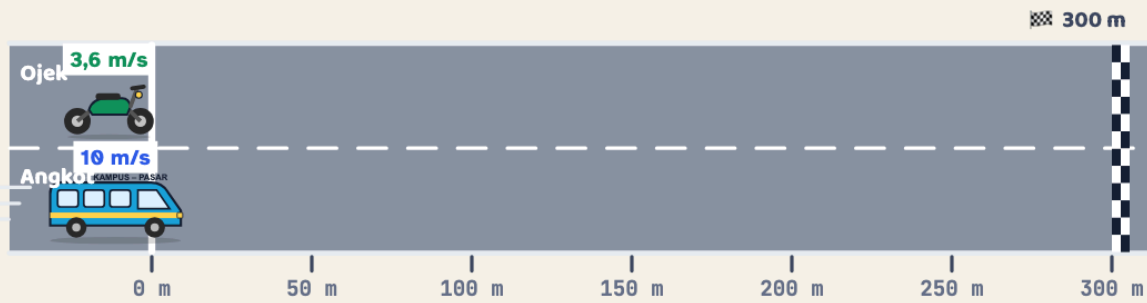
- $v = v_0 + at \rightarrow$ tanpa s
- $s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \rightarrow$ tanpa v
- $v^2 = v_0^2 + 2as \rightarrow$ tanpa t
- bonus: $s = \frac{1}{2}(v_0 + v)t \rightarrow$ tanpa a .

Lihat besaran mana yang tidak diketahui *dan* tidak ditanya, lalu pakai persamaan yang tidak memuatnya.

LAB MINI Balapan grafik: ojek vs angkot

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

Jalan lurus • posisi diukur dari garis start



Waktu

1,2 s

Posisi ojek

2,2 m

Posisi angkot

12 m

Keadaan

Angkot unggul 9,8 m

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

CONTOH Angkot mulai jalan

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

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

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

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

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

Perlambatannya 1 m/s^2 (tanda negatif = melawan arah gerak), selama 20 s. Perlambatan kecil ini disengaja agar penumpang yang berdiri tidak terhuyung.

Jarak henti: mengapa ngebut itu berbahaya

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

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

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

v Kecepatan m/s

t_r Waktu reaksi s

a Perlambatan rem m/s²

d Jarak henti m

JARAK HENTI

53,3

m

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

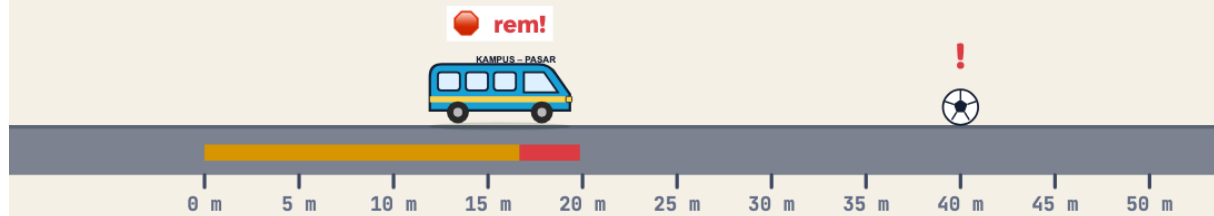
Satuan Nusantara: $\approx 51\%$ dari panjang lapangan sepak bola $\cdot \approx 40\%$ dari tinggi Monas $\cdot \approx 36 \times$ tinggi Raka

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

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

55 km/jam

kuning = jarak reaksi • merah = jarak pengereman



Bandingkan

60 km/jam → 36,5 m**120 km/jam** → 112,7 m

2x lebih cepat: jarak rem 4x!

bola di 40 m

Jarak reaksi

16,7 m

Jarak pengereman

3,2 m

Jarak henti

19,9 m

Keadaan

Mengerem!

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

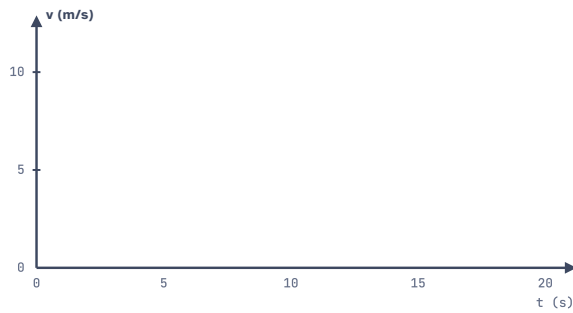
**FISIKA INDONESIA: JAGA JARAK DI JALAN TOL**

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

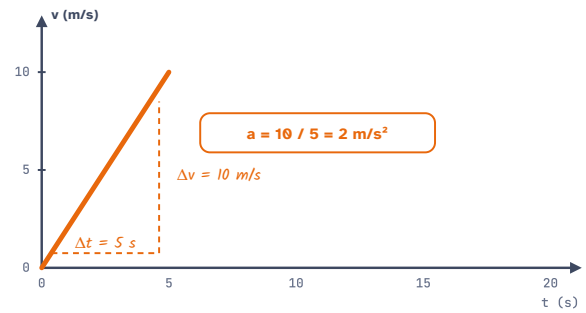
4.6 Membaca grafik: kemiringan dan luas

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

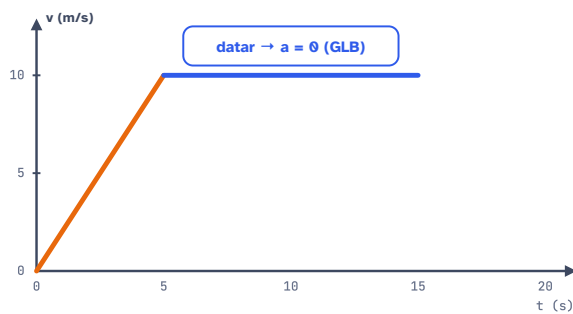
- **Kemiringan** grafik x-t = kecepatan. Kemiringan grafik v-t = percepatan.
- **Luas** di bawah grafik v-t = perpindahan. Luas di bawah grafik a-t = perubahan kecepatan.



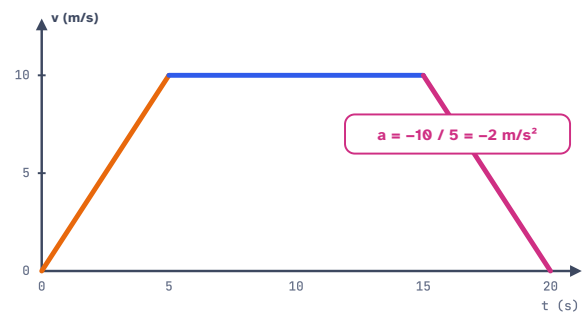
Langkah 1. Grafik v-t angkot dari satu halte ke halte berikutnya. Sumbu datar adalah waktu, sumbu tegak adalah kecepatan.



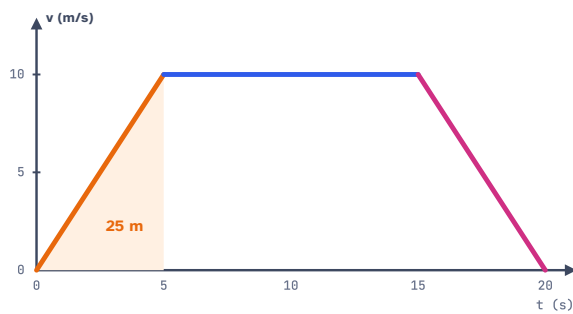
Langkah 2. Detik 0–5: kecepatan naik dari 0 ke 10 m/s. Kemiringan = $\Delta v / \Delta t = 2 \text{ m/s}^2$. Itulah percepatannya.



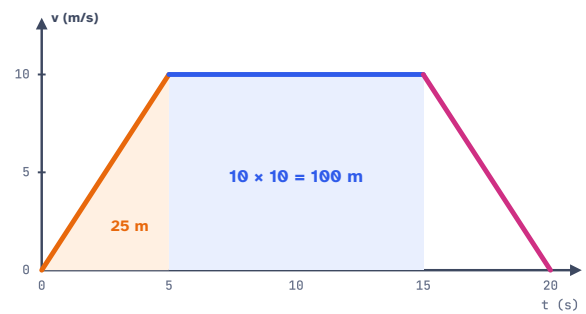
Langkah 3. Detik 5–15: garis datar. Kecepatan tetap 10 m/s, percepatan nol (GLB).



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



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



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



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

	grafik x-t	grafik v-t	grafik a-t
Diam			
GLB			
GLBB dipercepat			
GLBB diperlambat			

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



AWAS JEBAKAN: GRAFIK BUKAN GAMBAR JALAN

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



LANJUT • IB & OLIMPIADE

KALKULUS: BAHASA ASLI GERAK

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

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Sebaliknya, luas di bawah grafik adalah integral: $x = x_0 + \int_0^t v \, dt$. Jika a tetap, $v = v_0 + at$ dan integralnya memberi $x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$, tepat persamaan sakti kedua. Dengan kalkulus, kamu juga bisa menangani gerak yang percepatannya *tidak* tetap, misalnya $x = t^3 - 6t^2 + 9t$: kecepatannya $v = 3t^2 - 12t + 9$, yang bernilai nol pada $t = 1$ s dan $t = 3$ s (saat benda berbalik arah).

4.7 Gerak vertikal dan jatuh bebas



TAMU DARI MASA LALU

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

Tanpa hambatan udara, semua benda di dekat permukaan Bumi jatuh dengan percepatan yang sama, yaitu **percepatan gravitasi** $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$ (sering dibulatkan 10 m/s^2). Gerak ini disebut **jatuh bebas**, yaitu GLBB dengan $v_0 = 0$ dan $a = g$:

$$h = \frac{1}{2}gt^2, \quad v = gt, \quad v = \sqrt{2gh}$$

RUMUS HIDUP

Kecepatan jatuh bebas

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

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

 h

Ketinggian m

 g Percepatan gravitasi m/s^2 v Kecepatan saat tiba m/s

KECEPATAN SAAT TIBA

19,8

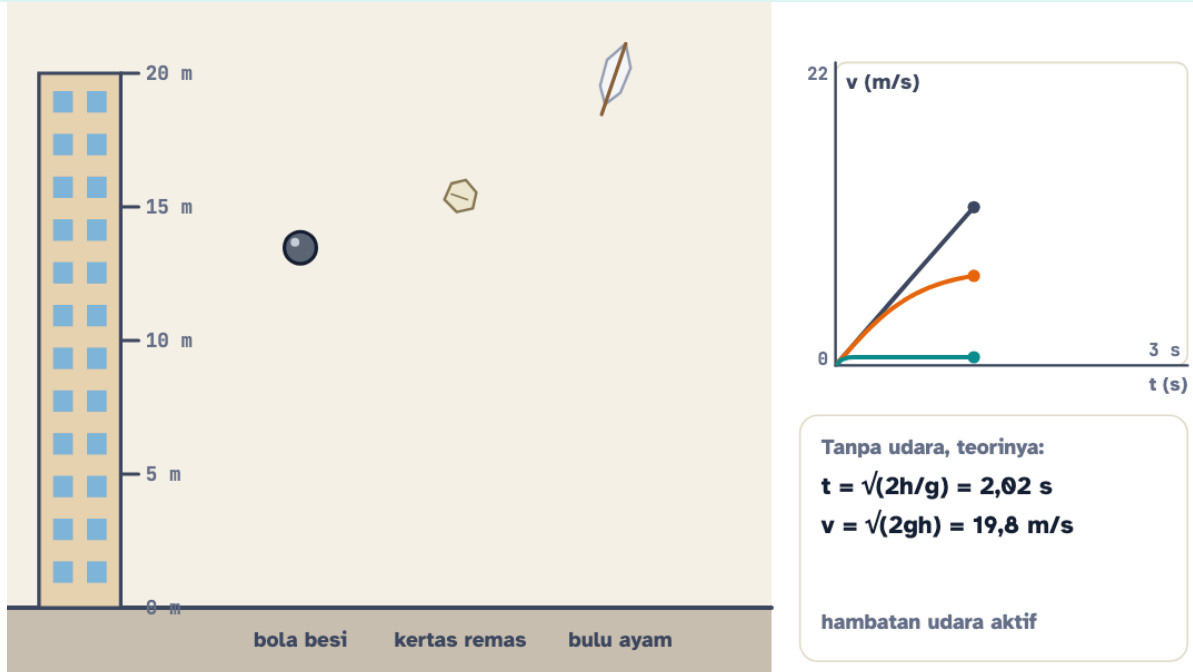
m/s

Dijatuhkan dari **20** m dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, benda tiba dengan kecepatan **19,8** m/s (hambatan udara diabaikan).

Satuan Nusantara: $\approx 1,8 \times$ ojek di jalan kota ($\pm 40 \text{ km/jam}$) $\cdot \approx 20\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)
 $\cdot \approx 14 \times$ jalan kaki santai

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

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



Waktu

1,2 s

v bola besi

11,7 m/s

v kertas

6,5 m/s

v bulu

0,6 m/s

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

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

$$v = v_0 - gt, \quad h = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2, \quad v^2 = v_0^2 - 2gh$$

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



Tebak Dulu!

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

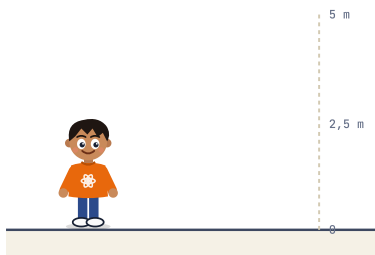
Nol, karena bola sedang diam.

$9,8 \text{ m/s}^2$ ke atas, karena bola baru saja naik.

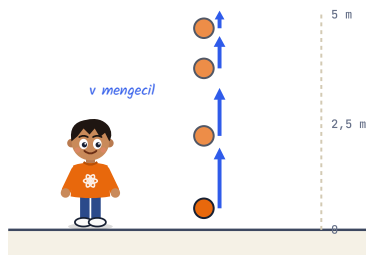
$9,8 \text{ m/s}^2$ ke bawah, sama seperti saat naik dan turun.

Berubah-ubah, dari ke atas menjadi ke bawah.

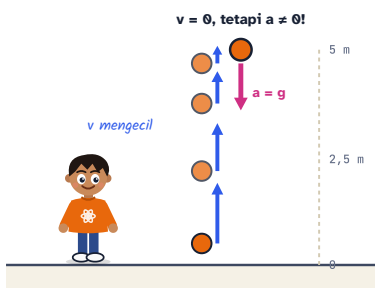
Jawabannya: $9,8 \text{ m/s}^2$ ke bawah. Kecepatan bola memang nol sesaat, tetapi kecepatannya sedang *berubah*: sedetik sebelumnya $+9,8 \text{ m/s}$, sedetik kemudian $-9,8 \text{ m/s}$. Perubahan kecepatan berarti ada percepatan. Gravitasi tidak pernah "libur" di puncak. Seandainya percepatannya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



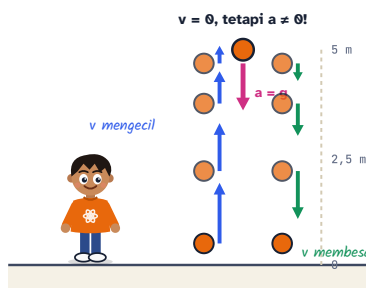
Langkah 1. Raka melempar bola lurus ke atas dengan kecepatan 10 m/s . Kita pakai $g = 10 \text{ m/s}^2$.



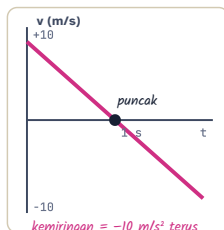
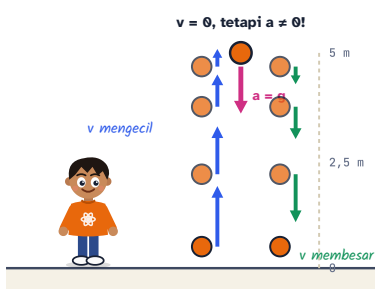
Langkah 2. Saat naik, setiap $0,25 \text{ s}$ kecepatan berkurang $2,5 \text{ m/s}$: $10 \rightarrow 7,5 \rightarrow 5 \rightarrow 2,5 \text{ m/s}$. Panah biru makin pendek.



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



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



Langkah 5. Grafik v - t -nya hanya satu garis lurus dari $+10$ ke -10 m/s . Kemiringannya selalu -10 m/s^2 , termasuk tepat di puncak.

MITOS

"Benda yang lebih berat selalu jatuh lebih cepat."

MITOS

"Di puncak lemparan, bola tidak punya percepatan."

FAKTA

Tanpa udara, semua benda jatuh dengan percepatan

g

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

FAKTA

Di puncak,

$v = 0$

sesaat, tetapi

$a = g$

ke bawah. Gravitasi tetap bekerja. Tanpa percepatan itu, bola tidak akan pernah turun lagi.

COBA SENDIRI Batu di sumur tua

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

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

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

4.8 Kecepatan relatif: dua motor berpapasan

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

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

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

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

KERJAKAN BERSAMA **Kapan mereka bertemu?**

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

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

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



FAKTA UNIK DARI TARSU

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



LANJUT • OLIMPIADE

PINDAH KERANGKA ACUAN

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



Spidometer & odometer

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



Ojek online & peta digital

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



Lampu kuning

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



Percepatan yang nyaman

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



Cek Cepat

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

48 m

3 m

12 m

24 m

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

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

$v = 0$ dan $a = 0$

v maksimum dan $a = 0$

$v = g$ dan $a = 0$

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

105 km/jam

60 km/jam

15 km/jam

0 km/jam

Kunci Cek Cepat: 1. D • 2. A • 3. C



Tantangan Rumah: ukur waktu reaksimu dengan penggaris

Bahan: penggaris 30 cm, seorang teman, alat tulis

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

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



✓ **Kamu sekarang bisa...**

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



Istilah kunci

bergerak

Jarak

Perpindahan

kelajuan sesaat

percepatan

perlambatan

Gerak lurus beraturan (GLB)

Gerak lurus berubah beraturan (GLBB)

percepatan gravitasi

jatuh bebas



Rumus penting

$$v = v_0 + at$$

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

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

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

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

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

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

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



Jangan sampai terjebak

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



Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=4

Teka-teki untuk Bab 5

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

▼ Intip petunjuk

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

05 Gerak Parabola: Seni Melempar Sandal ke Mangga

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

Setelah bab ini, kamu bisa

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

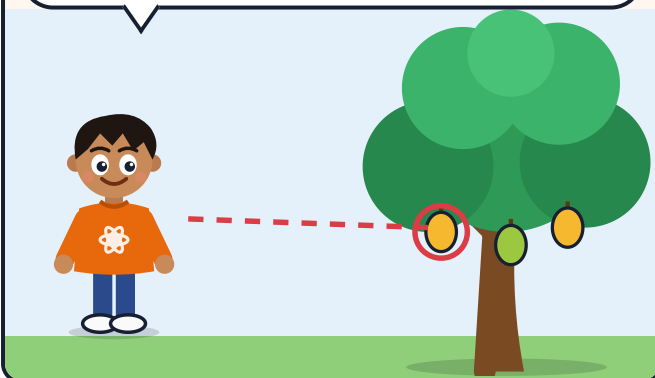
SANDAL VS MANGGA

KOMIK • 4 PANEL

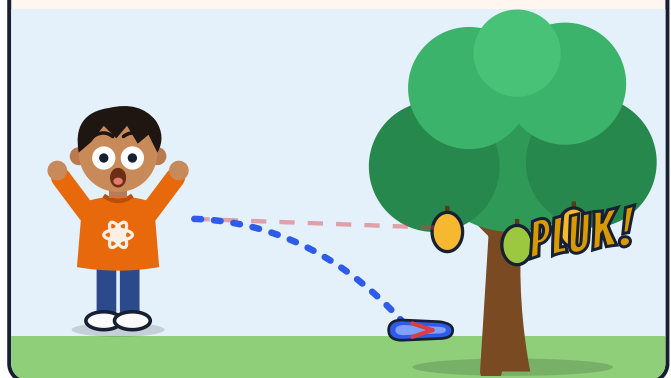
Halaman rumah Nenek

RAKA

Mangganya tepat di sana. Aku bidik lurus ke arahnya... pasti kena!

**RAKA**

Lho?! Sandalnya malah melengkung turun, lewat di bawah mangga!



SARI

Begitu lepas dari tanganmu, gravitasi langsung menarik sandal itu ke bawah, Rak.

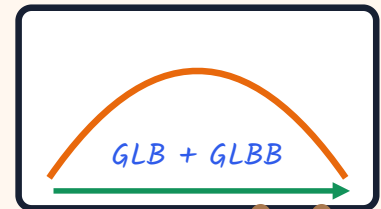
RAKA

Jadi aku harus membidik lebih tinggi dari mangganya?



KAK NARA

Benar! Gerak mendatar dan gerak naik-turun berjalan bersamaan tanpa saling ganggu. Hasilnya: **parabola!**



5.1 Dua gerak sekaligus



Tebak Dulu!

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

Kelereng A, karena lintasannya lebih pendek.

Kelereng B, karena geraknya lebih cepat.

Keduanya bersamaan.

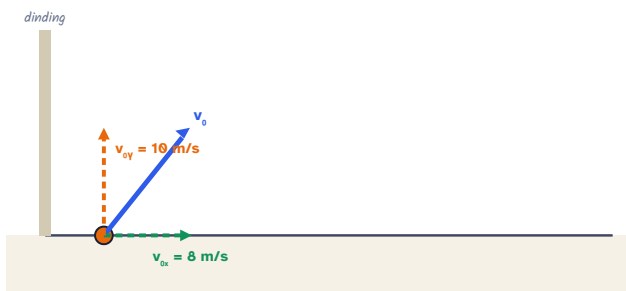
Tergantung seberapa keras B disentil.

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

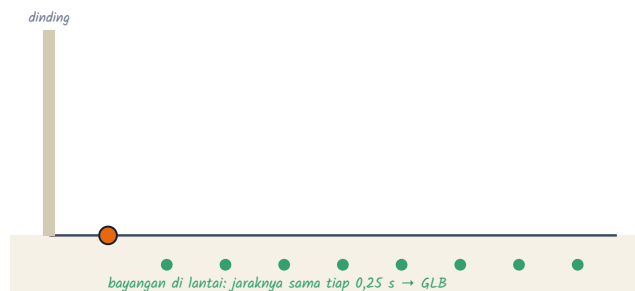
Gerak sandal, bola tendangan, atau air dari selang disebut **gerak parabola** (gerak peluru). Kuncinya satu kalimat: gerak mendatar dan gerak vertikal berlangsung bersamaan, tetapi saling bebas.

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

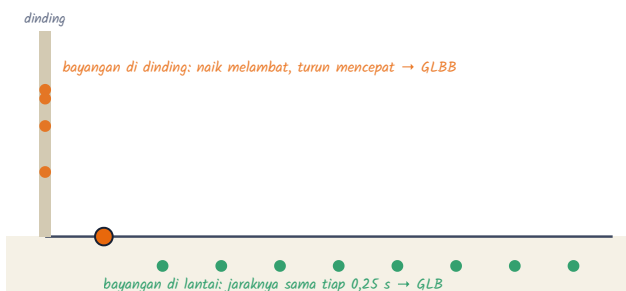
Bahasa sederhana • Gampangnya: bayangkan dua bayangan bola. Bayangan di lantai bergerak rata seperti mobil di jalan tol. Bayangan di dinding naik lalu turun seperti bola yang dilempar ke atas. Bola aslinya melakukan dua-duanya sekaligus, sehingga lintasannya melengkung.



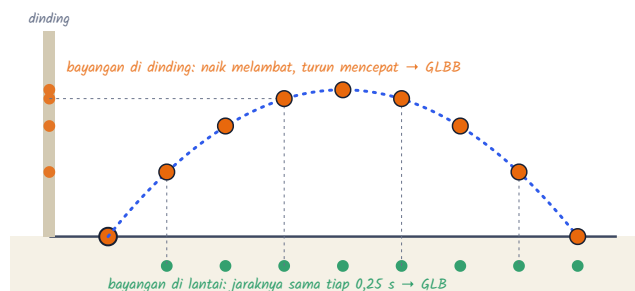
Langkah 1. Bola ditendang dengan kecepatan awal v_0 . Uraikan menjadi komponen mendatar $v_{0x} = 8 \text{ m/s}$ dan komponen tegak $v_{0y} = 10 \text{ m/s}$ (pakai $g = 10 \text{ m/s}^2$).



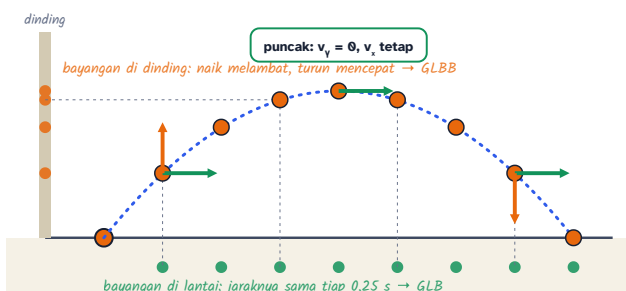
Langkah 2. Lihat bayangan bola di lantai (seperti disinari lampu dari atas). Setiap 0,25 s bayangan bergeser 2 m: **GLB** dengan 8 m/s.



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



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



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

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

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



TAMU DARI MASA LALU

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

5.2 Waktu terbang, tinggi maksimum, dan jangkauan

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

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

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

Jangkauan sebanding dengan kuadrat kecepatan awal. Sudut 45° paling jauh, dan sudut θ serta $90^\circ - \theta$ memberi jangkauan yang sama.

v_0 Kecepatan awal m/s

θ Sudut lempar $^\circ$

R Jangkauan m

JANGKAUAN

19,9

m

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

Satuan Nusantara: $\approx 19\%$ dari panjang lapangan sepak bola $\cdot \approx 15\%$ dari tinggi Monas $\cdot \approx 13 \times$ tinggi Raka

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

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

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

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

 v_0

Kecepatan awal m/s

 θ

Sudut lempar °

 H

Tinggi maksimum m

TINGGI MAKSIMUM

8,6

m

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

Satuan Nusantara: $\approx 5,7 \times$ tinggi Raka $\cdot \approx 8\%$ dari panjang lapangan sepak bola $\cdot \approx 7\%$ dari tinggi Monas

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

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



Tebak Dulu!

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

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

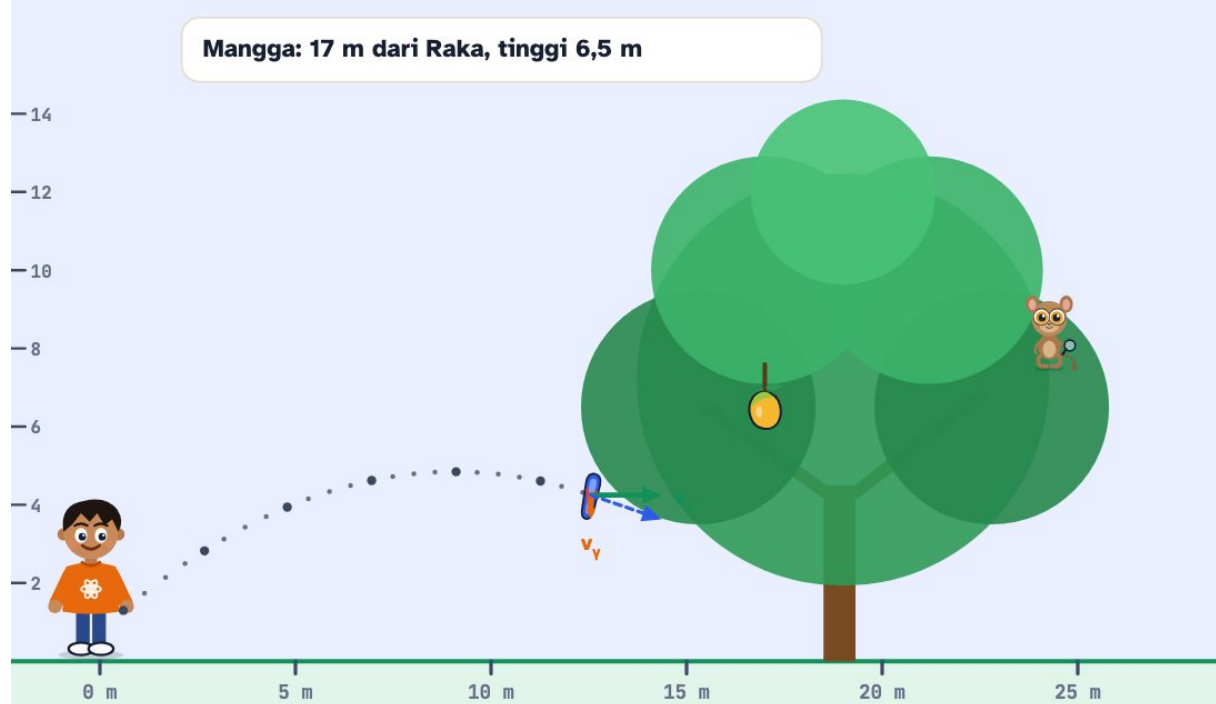
Tidak, sandal tetap lewat di bawah mangga.

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

Hanya kena jika sudut lemparnya tepat 45° .

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

LAB MINI
Gim: lempar sandal, jatuhkan mangga!

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


Waktu

1,2 s

Jarak mendatar

12,6 m

Tinggi

4,2 m

Skor

0 kena / 1 lempar

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

CONTOH
Tendangan dari tanah

Bola ditendang dengan kecepatan 20 m/s pada sudut 30° terhadap tanah datar. Gunakan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Hitung waktu terbang, tinggi maksimum, dan jangkauannya.

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

Bola terbang 2 s, naik sampai 5 m, dan mendarat $\pm 34,6 \text{ m}$ dari titik tendang.

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

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

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



LANJUT • IB & OLIMPIADE

PERSAMAAN LINTASAN DAN PARABOLA DI LERENG

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

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

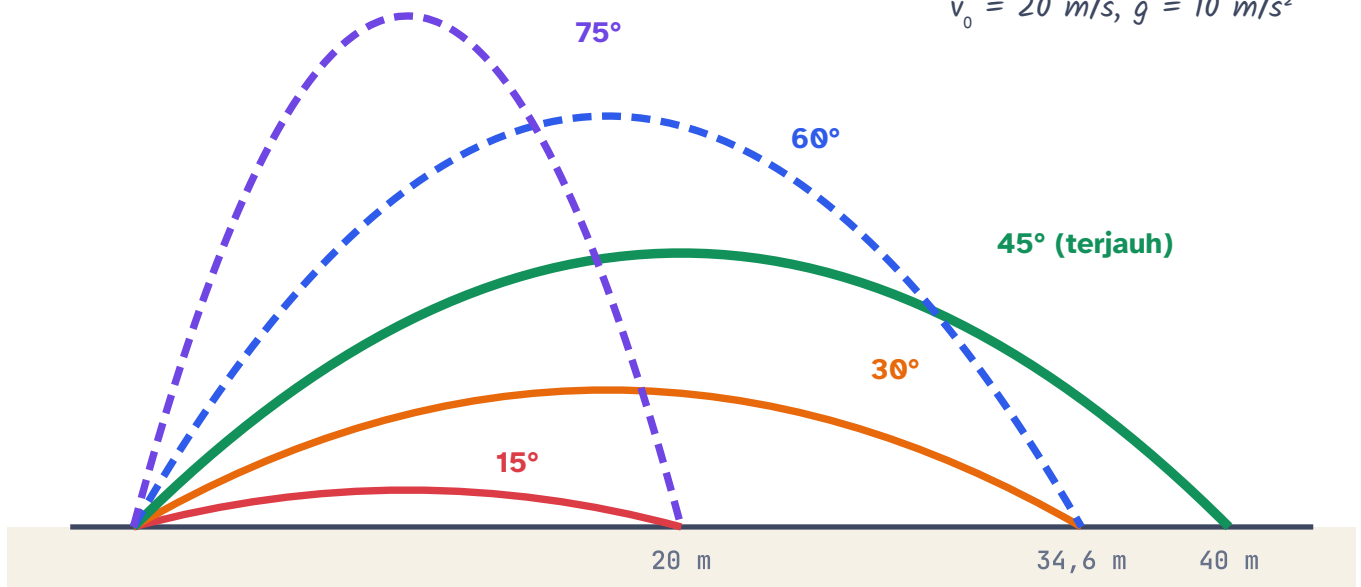
Ini fungsi kuadrat dalam x , bukti matematis bahwa lintasannya parabola. Persamaan ini juga menjawab soal "sudut berapa agar bola melewati titik (x, y) ?". Jika bola ditembakkan ke atas lereng bersudut α , jangkauan sepanjang lereng adalah $R = \frac{2v_0^2 \cos \theta \sin(\theta - \alpha)}{g \cos^2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

5.3 Sudut 45° dan pasangan sudut kembar

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

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

$$v_0 = 20 \text{ m/s}, g = 10 \text{ m/s}^2$$



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

LAB MINI

Penyiram taman: cari dua sudut yang mengenai pot

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

$\theta = 30^\circ$

Cari sudut yang tepat mengenai pot



Jangkauan θ
8,84 m

Jangkauan $90^\circ - \theta$
—

Tinggi maks
1,28 m

Sudut yang mengenai pot
belum ada

Air keluar dari penyiram di permukaan tanah. Geser sudutnya sampai air mengenai pot bunga. Lalu cari **sudut kedua** yang juga mengenai pot yang sama! Nyalakan "pasangan $90^\circ - \theta$ " untuk melihat aliran kembarnya.



TRIK KAK NARA: PASANGAN "JUMLAH 90"

Jangkauan sama untuk pasangan sudut yang jumlahnya 90°: 10° & 80°, 20° & 70°, 37° & 53°.

Pemain basket memilih sudut curam agar bola jatuh hampir tegak ke ring, sedangkan pemain voli yang men-*smash* memilih lintasan landai agar bola cepat sampai.

MITOS

"Di titik tertinggi lintasan, kecepatan bola nol."

MITOS

"Sudut 45° selalu memberi lemparan terjauh."

FAKTA

Hanya komponen vertikalnya yang nol. Komponen mendatar tetap

$$v_0 \cos \theta$$

. Di puncak, bola justru bergerak paling

lambat

, tetapi tidak berhenti.

FAKTA

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

di bawah
45°.

5.4 Dilempar mendatar dari ketinggian

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

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

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

Waktu jatuh hanya ditentukan oleh ketinggian. Jarak mendatar = kecepatan mendatar $\times$ waktu jatuh itu.

 v

Kecepatan mendatar m/s

 h

Ketinggian m

 x

Jarak mendatar m

JARAK MENDATAR

20,2

m

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

Satuan Nusantara: $\approx 19\%$ dari panjang lapangan sepak bola $\cdot \approx 15\%$ dari tinggi Monas $\cdot \approx 13 \times$ tinggi Raka

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

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



AWAS JEBAKAN

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

Helikopter terbang mendatar 20 m/s pada ketinggian 80 m untuk mengirim paket bantuan ke desa yang terisolasi banjir. Agar paket jatuh tepat di lapangan desa, berapa meter sebelum lapangan paket harus dilepas? ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$, abaikan hambatan udara.) Mengapa di dunia nyata paket diberi parasut?

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

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

5.5 Hambatan udara: ketika parabola "penyok"

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

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



FISIKA INDONESIA: KOK YANG "JATUH TEGAK"

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

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

5.6 Perahu menyeberang sungai

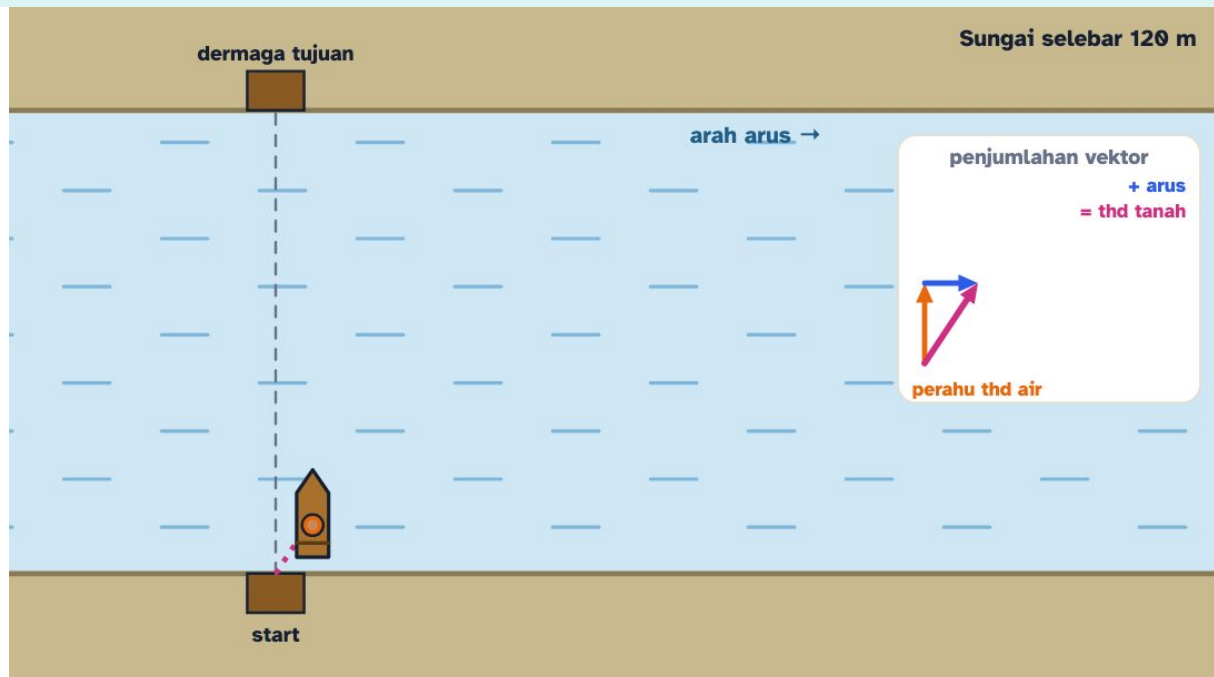
Di Bab 4 kamu menjumlahkan kecepatan dalam satu garis. Sekarang arahnya berbeda-beda, jadi kecepatan dijumlahkan sebagai **vektor**:

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

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

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

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



Kecepatan thd tanah

3,61 m/s

Waktu

4,8 s

Hanyut

9,6 m

Keadaan

Menyeberang... (waktu dipercepat 4×)

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

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

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

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



FISIKA INDONESIA: SUNGAI SEBAGAI JALAN RAYA

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

5.7 Hujan dan payung miring

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

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

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

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

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

 v_{orang}

Kecepatanmu m/s

 v_{hujan}

Kecepatan jatuh hujan m/s

 θ

Sudut miring dari tegak °

SUDUT MIRING DARI TEGAK

14

°

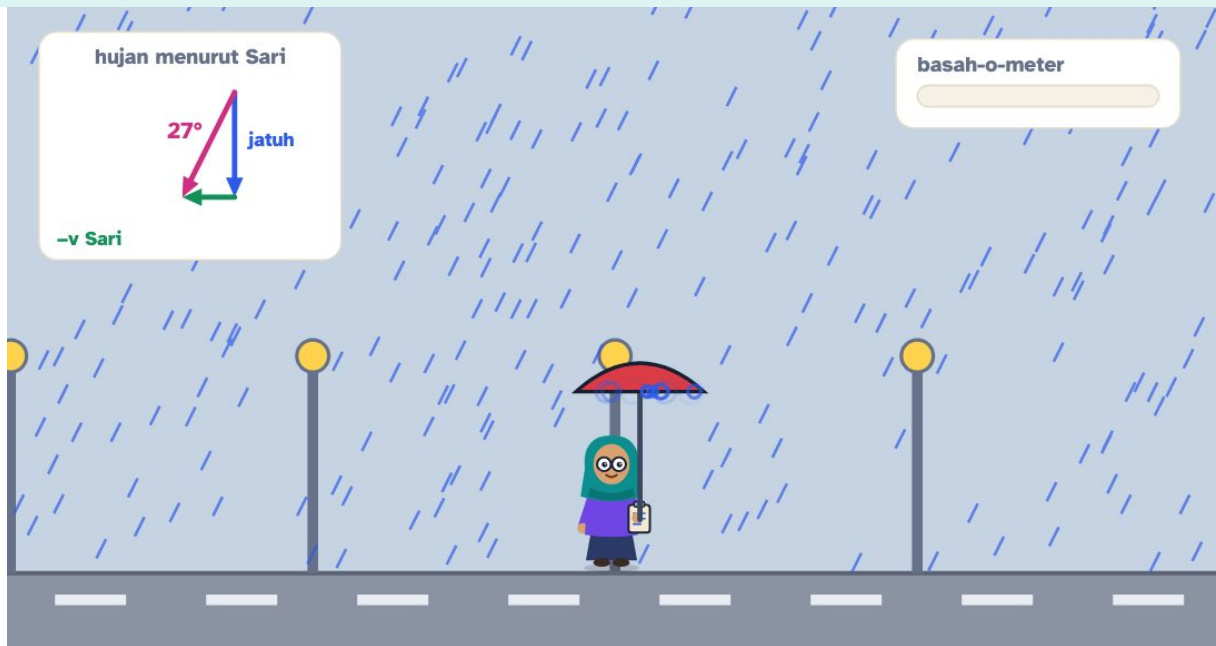
Berjalan **1,5** m/s di bawah hujan yang jatuh **6** m/s → hujan tampak datang dari depan dengan sudut **14°** dari arah tegak. Condongkan payungmu ke depan sebesar itu.

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

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

LAB MINI Sari, payung, dan hujan

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



Sudut hujan menurut Sari
26,6 °

Basah-o-meter
0 tetes/s

Saran
Miringkan $\pm 27^\circ$ ke depan

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

MITOS

"Kalau hujannya tampak miring, pasti ada angin."

MITOS

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

FAKTA

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

FAKTA

Gerak vertikal tidak peduli pada gerak mendatar. Dari ketinggian yang sama, keduanya menyentuh tanah

bersamaan

(tanpa hambatan udara). Yang dilempar hanya mendarat lebih jauh.



LANJUT • OLIMPIADE

LARI ATAU JALAN SAAT HUJAN?

Modelkan tubuhmu sebagai kotak dengan luas atas A_{atas} dan luas depan A_{depan} . Hujan berkerapatan ρ (kg air per m^3 udara) jatuh tegak dengan kelajuan u , dan kamu menempuh jarak L dengan kelajuan v . Air yang mengenai kepala sebanding dengan *waktu*: $\rho A_{\text{atas}} u (L/v)$. Air yang mengenai bagian depan sebanding dengan *jarak*: $\rho A_{\text{depan}} L$, tidak bergantung pada v ! Jadi total air $= \rho L (A_{\text{atas}} u/v + A_{\text{depan}})$ selalu berkurang jika kamu berlari lebih cepat, tetapi tidak pernah lebih kecil daripada $\rho L A_{\text{depan}}$. Berlarilah, asal lantainya tidak licin.



Menyiram tanaman

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



Bulu tangkis

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



Penyeberangan sungai

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



Lemparan bebas basket

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



Air mancur taman kota

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



Cek Cepat

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

nol

hanya tinggal komponen mendatarnya

hanya tinggal komponen vertikalnya

paling besar

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

45°

15°

90°

60°

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

tertinggal makin jauh di belakang pesawat

melesat mendahului pesawat

jatuh lurus ke bawah, selalu tepat di bawah pesawat

melayang diam di tempat

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. D • 3. C



Tantangan Rumah: tebak titik jatuh kelereng

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

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

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



✓ **Kamu sekarang bisa...**

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



Istilah kunci

gerak parabola



Rumus penting

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

Jangkauan lemparan di tanah datar. Jangkauan sebanding dengan kuadrat kecepatan awal. Sudut 45° paling jauh, dan sudut θ serta $90^\circ - \theta$ memberi jangkauan yang sama.

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

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

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

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

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

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



Jangan sampai terjebak

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



Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=5

Teka-teki untuk Bab 6

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

▼ Intip petunjuk

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

06

Hukum Newton: Tiga Aturan Main Gerak

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

Setelah bab ini, kamu bisa

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

ANGKOT MENEREM

KOMIK • 4 PANEL

Pukul 06.30, menuju sekolah

RAKA

Asyik, angkotnya lancar! Kita nggak bakal telat, Sar!

KAMPUS – PASAR



RAKA

WADUH! Siapa yang dorong aku ke depan?!

CKIIIT!

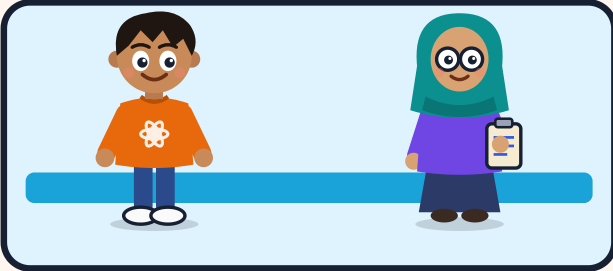


SARI

Nggak ada yang dorong kamu, Rak.
Tubuhmu cuma... **malas berhenti**.

RAKA

Tubuhku... malas?



Di halte sekolah

KAK NARA

Itu **kelembaman**! Newton menuliskannya
hampir 340 tahun lalu. Yuk, kita bongkar
tiga aturan main gerak!



HALTE SEKOLAH



Tebak Dulu!

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

Ke depan, karena ada gaya dorong dari kursi belakang.

Ke depan, karena tubuh cenderung mempertahankan geraknya.

Ke belakang, karena rem menarik semua benda ke belakang.

Tetap diam, karena tubuh selalu ikut bergerak bersama angkot.

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

6.1 Gaya: tarikan atau dorongan

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

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

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

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

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

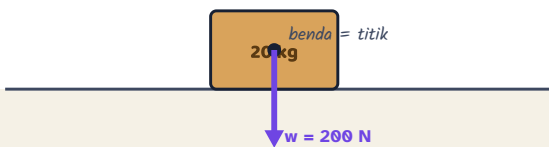
Fisikawan suka menggambar benda sebagai **satu titik atau kotak**, lalu menempelkan semua panah gaya yang bekerja *pada benda itu saja*. Gambar ini disebut **diagram benda bebas**. Ini adalah alat terpenting di bab ini, jadi ikuti animasinya langkah demi langkah.



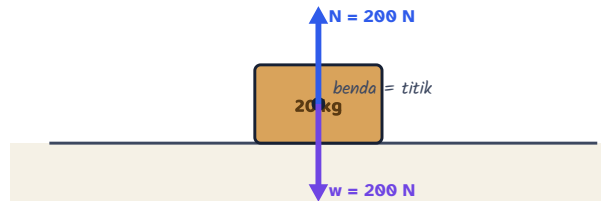
Langkah 1. Raka mendorong kardus 20 kg di lantai. Gaya apa saja yang bekerja **pada kardus**?



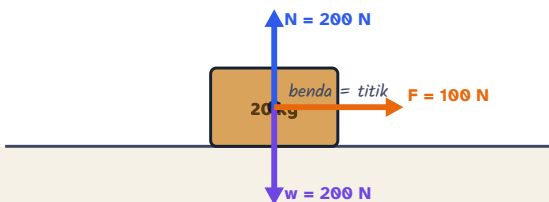
Langkah 2. Langkah 1: "hapus" Raka dan lantai dari pikiran. Gambar kardus sebagai satu titik.



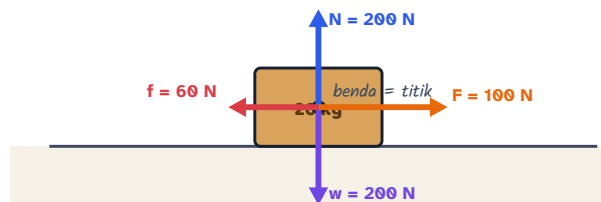
Langkah 3. Langkah 2: Bumi menarik kardus ke bawah. Itulah berat $w = mg = 20 \times 10 = 200 \text{ N}$ (pakai $g = 10 \text{ m/s}^2$).



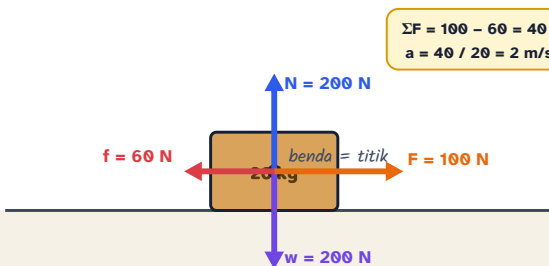
Langkah 4. Langkah 3: lantai menahan kardus ke atas dengan gaya normal N . Kardus tidak melesek ke lantai, jadi $N = w = 200 \text{ N}$.



Langkah 5. Langkah 4: tangan Raka mendorong ke kanan: $F = 100 \text{ N}$.



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



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



AWAS JEBAKAN

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

6.2 Hukum I Newton: benda itu "malas berubah"



TAMU DARI MASA LALU

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

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

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

RUMUS HIDUP

Hukum I Newton (syarat diam atau GLB)

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

Gaya total nol $\Leftrightarrow$ kecepatan tidak berubah (diam tetap diam, bergerak tetap bergerak).

F_{dorong}

Gaya dorong mesin N

F_{hambat}

Gaya hambat N

m

Massa mobil kg

a

Percepatan m/s^2

PERCEPATAN

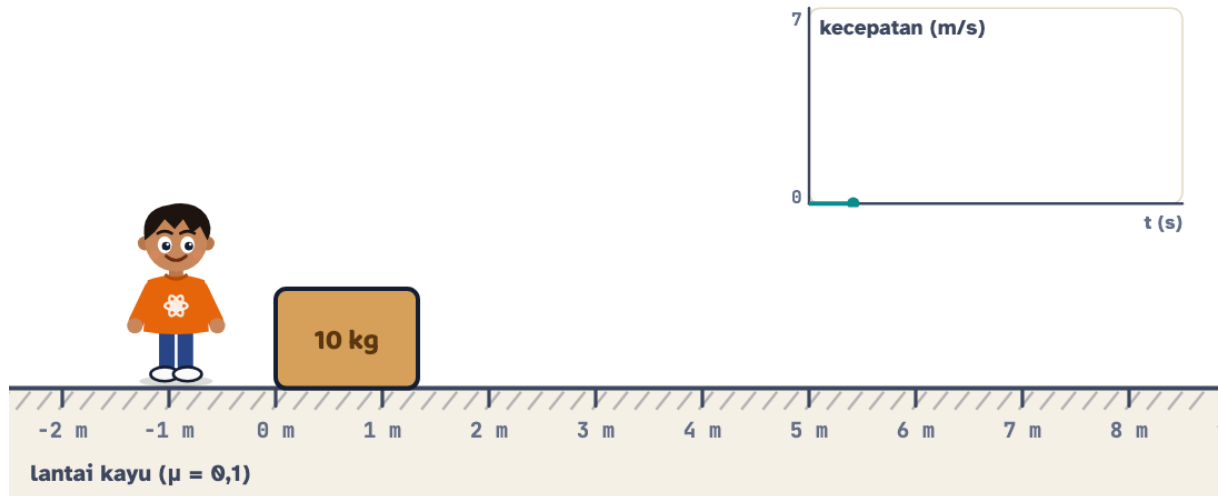
0

m/s^2

Mesin mendorong **1.500** N, hambatan **1.500** N. Gaya total = selisihnya, sehingga percepatan = **0** m/s^2 . Jika hasilnya 0, mobil melaju dengan kecepatan tetap: ini Hukum I!

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

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



Kecepatan

0 m/s

Jarak tempuh

0 m

Keadaan

Diam

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

MITOS

"Benda yang bergerak pasti sedang didorong sebuah gaya."

MITOS

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

FAKTA

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

FAKTA

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



Sabuk pengaman & helm

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



Mengibas kasur

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



Mengencangkan kepala palu

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



Jangan berdiri di bak truk

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

6.3

Hukum II Newton: rumus paling terkenal di mekanika

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

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

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

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



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

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

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



TRIK KAK NARA: SEGITIGA AJAIB

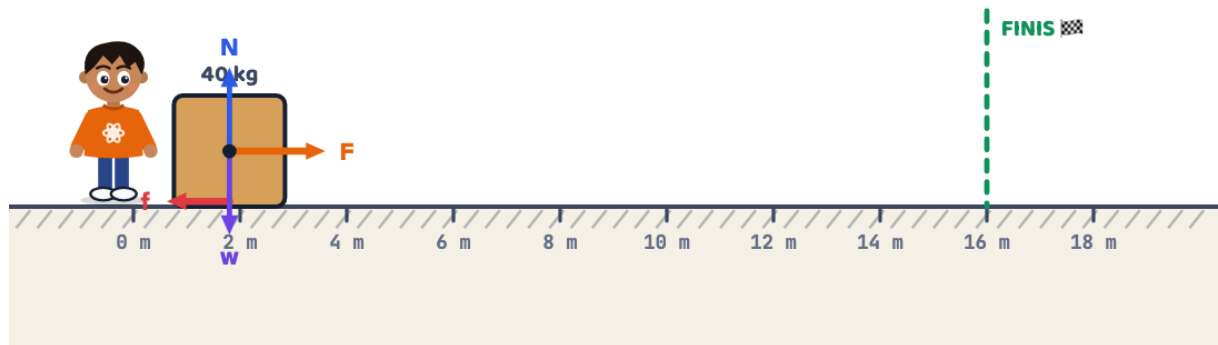
Tulis F di puncak segitiga, m dan a di bawah. Tutup yang ingin dicari: tutup $F \rightarrow m \times a$; tutup $a \rightarrow F/m$; tutup $m \rightarrow F/a$. Tapi ingat, F **di sini adalah gaya total**, bukan sembarang gaya!

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

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

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

$$a = \Sigma F / m = 41,6 / 40 = 1,04 \text{ m/s}^2$$


 Gaya total ΣF
41,6 N

 Percepatan a
1,04 m/s²

Kecepatan

1,25 m/s

Keadaan

Bergerak

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

CONTOH
Gerobak bakso tanpa gesekan

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

1 Gaya total hanya gaya dorong: $\Sigma F = 120 \text{ N}$.

2
$$a = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{120}{40} = 3 \text{ m/s}^2.$$

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

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

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

Percepatan turun dari 3 m/s^2 menjadi 1 m/s^2 , karena dua pertiga gaya dorong "dimakan" gesekan.

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

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

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



LANJUT • IB & OLIMPIADE

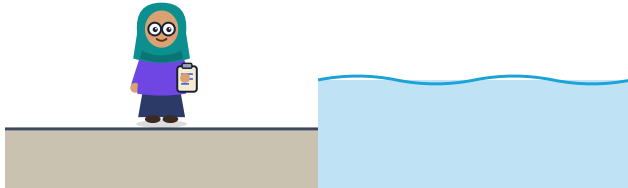
BENTUK SEJATI HUKUM II

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

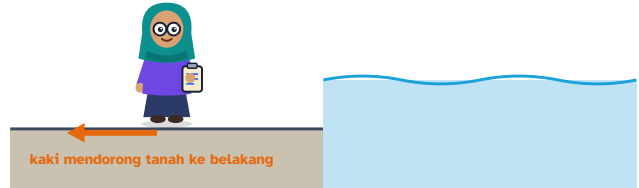
Hukum III Newton: gaya selalu datang berpasangan

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

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



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



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



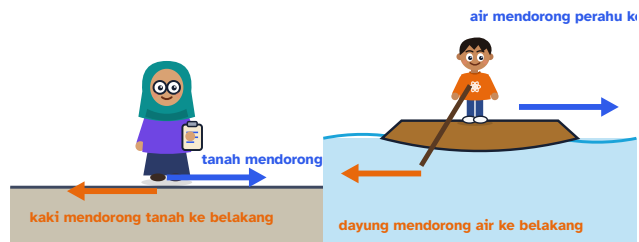
Langkah 3. Reaksi: tanah mendorong kaki Sari ke depan dengan gaya sama besar. Jadi yang mendorongmu maju adalah... tanah!



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



Langkah 5. Aksi: dayung mendorong air ke belakang.



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



Tebak Dulu!

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

Gaya truk pada motor lebih besar, karena truk lebih berat.

Gaya motor pada truk lebih besar, karena motor lebih cepat.

Keduanya sama besar.

Tergantung siapa yang menabrak duluan.

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



AWAS JEBAKAN KLASIK

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

MITOS

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

MITOS

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

FAKTA

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

FAKTA

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



FISIKA INDONESIA

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

6.5 Massa, berat, dan rahasia timbangan di dalam lift

Massa (kg) adalah banyaknya materi sekaligus ukuran kelembaman. Massamu sama di Palembang, di puncak Jayawijaya, atau di Bulan. **Berat** (N) adalah gaya tarik gravitasi padamu: $w = mg$. Di Bumi, $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$ (sering dibulatkan menjadi 10). Di Bulan, g hanya sekitar $1,6 \text{ m/s}^2$, sehingga beratmu tinggal $\pm 1/6$ -nya.

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

RUMUS HIDUP

Angka timbangan di dalam lift

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

Lift dipercepat ke atas → timbangan menekan lebih kuat (terasa berat). Dipercepat ke bawah → terasa ringan.

m

Massa penumpang kg

a

Percepatan lift (+ ke atas) m/s^2

N

Gaya normal (angka timbangan) N

**GAYA NORMAL (ANGKA
TIMBANGAN)**

590

N

Penumpang **50** kg, percepatan lift **2** m/s^2 → timbangan menekan **590** N. Timbangan berskala kg akan menunjukkan N/g.

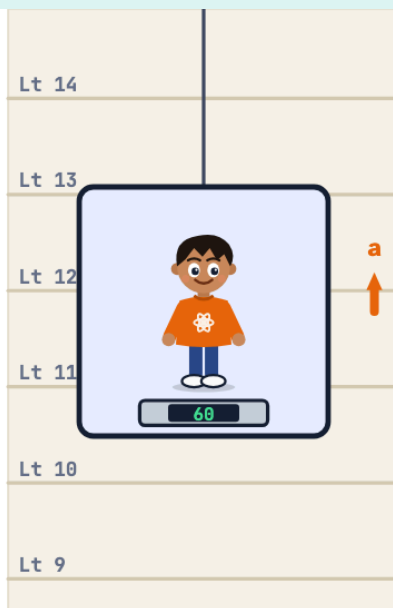
Satuan Nusantara: $\approx 1,2 \times$ berat orang 50 kg $\cdot \approx 2,4 \times$ berat karung beras 25 kg $\cdot \approx 6\%$ dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: Jika $a = -g$ (jatuh bebas), $N = 0$: kamu melayang tanpa bobot!

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

LAB MINI Naik lift sambil berdiri di timbangan

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

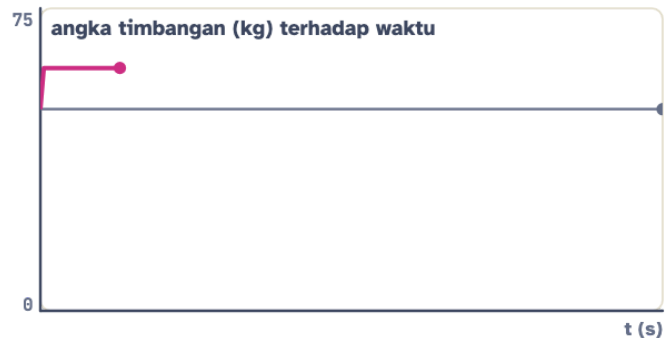


TIMBANGAN

massa sebenarnya: 50 kg

60,2 kg

terasa lebih berat



Fase

Mulai naik: dipercepat ke atas

Percepatan (+ ke atas)

2 m/s²

Angka timbangan

60,2 kg

Gaya normal

590 N

Pilih jenis perjalanan, lalu jalankan. Perhatikan angka timbangan saat lift **mulai** bergerak, saat **melaju tetap**, dan saat **akan berhenti**. Coba juga mode wahana menara jatuh bebas.

KERJAKAN BERSAMA Raka di lift gedung tinggi

Raka (50 kg) berdiri di timbangan dalam lift. Lift bergerak ke atas dengan percepatan 2 m/s². Berapa angka timbangan dalam newton, dan berapa jika timbangannya berskala kg? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

- 1 Gaya pada Raka: normal N ke atas, berat $mg = 500 \text{ N}$ ke bawah.
- 2 Hukum II (positif ke atas): $N - mg = ma \rightarrow N = m(g + a) = 50(10 + 2) = 600 \text{ N}$.
- 3 Timbangan berskala kg membagi dengan g : $600/10 = 60 \text{ "kg"}$.

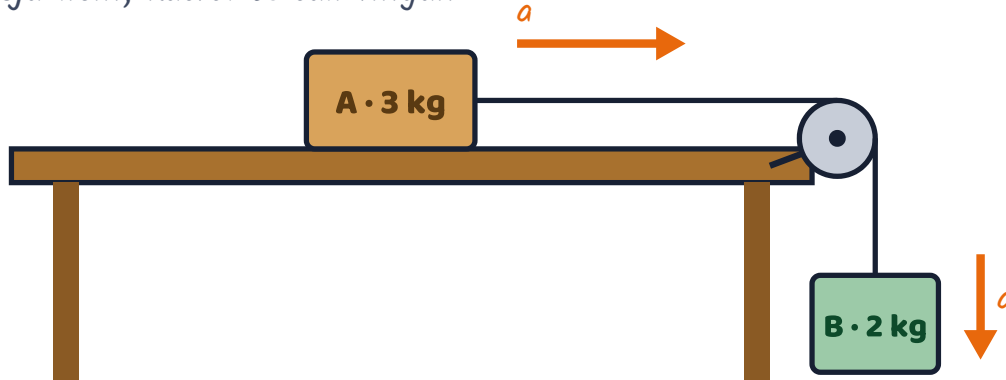
Timbangan menunjukkan 600 N (atau "60 kg"). Massa Raka tetap 50 kg. Yang bertambah hanya tekanan timbangan pada kakinya.

6.6 Lima langkah sakti menaklukkan soal gaya

1. **Gambar** situasinya, lalu pilih benda yang dianalisis.

2. **DBB**: gambar semua gaya *pada* benda itu (berat, normal, gesek, tali, pegas, dorongan).
3. **Pilih sumbu**: biasanya searah gerak dan tegak lurus gerak.
4. **Tulis** $\Sigma F = ma$ untuk tiap sumbu (dan tiap benda bila ada lebih dari satu).
5. **Hitung, lalu cek**: apakah satuannya benar? Apakah hasilnya masuk akal?

meja licin, katrol & tali ringan



Sistem "meja-katrol": balok A di meja licin ditarik balok B yang tergantung.

KERJAKAN BERSAMA Meja dan katrol

Pada gambar di atas, $m_A = 3 \text{ kg}$, $m_B = 2 \text{ kg}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$. Tentukan percepatan sistem dan tegangan tali.

- 1 DBB balok A (arah gerak ke kanan): hanya tegangan T yang mendatar. $T = m_A a$.
- 2 DBB balok B (arah gerak ke bawah): berat $m_B g$ ke bawah, tegangan T ke atas. $m_B g - T = m_B a$.
- 3 Jumlahkan kedua persamaan supaya T hilang: $m_B g = (m_A + m_B) a \rightarrow a = \frac{2 \times 10}{3 + 2} = 4 \text{ m/s}^2$.
- 4 Tegangan: $T = m_A a = 3 \times 4 = 12 \text{ N}$. Cek di B: $20 - 12 = 8 = 2 \times 4$. ✓

$a = 4 \text{ m/s}^2$ dan $T = 12 \text{ N}$. Perhatikan bahwa T lebih kecil daripada berat B (20 N). Kalau sama besar, B tidak akan bergerak turun!

$$a = \frac{m_B g - \mu m_A g}{m_A + m_B}$$

Yang menarik: berat balok B. Yang menghambat: gesekan pada balok A. Yang dipercepat: kedua balok sekaligus.

 m_A

Massa balok di meja kg

 m_B

Massa beban gantung kg

 μ

Koefisien gesek meja

 a Percepatan sistem m/s^2

PERCEPATAN SISTEM

4

 m/s^2

Beban 2 kg menarik balok 3 kg ($\mu = 0$). Percepatan sistem 4 m/s^2 . Jika hasilnya 0, gesekan statis cukup kuat menahan sistem tetap diam.

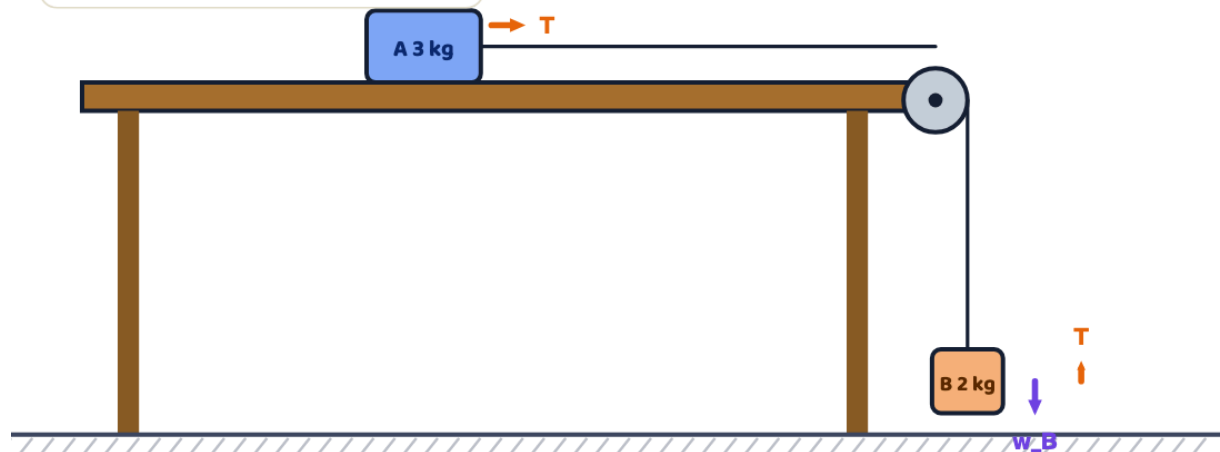
Cek satuan: Dengan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Tegangan tali: $T = m_A(a + \mu g)$.

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

$$a = 4 \text{ m/s}^2$$

$$T = 12 \text{ N (berat B = 20 N)}$$

Beban B hampir menyentuh lantai!



Percepatan
4 m/s²

Tegangan tali
12 N

Kecepatan
2,93 m/s

Keadaan
Bergerak

Pilih susunannya, atur massa dan gesekan, lalu jalankan. Perhatikan: tegangan tali **selalu lebih kecil** daripada berat beban yang turun. Kapan sistem tidak bergerak sama sekali?

6.7 Gaya semu: fisika dari dalam angkot

Ingat Raka yang "terdorong" ke depan saat angkot mengerem? Dari **pinggir jalan**, Kak Nara melihat tidak ada gaya ke depan. Tubuh Raka hanya meneruskan gerakannya. Tetapi dari **dalam angkot**, Raka merasakan seolah-olah ada tangan tak terlihat yang mendorongnya. Siapa yang benar? Keduanya, asal tahu aturannya.

Kerangka acuan yang diam atau bergerak lurus beraturan disebut **kerangka inersial**. Di sana Hukum Newton berlaku apa adanya. Angkot yang mengerem, lift yang dipercepat, atau komidi putar adalah **kerangka non-inersial**, karena kerangka itu sendiri dipercepat. Agar Hukum Newton tetap bisa dipakai di dalamnya, kita menambahkan **gaya semu** pada setiap benda: $F_{\text{semu}} = -ma_{\text{kerangka}}$. Arahnya selalu **berlawanan** dengan percepatan kerangka.

Bahasa sederhana • Gampangnya: kalau angkot ngerem, semua benda di dalamnya "terasa" didorong ke depan. Kalau angkot tancap gas, semua terasa didorong ke belakang. Dorongan itu bukan gaya sungguhan, cuma akibat angkotnya yang berubah kecepatan.



Tebak Dulu!

Sebuah pengharum mobil tergantung di kaca spion angkot. Saat angkot tancap gas (dipercepat ke depan), pengharum itu miring ke mana?

Ke depan, karena ikut terdorong mesin.

Ke belakang.

Tetap tegak lurus ke bawah.

Berayun ke kiri dan kanan.

Ke belakang. Dari jalan: tali harus *menarik* pengharum ke depan agar ikut dipercepat, jadi tali harus miring dengan ujung atasnya di depan, sehingga pengharumnya tertinggal di belakang. Dari dalam angkot: ada gaya semu ke belakang yang mendorong pengharum. Kedua cara memberi jawaban yang sama, yaitu $\tan \theta = a/g$.

$$\tan \theta = \frac{a}{g}$$

Makin besar percepatan angkot, makin miring pengharumnya. Pengharum itu sebenarnya alat ukur percepatan!

 a Percepatan angkot m/s^2 θ Sudut miring tali dari vertikal $^\circ$

SUDUT MIRING TALI DARI
VERTIKAL

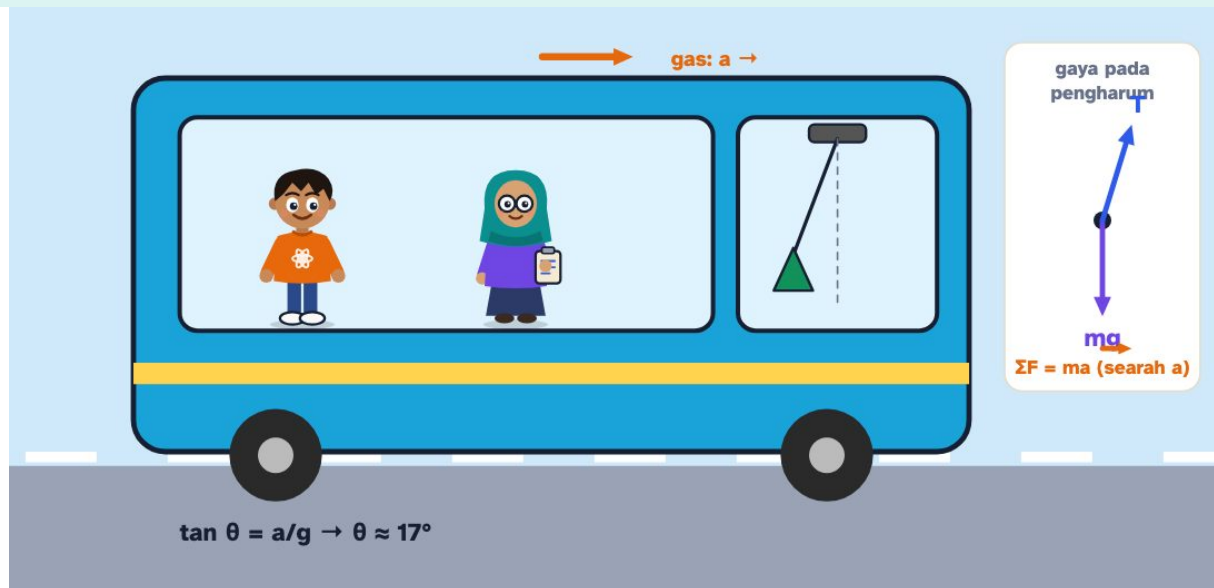
11,5

°

Angkot dipercepat $2 \text{ m/s}^2 \rightarrow$ pengharum miring $11,5^\circ$ dari arah tegak. Coba tebak berapa sudutnya saat $a = g$!

Cek satuan: Dari dalam angkot, tali menunjuk arah **gravitasi efektif** $g_{\text{ef}} = g - a$, dengan besar $\sqrt{g^2 + a^2}$.

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



Kecepatan angkot

42 km/jam

Percepatan nyata

3 m/s²

Sudut pengharum

20,8 °

Pandangan

dari pinggir jalan (kerangka inersial)

Geser pedal (gas atau rem), lalu ganti sudut pandang. **Dari jalan:** hanya ada tegangan tali dan berat. **Dari dalam angkot:** muncul gaya semu ungu yang membuat semua gaya seimbang.

**AWAS JEBAKAN**

Gaya semu **tidak punya pasangan reaksi** (karena tidak ada benda yang mengerjakannya), dan hanya boleh dipakai di dalam kerangka yang dipercepat. Kalau kamu menganalisis dari pinggir jalan, **jangan** menambahkan gaya semu. Mencampur dua cara pandang dalam satu soal adalah kesalahan paling sering di olimpiade.

**LANJUT • IB & OLIMPIADE****TRIK KERANGKA ACUAN**

Soal katrol di dalam lift yang dipercepat ke atas dengan a ? Masuk ke kerangka lift dan ganti g dengan $g_{\text{ef}} = g + a$. Mesin Atwood di lift langsung menjadi soal biasa: $T = \frac{2m_1m_2g_{\text{ef}}}{m_1 + m_2}$. Pada Bab 7 kamu akan bertemu gaya semu yang paling terkenal: **gaya sentrifugal** di komidi putar dan tikungan.



Ojek berboncengan

Dengan gaya mesin yang sama, motor yang memboncengkan dua orang dipercepat lebih lambat. Itu Hukum II: $a = F/m$.



Lomba perahu bidar

Puluhan pendayung di Sungai Musi mendorong air ke belakang bersamaan, sehingga air mendorong perahu ke depan (Hukum III).



Lift gedung tinggi

Perut terasa "melayang" saat lift mulai turun, karena gaya normal pada tubuh mengecil sesaat.



Tarik tambang 17 Agustus

Gaya tarik kedua tim pada tali sama besar. Pemenangnya ditentukan oleh hal lain. Penasaran? Lihat teka-teki di akhir bab!

Cek Cepat

Sebuah bola menggelinding di lantai makin pelan lalu berhenti. Penyebab utamanya adalah...

gaya dorong bola habis

massa bola berkurang

gaya gesek lantai dan udara

bola ingin beristirahat

Gaya total 60 N bekerja pada kotak 12 kg. Percepatannya...

720 m/s²

5 m/s²

0,2 m/s²

48 m/s²

Pasangan aksi-reaksi yang benar adalah...

berat buku dan gaya normal meja pada buku

gaya dorongmu pada meja dan gesekan lantai pada meja

berat apel dan tegangan tangkai

gaya Bumi menarik apel dan gaya apel menarik Bumi

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. D

Tantangan Rumah: koin pemberani

Bahan: gelas, kartu remi atau karton tipis, koin Rp500

1. Letakkan kartu di atas mulut gelas, lalu letakkan koin tepat di tengah kartu.
2. Sentil kartu secara mendatar dengan cepat dan keras.
3. Ulangi, tetapi kini tarik kartu **perlahan-lahan**.

Pertanyaan: Mengapa koin jatuh ke dalam gelas saat kartu disentil cepat, tetapi ikut terbawa saat kartu ditarik pelan? Hukum Newton yang mana yang bekerja? (Petunjuk: berapa lama gaya gesek kartu sempat bekerja pada koin?)

RINGKASAN KILAT **Bab 6 dalam 3 menit**

✓ **Kamu sekarang bisa...**

- menjelaskan gaya sebagai tarikan atau dorongan dan menggambar **diagram benda bebas**

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

Istilah kunci

gaya

diagram benda bebas

kelembaman

aksi-reaksi

kerangka inersial

kerangka non-inersial

gaya semu

Rumus penting

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

Hukum I Newton (syarat diam atau GLB). Gaya total nol $\iff$ kecepatan tidak berubah (diam tetap diam, bergerak tetap bergerak).

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

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

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

Angka timbangan di dalam lift. Lift dipercepat ke atas $\rightarrow$ timbangan menekan lebih kuat (terasa berat). Dipercepat ke bawah $\rightarrow$ terasa ringan.

$$a = \frac{m_B g - \mu m_A g}{m_A + m_B}$$

Sistem meja-katrol (dengan gesekan). Yang menarik: berat balok B. Yang menghambat: gesekan pada balok A. Yang dipercepat: kedua balok sekaligus.

$$\tan \theta = \frac{a}{g}$$

Akselerometer pengharum mobil. Makin besar percepatan angkot, makin miring pengharumnya. Pengharum itu sebenarnya alat ukur percepatan!

Jangan sampai terjebak

- Di DBB hanya ada gaya yang bekerja pada benda itu.
- Berat buku w dan gaya normal meja N memang sama besar dan berlawanan arah, tetapi keduanya bukan pasangan aksi-reaksi, karena keduanya bekerja pada benda yang sama (buku).
- Gaya semu tidak punya pasangan reaksi (karena tidak ada benda yang mengerjakannya), dan hanya boleh dipakai di dalam kerangka yang dipercepat.

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

Teka-teki untuk Bab 7

Dalam lomba tarik tambang, gaya tarik tim merah pada tali **sama besar** dengan gaya tarik tim putih (Hukum III, karena talinya ringan). Lalu bagaimana mungkin ada tim yang menang?

▼ Intip petunjuk

Lihat kaki para pemain, bukan talinya. Gaya apa yang bekerja antara sandal dan tanah? Jawaban lengkapnya ada di Bab 7: Gesekan.

07 Gesekan & Gerak Melingkar: Rahasia Tarik Tambang dan Tong Setan

Siapa sebenarnya pemenang tarik tambang? Mengapa pembalap di Mandalika memiringkan motornya, dan mengapa motor di tong setan tidak jatuh dari dinding? Jawabannya ada pada dua "pahlawan tak terlihat": gaya gesek dan gaya sentripetal.

Setelah bab ini, kamu bisa

- membedakan gesekan **statis** dan **kinetis**, lalu memakai $f_s \leq \mu_s N$ dan $f_k = \mu_k N$;
- menganalisis benda di **bidang miring** dan menentukan sudut kritis $\tan \theta_c = \mu_s$;
- memakai besaran sudut (radian, ω , f , T) dan hubungan $v = \omega r$;
- menghitung **gaya sentripetal** pada tikungan datar, tikungan miring, dan tong setan;
- menganalisis gerak melingkar vertikal (kora-kora, roller coaster) tanpa memakai "gaya sentrifugal" yang keliru.

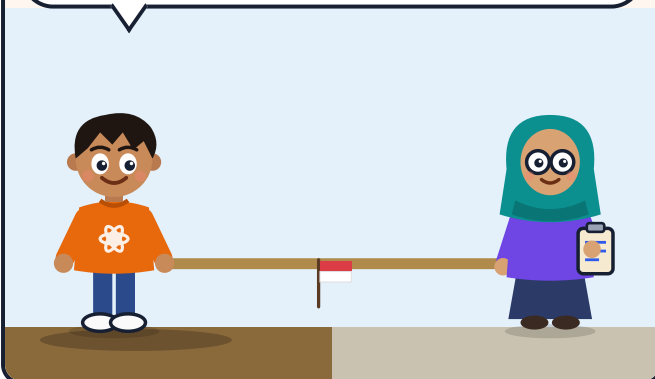
RAHASIA TARIK TAMBANG

KOMIK • 4 PANEL

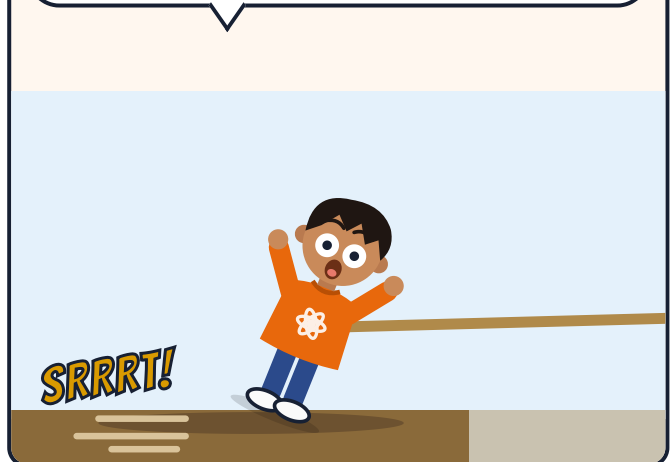
Lomba 17 Agustus

RAKA

Kata Bab 6, tarikan kedua tim pada tali sama besar. Berarti pasti seri, dong!

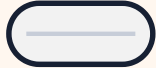
**RAKA**

Lho, sandalku malah meluncur di lumpur!



SARI

Talinga adil, Rak. Yang tidak adil itu tanah di bawah sandalmu: licin! Lihat sepatu tim kami.



sandal licin



sol bergerigi

KAK NARA

Pemenangnya tim yang mendapat **gaya gesek** terbesar dari tanah! Gesekan juga yang membuat motor bisa menikung. Yuk, kita selidiki!



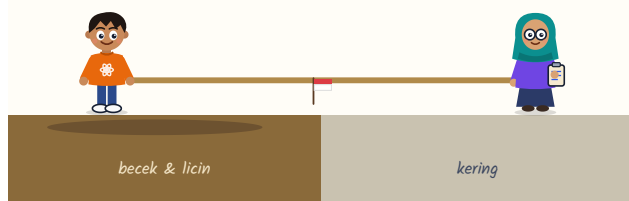
$$f \leq \mu N$$
$$a = v^2 / r$$



7.1

Gesekan statis dan kinetis: jawaban teka-teki tarik tambang

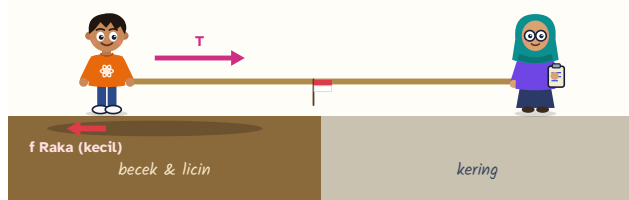
Ingat teka-teki di akhir Bab 6? Dalam tarik tambang, tali yang ringan menarik kedua tim dengan gaya yang **sama besar**. Jadi tali tidak menentukan pemenang. Mari kita lihat gaya-gaya *pada setiap tim*, persis dengan diagram benda bebas yang kamu pelajari di Bab 6.



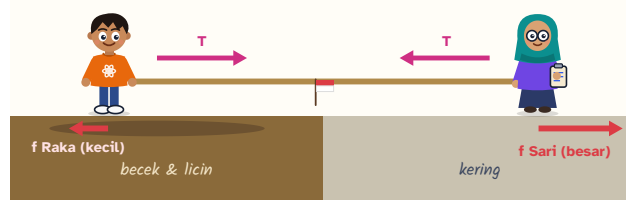
Langkah 1. Raka berdiri di tanah becek dengan sandal jepit. Sari berdiri di tanah kering dengan sepatu bergerigi. Siapa yang menang?



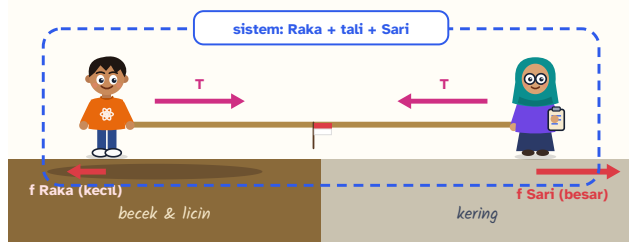
Langkah 2. Kedua tim menarik ujung-ujung tali. Karena talinya ringan, tarikan di kedua ujung sama besar, T . Tali tidak "memihak".



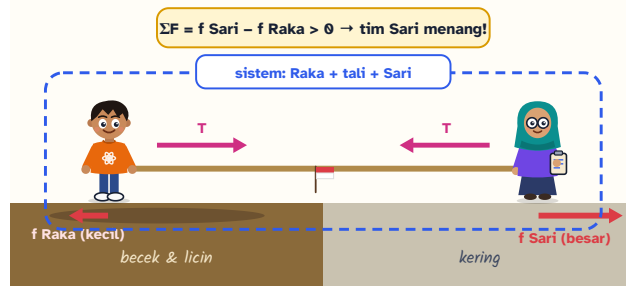
Langkah 3. Diagram gaya Raka (arah mendatar): tali menarik Raka ke kanan dengan T , dan tanah menggesek kaki Raka ke kiri. Di lumpur licin, gesekan ini **kecil**.



Langkah 4. Diagram gaya Sari: tali menarik Sari ke kiri dengan T , dan tanah kering menggesek kaki Sari ke kanan. Gesekan ini bisa **jauh lebih besar**.



Langkah 5. Sekarang lihat keduanya sebagai satu sistem. Gaya T adalah gaya di dalam sistem, jadi saling meniadakan. Gaya luar mendatar yang tersisa hanyalah dua gaya gesek dari tanah.



Langkah 6. Gaya total mengarah ke kanan, sehingga seluruh sistem dipercepat ke arah Sari. **Pemenang tarik tambang adalah tim yang mendapat gaya gesek terbesar dari tanah.**

Bahasa sederhana • Gampangnya: tali menarik kedua tim sama kuat. Yang menang adalah tim yang kakinya paling "mencengkeram" tanah. Sepatu bergerigi di tanah kering mencengkeram jauh lebih kuat daripada sandal di lumpur.

Gaya gesek muncul karena permukaan benda tidak pernah benar-benar mulus. Dilihat dengan mikroskop, permukaan yang tampak licin pun penuh tonjolan kecil yang saling mengait dan "menempel". Gaya gesek selalu **sejajar** permukaan dan melawan gerak (atau kecenderungan gerak) **relatif** antara kedua permukaan.

Gesekan statis f_s		Gesekan kinetis f_k
Kapan?	Permukaan belum saling bergeser	Permukaan sedang saling bergeser

Besarnya	Menyesuaikan diri: $0 \leq f_s \leq \mu_s N$	Hampir tetap: $f_k = \mu_k N$
Contoh	Lemari yang didorong tetapi belum bergeser; kaki yang mendorong tanah saat berjalan	Kardus yang sedang meluncur di lantai; ban yang selip

N adalah gaya normal (Bab 6), sedangkan μ_s dan μ_k adalah **koefisien gesek** statis dan kinetis. Koefisien gesek tidak bersatuan dan bergantung pada **pasangan** permukaannya. Biasanya $\mu_k < \mu_s$: sekali benda bergerak, menjaganya tetap bergerak lebih mudah daripada memulainya.



Tebak Dulu!

Raka mendorong lemari 50 kg dengan gaya mendatar 100 N, tetapi lemari tidak bergeser sedikit pun. Koefisien gesek statisnya 0,4 ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Berapa gaya gesek lantai pada lemari?

196 N, karena $f = \mu_s N = 0,4 \times 50 \times 9,8$.

0 N, karena lemari tidak bergerak.

100 N, berlawanan arah dengan dorongan Raka.

Lebih dari 100 N, karena gesekan "menang".

Jawabannya: 100 N. Lemari diam, jadi gaya totalnya nol (Hukum I). Gesekan statis harus tepat mengimbangi dorongan: 100 N. Angka 196 N hanyalah **batas maksimum** gesekan statis. Jika Raka mendorong 150 N, gesekannya ikut menjadi 150 N. Baru setelah dorongan melebihi 196 N, lemari mulai bergeser. Gesekan statis itu "penurut": ia hanya sekuat yang diperlukan.

$$f_{s,\text{maks}} = \mu_s N = \mu_s m g$$

Gesekan statis bisa bernilai berapa saja dari nol sampai batas ini. Dorongan harus melebihi batas ini agar benda mulai bergeser (di bidang datar, $N = mg$).

 μ_s

Koefisien gesek statis

 m

Massa benda kg

 $f_{s,\text{maks}}$

Gesekan statis maksimum N

GESEKAN STATIS MAKSIMUM

196

N

Lemari **50** kg di lantai dengan $\mu_s = \mathbf{0,4}$: dorongan harus melebihi **196** N agar lemari mulai bergeser. Dorongan yang lebih kecil dilawan gesekan statis yang sama besar.

Satuan Nusantara: $\approx 80\%$ dari berat karung beras 25 kg $\cdot \approx 40\%$ dari berat orang 50 kg $\cdot \approx 2\%$ dari berat mobil 1 ton

Cek satuan: μ_s tidak bersatuan, jadi satuan gesekan sama dengan satuan gaya normal: newton.

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

LAB MINI Tarik balok dengan neraca pegas

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-7

Kayu di atas kayu

$$N = mg = 39,2 \text{ N} \cdot \mu_s N = 19,6 \text{ N} \cdot \mu_k N = 11,8 \text{ N}$$



Bacaan neraca F

5,9 N

Gaya gesek f

5,9 N

Kecepatan balok

0 m/s

Keadaan

Diam: gesekan statis menahan

Mode **gaya naik terus**: amati grafik gesekan terhadap gaya tarik. Ada "puncak" sebelum balok mulai bergeser! Mode **tangan bergerak pelan** meniru percobaan di laboratorium sekolah: perhatikan angka neraca yang naik-turun saat balok "tersendat". Fenomena yang sama membuat engsel pintu berderit dan sepatu berdecit.

Pasangan permukaan (kira-kira)

μ_s

μ_k

Karet ban di beton/aspal kering

1,0

0,8

Karet ban di aspal basah

$\pm 0,6$

$\pm 0,4$

Kaca di atas kaca

0,94

0,4

Baja di atas baja (kering)

0,74

0,57

Kayu di atas kayu

0,25–0,5

$\pm 0,2$

Es di atas es

0,1

0,03

Lapisan antilengket wajan (PTFE) di atas PTFE	0,04	0,04
Sendi lutut manusia (berpelumas cairan sendi)	0,01	0,003



AWAS JEBAKAN

Rumus $f_s = \mu_s N$ **bukan** rumus gesekan statis, melainkan rumus **batas maksimumnya**. Langkah aman: (1) anggap benda diam, lalu hitung gesekan yang diperlukan dari $\Sigma F = 0$; (2) bandingkan dengan $\mu_s N$. Jika yang diperlukan lebih kecil, benda memang diam. Jika lebih besar, benda bergerak dan gesekannya menjadi $f_k = \mu_k N$.



TAMU DARI MASA LALU

Sekitar tahun 1500, Leonardo da Vinci menulis di buku catatannya bahwa gesekan sebanding dengan berat benda dan tidak bergantung pada luas bidang sentuh. Catatannya baru ditemukan berabad-abad kemudian. Guillaume Amontons menemukan ulang hukum ini pada 1699. Charles-Augustin de Coulomb (1781), orang yang sama dengan hukum Coulomb di Bab 22, lalu membedakan gesekan statis dan kinetis. Itulah sebabnya model $f = \mu N$ sering disebut "gesekan Coulomb".

7.2 Bidang miring dan sudut kritis

Letakkan buku di atas papan, lalu angkat salah satu ujung papan perlahan. Awalnya buku diam, lalu pada sudut tertentu buku tiba-tiba meluncur. Untuk memahaminya, uraikan berat mg menjadi dua komponen:

- sejajar lereng (menarik benda turun): $mg \sin \theta$;
- tegak lurus lereng (menekan permukaan): $mg \cos \theta$, sehingga $N = mg \cos \theta$.

Benda tetap diam selama $mg \sin \theta \leq \mu_s mg \cos \theta$, yaitu $\tan \theta \leq \mu_s$. Kemiringan saat benda *tepat akan* meluncur disebut **sudut kritis** (atau sudut *repose*):

$$\tan \theta_c = \mu_s$$

Kemiringan saat benda tepat akan meluncur hanya bergantung pada koefisien gesek, tidak pada massa benda!

 μ_s

Koefisien gesek statis

 θ_c

Sudut kritis °

SUDUT KRITIS

26,6

°

Dengan $\mu_s = 0,5$, benda mulai meluncur saat lereng dimiringkan lebih dari **26,6°**. Benda berat dan ringan dari bahan yang sama meluncur pada sudut yang sama.

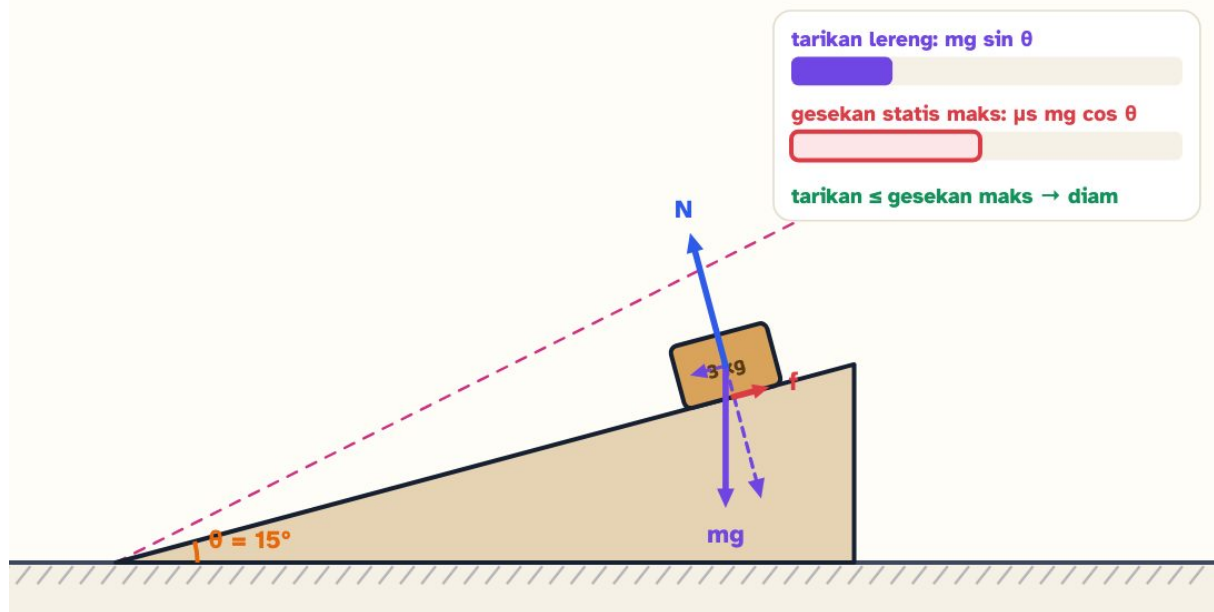
Cek satuan: μ_s tidak bersatuan, sehingga θ_c murni sebuah sudut.

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

Setelah meluncur, gesekannya menjadi kinetis, sehingga percepatan benda menuruni lereng adalah $a = g(\sin \theta - \mu_k \cos \theta)$.

LAB MINI

Bidang miring: kapan balok mulai meluncur?

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-7

$mg \sin \theta$ (ke bawah lereng)
7,6 N

Gesekan statis maks
14,2 N

Percepatan
0 m/s²

Keadaan

Diam: gesekan statis menahan

Tekan **Naikkan sudut perlahan**, lalu catat sudut saat balok mulai meluncur. Bandingkan dengan Rumus Hidup sudut kritis di atas. Ubah massa balok: apakah sudut kritisnya berubah? Lihat diagram batang: kapan "tarikan lereng" mengalahkan "gesekan maksimum"?

KERJAKAN BERSAMA

Perosotan di taman bermain

Perosotan miring 37° ($\sin 37^\circ \approx 0,6$, $\cos 37^\circ \approx 0,8$). Koefisien gesek kinetis antara celana dan perosotan 0,25. Berapa percepatan anak yang meluncur? Gunakan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- 1 Gaya sejajar lereng ke bawah: $mg \sin \theta = m(10)(0,6) = 6m$.
- 2 Gaya normal: $N = mg \cos \theta = 8m$, sehingga $f_k = 0,25 \times 8m = 2m$ ke atas lereng.
- 3 $\Sigma F = 6m - 2m = 4m = ma \rightarrow a = 4 \text{ m/s}^2$.

Percepatannya 4 m/s^2 , berapa pun massa anaknya. Massa muncul di setiap suku sehingga saling meniadakan, seperti pada jatuh bebas.



FISIKA INDONESIA: LERENG, PASIR, DAN LONGSOR

Tumpukan pasir kering di toko bangunan selalu membentuk kerucut dengan kemiringan sekitar 30–35°. Itulah sudut kritis butiran pasir. Saat musim hujan, air yang meresap ke tanah lereng membuat butiran lebih mudah tergelincir satu sama lain dan menambah beban tanah. Lereng yang tadinya aman bisa melewati sudut kritisnya dan longsor. Itulah sebabnya terasering, tanaman berakar kuat, dan saluran air sangat penting untuk lereng-lereng di Indonesia.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

BALOK DI ATAS BALOK

Balok A (massa m) diletakkan di atas balok B (massa M) yang berada di lantai licin. Koefisien gesek statis antara A dan B adalah μ_s . Jika B ditarik dengan gaya F , satu-satunya gaya mendatar yang mempercepat A adalah gesekan dari B. Percepatan maksimum A tanpa tergelincir adalah $a_{\text{maks}} = \mu_s g$. Agar keduanya bergerak bersama, $F \leq (m + M) \mu_s g$. Jika F lebih besar, B "lolos" dari bawah A, seperti taplak yang ditarik cepat dari bawah piring. Perhatikan: gesekan pada A justru **searah** gerakannya!

7.3 Gesekan: kawan atau lawan?

Gesekan sering dianggap pengganggu. Padahal tanpa gesekan kamu tidak bisa berjalan, menulis, mengikat tali sepatu, atau mengerem motor. Saat kamu melangkah, telapak kakimu mendorong tanah ke belakang. Gesekan statis dari tanah mendorong kakimu ke **depan** (ingat Hukum III di Bab 6). Gesekan itulah yang membuatmu maju!

Gesekan yang menguntungkan	Gesekan yang merugikan
Ban mencengkeram jalan saat melaju, berbelok, dan mengerem	Mesin cepat aus dan panas, sehingga perlu oli
Alur ban membuang air agar ban tetap menapak di jalan basah	Rantai sepeda yang kering boros tenaga dan cepat rusak
Sol sandal dan sepatu bergerigi agar tidak terpeleset	Gesekan udara memperlambat kendaraan dan memboroskan bahan bakar
Menulis dengan pensil atau kapur di papan tulis	Lantai kamar mandi yang licin justru kekurangan gesekan



TRIK KAK NARA: REM ABS DAN "JANGAN SAMPAI SELIP"

Karena $\mu_s > \mu_k$, ban yang **masih menggelinding** (titik sentuhnya diam sesaat terhadap jalan, sehingga gesekannya statis) mengerem lebih kuat daripada ban yang terkunci dan selip (gesekan kinetis). Sistem rem ABS memompa rem berkali-kali per detik agar roda tidak terkunci. Bonusnya, roda yang masih berputar tetap bisa dibelokkan.

Peserta panjat pinang bermassa 50 kg bertahan diam memeluk batang pinang tegak. Ia menjepit batang dengan tangan dan kaki, sehingga total gaya normal pada batang adalah N . Gunakan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Berapa N minimum jika (a) batang bersih dengan $\mu_s = 0,6$; (b) batang dilumuri oli sehingga $\mu_s = 0,15$?

- 1 Batang tegak, jadi gaya normalnya mendatar (dari jepitan). Satu-satunya gaya ke atas adalah gesekan statis, yang harus mengimbangi berat: $f_s = mg = 500 \text{ N}$.
- 2 Syarat tidak merosot: $\mu_s N \geq 500 \text{ N}$, sehingga $N_{\min} = 500/\mu_s$.
- 3 (a) $N_{\min} = 500/0,6 \approx 833 \text{ N}$.
- 4 (b) $N_{\min} = 500/0,15 \approx 3.333 \text{ N}$, empat kali lebih besar! Hampir mustahil dijepit sekuat itu.

Oli menurunkan μ sehingga jepitan yang dibutuhkan melonjak. Karena itu peserta membentuk "menara manusia": peserta di bawah menopang yang di atas, dan sedikit demi sedikit oli terhapus oleh baju mereka.



FISIKA INDONESIA: PANJAT PINANG

Panjat pinang adalah lomba khas 17 Agustus. Batang pinang dilumuri oli atau gemuk, lalu hadiah digantung di puncaknya. Strateginya murni fisika: kurangi "beban" peserta yang memanjat dengan menara manusia, gosok oli dengan kain atau baju untuk menaikkan μ , dan bekerja sama. Satu orang sekuat apa pun hampir mustahil menang sendirian.

MITOS

"Gaya gesek selalu melawan arah gerak benda."

MITOS

"Makin luas permukaan yang bersentuhan, makin besar gesekannya."

FAKTA

Gesekan melawan gerak

relatif

antara dua permukaan. Saat kamu berjalan, gesekan tanah pada kaki justru mengarah ke depan. Kardus di bak truk yang mulai melaju juga didorong ke depan oleh gesekan.

FAKTA

Dalam model sederhana, gesekan hanya bergantung pada μ dan gaya normal, bukan luas. Balok bata yang diletakkan rebah atau berdiri butuh dorongan yang hampir sama untuk digeser.

7.4 Besaran sudut: radian, kecepatan sudut, periode

Untuk benda yang berputar, lebih mudah mengukur **sudut** daripada jarak. Fisikawan mengukur sudut dalam **radian**: sudut θ (rad) = panjang busur s dibagi jari-jari r . Satu putaran penuh = $2\pi r/r = 2\pi$ rad = 360° , jadi 1 rad $\approx 57,3^\circ$.

Besaran	Simbol & rumus	Satuan	Arti
Periode	T	s	waktu untuk satu putaran
Frekuensi	$f = 1/T$	Hz (putaran/s)	banyaknya putaran tiap sekon
Kecepatan sudut	$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$	rad/s	sudut yang disapu tiap sekon
Kecepatan linear	$v = \omega r$	m/s	kelajuan titik sejauh r dari poros

Semua titik pada bianglala (kincir ria) punya ω yang sama, tetapi penumpang di ujung bergerak paling cepat karena r -nya paling besar. Mesin dan kipas angin sering memakai satuan rpm (putaran per menit): $\omega = 2\pi \times \text{rpm}/60$.



TRIK KAK NARA: RANTAI SAMA V , POROS SAMA Ω

Roda-roda yang dihubungkan **rantai atau sabuk** (gir depan dan gir belakang sepeda) punya kecepatan linear tepi yang sama: $\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$. Roda-roda pada **satu poros** (gir belakang dan roda belakang) punya kecepatan sudut yang sama. Itulah sebabnya gir belakang yang kecil membuat roda berputar lebih cepat.



FAKTA UNIK DARI TARSI

Bumi berputar sekali dalam ± 24 jam. Orang di Tugu Khatulistiwa, Pontianak, berjarak ± 6.378 km dari sumbu Bumi, sehingga ikut bergerak dengan $v = \omega r \approx 465$ m/s, sekitar 1.670 km/jam! Di dekat kutub, kecepatannya hampir nol. Indonesia yang dilintasi garis khatulistiwa termasuk wilayah "tercepat" di permukaan Bumi.

CONTOH Roda motor

Roda motor berjari-jari 0,3 m berputar 10 kali setiap sekon. Berapa periode, kecepatan sudut, dan kelajuan motor (anggap roda tidak selip)?

- 1 Frekuensi $f = 10$ Hz, sehingga periode $T = 1/10 = 0,1$ s.
- 2 $\omega = 2\pi f = 2\pi(10) \approx 62,8$ rad/s.
- 3 Roda yang tidak selip memindahkan motor sejauh satu keliling setiap putaran: $v = \omega r = 62,8 \times 0,3 \approx 18,8$ m/s.

Motor melaju $\pm 18,8$ m/s, kira-kira 68 km/jam.

7.5 Percepatan dan gaya sentripetal

Benda yang bergerak melingkar dengan kelajuan tetap ternyata tetap mengalami **percepatan**! Kecepatan adalah vektor, dan arahnya terus berubah. Perubahan arah itu menunjuk ke **pusat lingkaran**, sehingga disebut **percepatan sentripetal** ("mencari pusat").

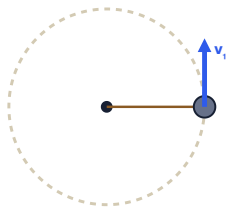


Tebak Dulu!

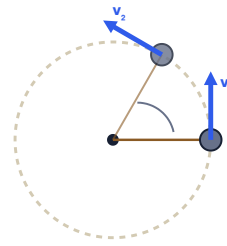
Raka memutar batu yang diikat tali di atas kepalanya (lingkaran mendatar). Tiba-tiba tali putus. Ke mana batu itu terbang (dilihat dari atas)?

- Lurus menjauhi pusat lingkaran, terlempar keluar.
- Tetap melingkar sebentar, lalu lurus.
- Lurus, menyinggung lingkaran di titik tempat tali putus.
- Berputar spiral makin jauh dari pusat.

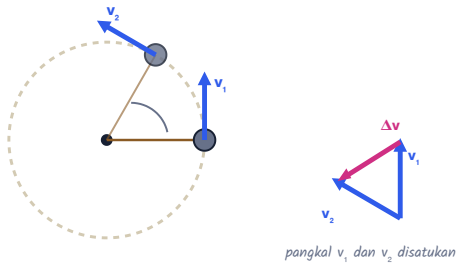
Jawabannya: lurus menyinggung lingkaran. Begitu tali putus, tidak ada lagi gaya ke pusat. Menurut Hukum I Newton, batu meneruskan gerakannya dengan kecepatan saat itu, yang arahnya menyinggung lingkaran. Tidak ada "gaya sentrifugal" yang melemparnya keluar. Batu tampak menjauhi pusat hanya karena ia bergerak lurus, sementara lingkarannya melengkung.



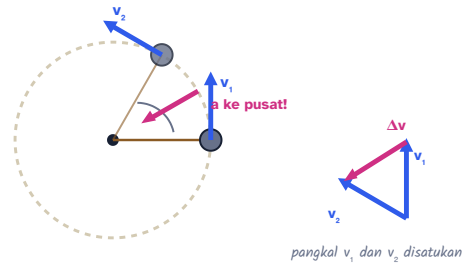
Langkah 1. Dilihat dari atas, batu berputar berlawanan arah jarum jam. Kecepatannya v_1 selalu **menyinggung** lingkaran, tegak lurus tali.



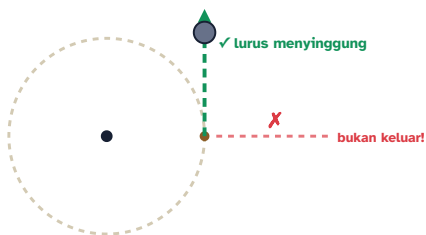
Langkah 2. Sesaat kemudian batu sudah di posisi lain, dengan kecepatan v_2 . Besarnya sama, tetapi **arahnya** berbeda.



Langkah 3. Satukan pangkal v_1 dan v_2 . Perubahan kecepatan Δv adalah panah dari ujung v_1 ke ujung v_2 .



Langkah 4. Pindahkan Δv ke tengah lintasan: arahnya tepat **menuju pusat!** Karena percepatan searah Δv , percepatannya juga menuju pusat. Tali memberi gaya tarik ke pusat itu.



tali putus di titik ini → Hukum I Newton

Langkah 5. Jika tali putus, gaya ke pusat hilang. Batu bergerak lurus menyinggung lingkaran (Hukum I), bukan terlempar keluar.

Besarnya percepatan sentripetal adalah:

$$a_s = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

Makin cepat dan makin tajam tikungannya (r kecil), makin besar percepatan ke pusat yang dibutuhkan. Kecepatan $2\times \rightarrow$ percepatan $4\times$!

v Kelajuan m/s

r Jari-jari lintasan m

a_s Percepatan sentripetal m/s²

PERCEPATAN SENTRIPETAL

4,5
m/s²

Bergerak **15** m/s pada lingkaran berjari-jari **50** m $\rightarrow$ percepatan ke pusat **4,5** m/s². Untuk motor dan pengendara 150 kg, gaya ke pusat yang dibutuhkan adalah $150 \times 4,5$ N.

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

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

Menurut Hukum II Newton, harus ada **gaya sentripetal** $F_s = m \frac{v^2}{r}$ yang menuju pusat. Gaya sentripetal **bukan jenis gaya baru**. Ia adalah peran yang dimainkan gaya-gaya biasa: tegangan tali (batu diputar), gesekan ban (motor menikung), gaya normal dinding (tong setan), atau gravitasi (Bulan mengelilingi Bumi).



AWAS JEBAKAN: "GAYA SENTRIFUGAL"

Saat angkot menikung tajam, tubuhmu terasa "terlempar" ke sisi luar. Tidak ada gaya yang mendorongmu keluar! Tubuhmu hanya ingin terus lurus (kelembaman), sedangkan angkotnya berbelok. Dinding angkot lalu mendorongmu ke **dalam** sebagai gaya sentripetal. "Gaya sentrifugal" hanyalah *gaya semu* yang muncul jika kamu menganalisis dari dalam angkot yang berputar (ingat trik kerangka acuan di Bab 6). Jangan gambar gaya sentrifugal di diagram benda bebas!

CONTOH Motor di bundaran

Kak Nara (total dengan motor 150 kg) mengitari bundaran berjari-jari 20 m dengan kelajuan tetap 10 m/s. Berapa percepatan dan gaya sentripetalnya? Gaya apa yang menyediakannya?

1 $a_s = v^2/r = 10^2/20 = 5 \text{ m/s}^2$.

2 $F_s = ma_s = 150 \times 5 = 750 \text{ N}$, menuju pusat bundaran.

3 Gaya ini berasal dari **gesekan statis** antara ban dan aspal, yang mengarah ke pusat.

Gesekan ban harus menyediakan 750 N ke arah pusat. Jika jalan berpasir dan gesekan maksimum kurang dari 750 N, motor akan tergelincir ke sisi luar.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

PERCEPATAN TANGENSIAL

Jika kelajuan juga berubah (misalnya motor yang mengegas sambil menikung), ada **percepatan tangensial** $a_t = dv/dt$ yang menyinggung lingkaran, di samping percepatan sentripetal $a_s = v^2/r$. Keduanya saling tegak lurus, sehingga percepatan total $a = \sqrt{a_s^2 + a_t^2}$. Jika kecepatan sudut berubah, besaran $\alpha = d\omega/dt$ disebut percepatan sudut, dengan $a_t = \alpha r$. Cengkeraman ban terbatas: percepatan totalnya tidak bisa melebihi μg . Mengerem keras sambil menikung "menghabiskan" jatah gesekan yang seharusnya untuk berbelok. Inilah sebabnya pengendara diajari mengerem *sebelum* masuk tikungan.

7.6 Tikungan datar, tikungan miring, dan tong setan

Tikungan datar: gesekan yang membelokkan

Di jalan datar, satu-satunya gaya mendatar pada mobil atau motor adalah gesekan statis ban. Syarat aman: $mv^2/r \leq \mu_s mg$. Jadi:

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{\mu_s g r}$$

Di tikungan datar, hanya gesekan ban yang menarik kendaraan ke pusat. Jalan licin (μ kecil) atau tikungan tajam (r kecil) berarti harus pelan!

 μ_s

Koefisien gesek ban-jalan

 r

Jari-jari tikungan m

 v_{maks}

Kecepatan maksimum m/s

KECEPATAN MAKSIMUM

19,8

m/s

Tikungan berjari-jari **50 m** dengan $\mu_s = 0,8 \rightarrow$ kecepatan maksimum **19,8 m/s**. Kalikan 3,6 untuk mendapat km/jam. Massa kendaraan tidak berpengaruh!

Satuan Nusantara: $\approx 1,8 \times$ ojek di jalan kota (± 40 km/jam) $\cdot \approx 20\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)
 $\cdot \approx 14 \times$ jalan kaki santai

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

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

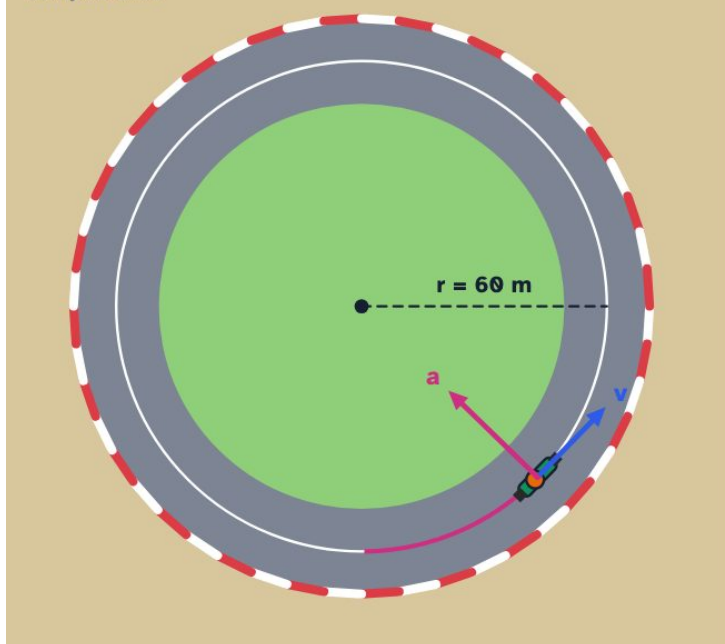
Tikungan miring dan motor yang dimiringkan

Jika jalan dibuat miring ke arah dalam dengan sudut θ , gaya normal ikut condong ke pusat. Komponen mendatarnya bisa menyediakan gaya sentripetal tanpa bantuan gesekan sama sekali, asalkan kendaraan melaju pada **kecepatan rancangan**:

$$\tan \theta = \frac{v^2}{r g} \quad \Longleftrightarrow \quad v_{\text{rancangan}} = \sqrt{r g \tan \theta}$$

Rumus yang sama menentukan seberapa miring pengendara harus memiringkan motornya di tikungan datar, dengan θ = sudut miring motor terhadap garis tegak. Makin cepat atau makin tajam tikungannya, makin miring motornya.

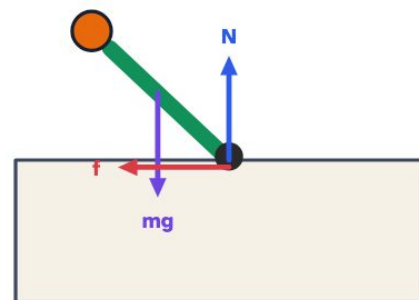
tampak atas



tampak belakang (pusat tikungan di kiri)

motor miring $46,7^\circ$ perlu $10,4 \text{ m/s}^2$ ke pusat

batas aman 78 km/jam



Percepatan ke pusat perlu
 $10,42 \text{ m/s}^2$

Kecepatan maks aman
78 km/jam

Kemiringan motor
 $46,7^\circ$

Keadaan
Menikung...

Atur kecepatan, jari-jari tikungan, koefisien gesek, dan kemiringan jalan, lalu jalankan. Panel kanan menunjukkan pandangan dari belakang motor: gaya normal, gesekan, dan berat. Coba jalan basah (μ kecil) dengan kecepatan yang sama. Kemudian miringkan jalannya: apakah kecepatan maksimumnya naik?

**FISIKA INDONESIA: SIRKUIT MANDALIKA**

Sejak 2021, Sirkuit Mandalika di Lombok, Nusa Tenggara Barat, menjadi tuan rumah balapan motor kelas dunia. Di tikungan, pembalap memiringkan motornya lebih dari 60° terhadap garis tegak, sampai lutut dan siku hampir menyentuh aspal. Dari $\tan \theta = v^2/(rg)$, kemiringan 60° berarti ban harus menyediakan gaya ke pusat sekitar $\tan 60^\circ \approx 1,7$ kali berat motor dan pembalapnya! Itulah sebabnya ban balap dibuat khusus agar sangat lengket, dan dipanaskan sebelum balapan.

Tong setan: menempel di dinding

Di pasar malam, pengendara tong setan melaju di dinding tegak sebuah tong kayu raksasa. Dinding mendorong motor ke arah pusat (gaya normal), dan gaya inilah gaya sentripetalnya: $N = mv^2/r$. Berat motor ditahan oleh **gesekan statis** yang mengarah ke atas. Syarat tidak merosot: $\mu_s N \geq mg$, sehingga $\mu_s mv^2/r \geq mg$.

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{g r}{\mu_s}}$$

Makin cepat motor, makin keras dinding mendorongnya, makin besar gesekan yang menahannya agar tidak merosot. Terlalu pelan? Motor merosot ke dasar.

 r

Jari-jari tong m

 μ_s

Koefisien gesek ban-kayu

 $v_{\min}$

Kecepatan minimum m/s

KECEPATAN MINIMUM

7,5

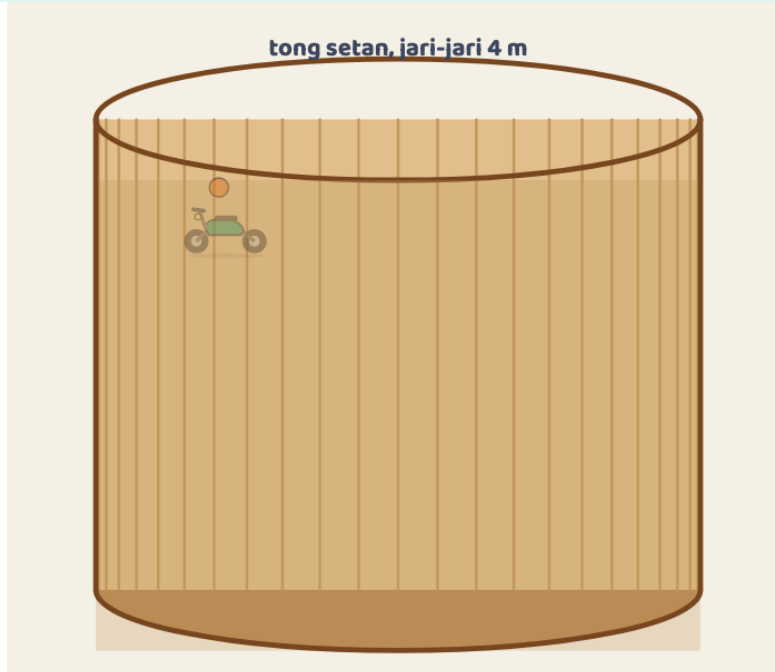
m/s

Tong berjari-jari **4** m dengan $\mu_s = \mathbf{0,7}$ → motor harus melaju minimal **7,5** m/s agar tidak merosot. Massa pengendara tidak berpengaruh!

Satuan Nusantara: $\approx 68\%$ dari ojek di jalan kota (± 40 km/jam) · $\approx 5,3 \times$ jalan kaki santai · $\approx 8\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)

Cek satuan: $\sqrt{(\text{m/s}^2)(\text{m})} = \text{m/s}$, sedangkan μ_s tidak bersatuan.

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



berat mg 1.470 N

gesekan maks $\mu_s N$ 3.516 N

✓ gesekan cukup menahan

v minimum ≈ 29 km/jam $N = mv^2/r = 5.859$ N

massa motor + pengendara 150 kg

Dorongan dinding N

5.859 N

Gesekan maks $\mu_s N$

3.516 N

Kecepatan minimum

29 km/jam

Keadaan

Menempel di dinding

Jalankan, lalu turunkan kecepatan motor pelan-pelan dengan slider. Pada kecepatan berapa motor mulai merosot? Bandingkan dengan Rumus Hidup di atas. Diagram batang membandingkan berat motor dengan gesekan maksimum.

Tong setan berdiameter 8 m. Koefisien gesek statis antara ban dan papan kayu 0,6. (a) Berapa kecepatan minimum motor agar tidak merosot ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)? (b) Jika pengendara melaju 12 m/s, berapa kali berat badannya gaya dorong dinding pada motor?

1 Jari-jari $r = 4$ m. (a) $v_{\min} = \sqrt{gr/\mu_s} = \sqrt{9,8 \times 4/0,6} \approx 8,1$ m/s, sekitar 29 km/jam.

2 (b) Gaya normal $N = mv^2/r$. Bandingkan dengan berat: $\frac{N}{mg} = \frac{v^2}{rg} = \frac{144}{4 \times 9,8} \approx 3,7$.

3 Pengendara "ditekan" ke dinding dengan gaya $\pm 3,7$ kali beratnya, seperti berbaring di lantai sambil ditindih tiga orang lagi!

(a) $\pm 8,1$ m/s. (b) Gaya normal $\pm 3,7$ kali berat. Karena jauh di atas kecepatan minimum, gesekan yang tersedia ($0,6 \times 3,7 \approx 2,2$ kali berat) lebih dari cukup untuk menahan motor.

**TIKUNGAN MIRING DENGAN GESEKAN DAN AYUNAN KONIS**

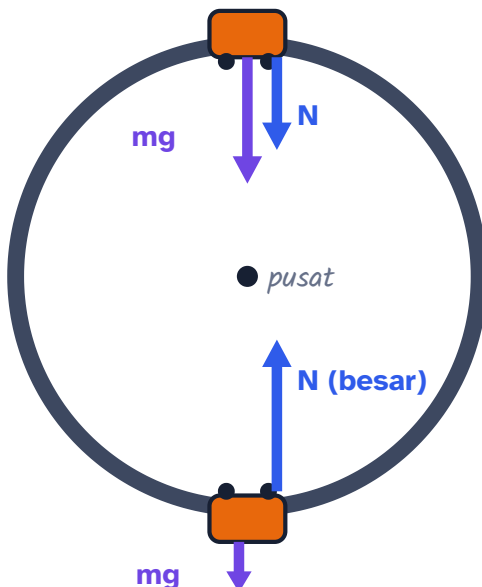
Jika tikungan miring θ juga punya gesekan μ_s , kecepatan maksimumnya

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{rg \frac{\sin \theta + \mu_s \cos \theta}{\cos \theta - \mu_s \sin \theta}}.$$

Untuk $\theta = 0$ rumus ini kembali menjadi $\sqrt{\mu_s g r}$. Wahana "kursi terbang" di pasar malam adalah **ayunan konis**: rantai sepanjang L membentuk sudut θ dengan garis tegak, dengan $\tan \theta = v^2/(rg)$. Periodenya $T = 2\pi\sqrt{L \cos \theta/g}$ (jika rantai digantung di sumbu putar), tidak bergantung pada massa penumpang. Penumpang gemuk dan kurus berayun pada sudut yang sama!

7.7 Lingkaran vertikal: kora-kora dan roller coaster

Pada lingkaran vertikal, gravitasi ikut "bermain". Ambil arah ke pusat sebagai positif:

**Di puncak (kepala di bawah):**

$$N + mg = m v^2/r$$

$N = 0$ saat $v = \sqrt{g r} \rightarrow$ batas lolos
terasa ringan, bahkan melayang

Di titik terbawah:

$$N - mg = m v^2/r$$

$$N = m(g + v^2/r) > mg$$

terasa lebih berat, tertekan ke kursi

Gaya pada kereta roller coaster. Di puncak, gaya normal dan berat sama-sama mengarah ke bawah (ke pusat).

Di dasar, gaya normal harus mengalahkan berat sekaligus menyediakan gaya sentripetal.

Di puncak lingkaran, kereta paling "kritis". Gaya normal tidak boleh negatif (rel hanya bisa *mendorong*), sehingga kecepatan di puncak minimal $v_{\text{puncak}} = \sqrt{gr}$. Jika lebih pelan, kereta akan lepas dari rel. Itulah sebabnya ember berisi air yang diputar cepat secara vertikal tidak tumpah. Di puncak, gerak melingkar menuntut percepatan ke pusat (ke bawah) sebesar v^2/r . Jika v^2/r lebih besar dari g , gravitasi saja tidak cukup, sehingga dasar ember justru ikut mendorong air ke bawah dan air tetap menempel di ember.

Wahana **kora-kora** (perahu ayun) bergerak pada busur lingkaran. Di titik terbawah, kelajuannya paling besar, sehingga kursi mendorongmu paling kuat dan kamu merasa "lebih berat". Di dekat puncak ayunan, kelajuan kecil dan gaya normal mengecil, sehingga perut terasa melayang, persis seperti di lift Bab 6.

Sari (45 kg) duduk di kora-kora yang berayun pada lengan sepanjang 10 m. Di titik terbawah kelajuannya 9 m/s. Dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, berapa gaya dorong kursi pada Sari, dan berapa "berat yang terasa" (dalam kg)?

- 1 Di titik terbawah, pusat lingkaran ada di atas Sari. Hukum II: $N - mg = mv^2/r$.
- 2 $N = m(g + v^2/r) = 45(9,8 + 81/10) = 45(17,9) \approx 806 \text{ N}$.
- 3 "Berat terasa" = $N/g = 806/9,8 \approx 82 \text{ kg}$, hampir dua kali massanya ($N/mg \approx 1,8$).

Kursi mendorong Sari $\pm 806 \text{ N}$, sehingga ia merasa seberat $\pm 82 \text{ kg}$, sekitar 1,8 kali berat biasanya. Massanya tetap 45 kg.

MITOS

"Di puncak loop roller coaster, ada gaya ke atas yang menahan penumpang agar tidak jatuh."

MITOS

"Air di mesin pengering terlempar keluar oleh gaya sentrifugal."

FAKTA

Di puncak, berat

dan

gaya normal sama-sama mengarah ke bawah. Penumpang sebenarnya sedang "jatuh" ke pusat lingkaran, tetapi bergerak ke samping cukup cepat sehingga lintasannya tetap melengkung mengikuti rel.

FAKTA

Tabung mendorong pakaian ke pusat. Air yang lolos lewat lubang tidak lagi didorong, sehingga bergerak lurus menyinggung tabung (Hukum I) dan keluar. Yang "hilang" adalah gaya ke pusat, bukan munculnya gaya keluar.



Ban beralur saat hujan

Alur ban membuang air dari bawah ban agar karet tetap menyentuh aspal. Ban gundul bisa "mengapung" di atas lapisan air dan kehilangan gesekan.



Rem ABS

Mencegah roda terkunci agar gesekan tetap statis (lebih besar) dan setir tetap bisa dikendalikan saat mengerem mendadak.



Bianglala & kora-kora

Wahana pasar malam adalah laboratorium gerak melingkar: terasa berat di bawah, terasa ringan di atas.



Mesin cuci pengering

Tabung berputar ± 1.000 rpm. Air lolos lewat lubang karena tidak ada lagi yang mendorongnya ke pusat.



Tikungan jalan dimiringkan

Tikungan jalan raya dan jalan layang dibuat sedikit miring ke dalam agar kendaraan tidak hanya bergantung pada gesekan ban.

Cek Cepat

Lemari didorong 80 N tetapi tidak bergeser. Gaya gesek statis pada lemari adalah...

0 N

lebih dari 80 N

80 N , berlawanan arah dorongan

selalu sama dengan $\mu_s mg$

Saat kamu berjalan maju, gaya gesek lantai pada telapak kakimu mengarah...

ke depan

ke belakang

ke atas

tidak ada, karena kaki tidak tergelincir

Batu diputar dengan tali dalam lingkaran mendatar, lalu talinya putus. Batu akan bergerak...

lurus menjauhi pusat

tetap melingkar

spiral ke arah pusat

lurus menyinggung lingkaran di titik putus

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. A · 3. D

Tantangan Rumah: gelas air yang tidak tumpah

Bahan: gelas plastik kecil (jangan kaca), tali rafia ±60 cm, sedikit air, stopwatch HP, meteran.
Lakukan di halaman terbuka, jauh dari orang lain, dan siap basah!

1. Ikat gelas plastik dengan tali seperti pegangan ember. Isi air kira-kira seperempat gelas.
2. Putar gelas dalam lingkaran vertikal di samping tubuhmu dengan cepat dan mantap. Air tidak tumpah walaupun gelas terbalik di puncak!
3. Ukur jari-jari lingkaran r (dari bahu sampai dasar gelas) dan waktu 10 putaran. Hitung kelajuan $v = 2\pi r/T$.
4. Bandingkan dengan kelajuan minimum di puncak, $\sqrt{gr}$. Lalu putar makin pelan (dengan hati-hati) sampai air mulai tumpah.

Pertanyaan: Apakah kelajuanmu lebih besar dari $\sqrt{gr}$? Mengapa air tidak tumpah di puncak, padahal tidak ada yang "menahannya" dari bawah? Gaya apa yang menyediakan gaya sentripetal pada air di puncak?

RINGKASAN KILAT Bab 7 dalam 3 menit

Kamu sekarang bisa...

- membedakan gesekan **statis** dan **kinetis**, lalu memakai $f_s \leq \mu_s N$ dan $f_k = \mu_k N$
- menganalisis benda di **bidang miring** dan menentukan sudut kritis $\tan \theta_c = \mu_s$
- memakai besaran sudut (radian, ω , f , T) dan hubungan $v = \omega r$
- menghitung **gaya sentripetal** pada tikungan datar, tikungan miring, dan tong setan
- menganalisis gerak melingkar vertikal (kora-kora, roller coaster) tanpa memakai "gaya sentrifugal" yang keliru

Istilah kunci

Rumus penting

$$f_{s,\text{maks}} = \mu_s N = \mu_s m g$$

Gesekan statis maksimum. Gesekan statis bisa bernilai berapa saja dari nol sampai batas ini. Dorongan harus melebihi batas ini agar benda mulai bergeser (di bidang datar, $N = mg$).

$$\tan \theta_c = \mu_s$$

Sudut kritis bidang miring. Kemiringan saat benda tepat akan meluncur hanya bergantung pada koefisien gesek, tidak pada massa benda!

$$a_s = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

Percepatan sentripetal. Makin cepat dan makin tajam tikungannya (r kecil), makin besar percepatan ke pusat yang dibutuhkan. Kecepatan $2\times \rightarrow$ percepatan $4\times$!

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{\mu_s g r}$$

Kecepatan maksimum di tikungan datar. Di tikungan datar, hanya gesekan ban yang menarik kendaraan ke pusat. Jalan licin (μ kecil) atau tikungan tajam (r kecil) berarti harus pelan!

$$v_{\text{min}} = \sqrt{\frac{g r}{\mu_s}}$$

Kecepatan minimum di tong setan. Makin cepat motor, makin keras dinding mendorongnya, makin besar gesekan yang menahannya agar tidak merosot. Terlalu pelan? Motor merosot ke dasar.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Rumus $f_s = \mu_s N$ bukan rumus gesekan statis, melainkan rumus batas maksimumnya.
- Saat angkot menikung tajam, tubuhmu terasa "terlempar" ke sisi luar.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=7

🧩 Teka-teki untuk Bab 8

Kereta roller coaster tidak punya mesin. Ia hanya ditarik ke puncak lintasan, lalu dilepas. Agar kereta lolos melewati loop berjari-jari R tanpa jatuh, kamu tahu kecepatannya di puncak loop minimal $\sqrt{gR}$. Dari ketinggian berapa kereta harus dilepas? Lebih tinggi dari puncak loop ($2R$), tetapi berapa tepatnya?

▼ Intip petunjuk

Hukum Newton saja sulit menjawabnya, karena gaya pada kereta terus berubah sepanjang lintasan. Gunakan "mata uang" baru yang selalu kekal: **energi**. Jawabannya ternyata $h = 2,5R$, dan cara mendapatkannya ada di Bab 8: Usaha, Energi, dan Daya.

08 Usaha, Energi & Daya: Mata Uang Alam Semesta

Raka mendorong tembok sampai bermandi keringat, tetapi kata fisika usahanya nol. Roller coaster meluncur naik-turun tanpa mesin. Rahasiannya satu: energi tidak pernah hilang, ia hanya berganti rupa.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **usaha** $W = F s \cos \theta$ dan menjelaskan kapan usaha bernilai positif, negatif, atau nol;
- memakai **teorema usaha-energi** serta menghitung energi kinetik, energi potensial gravitasi, dan energi pegas;
- menerapkan **kekekalan energi mekanik** pada roller coaster, ayunan, dan benda jatuh, termasuk saat ada gesekan;
- menghitung **daya**, **efisiensi**, dan energi listrik dalam kWh;
- menjelaskan cara tuas, katrol, takal, dan bidang miring "menukar" gaya dengan jarak (**keuntungan mekanis**).

TEMBOK YANG TAK MAU BERGESER

KOMIK • 4 PANEL

Jam istirahat, di belakang kelas

RAKA

Hiyaaa! Sudah sepuluh menit aku mendorong tembok ini. Usahaku pasti besaaaar sekali!

NGGHHH!

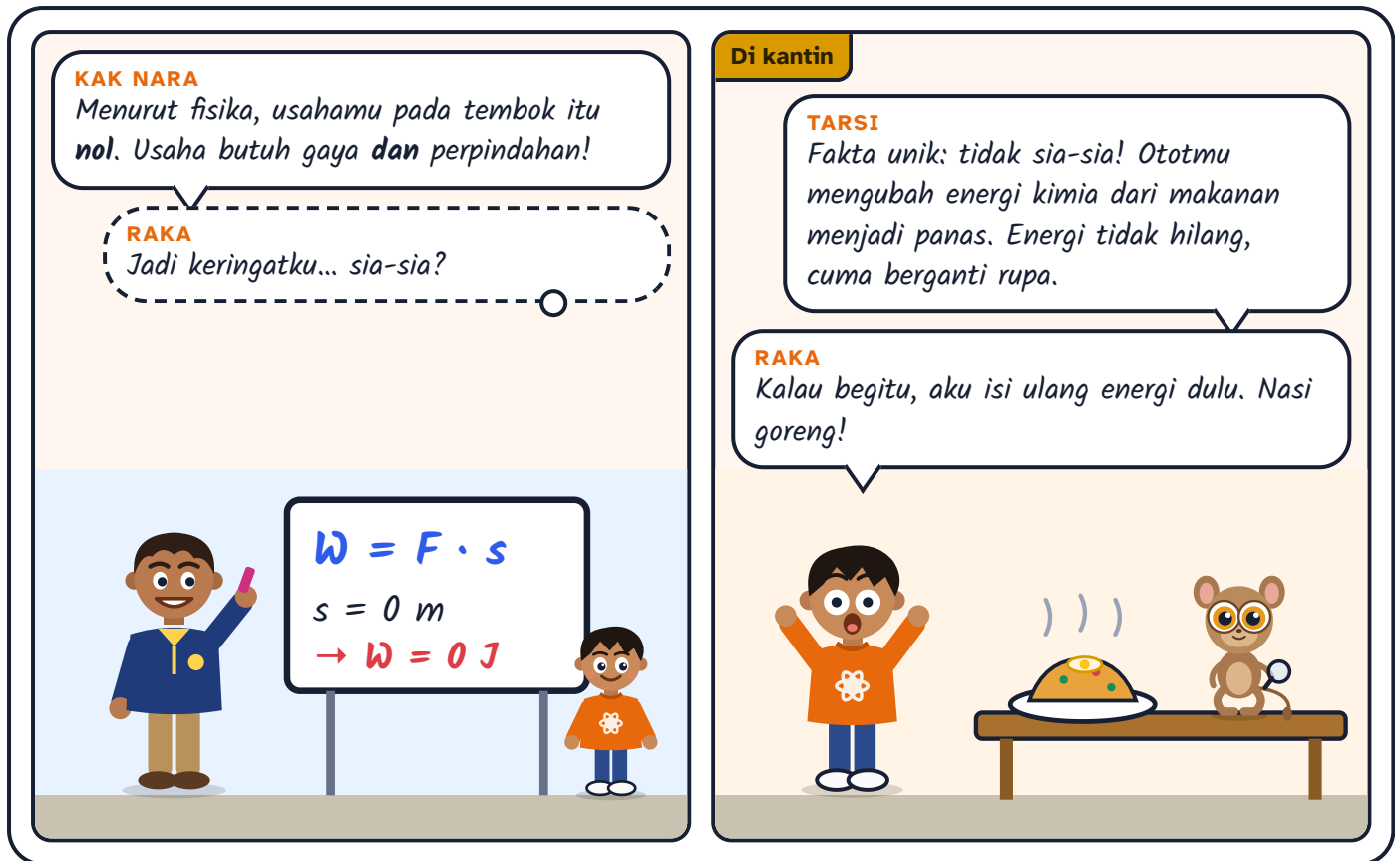
**SARI**

Temboknya bergeser berapa senti, Rak? Aku sudah pasang meteran.

RAKA

Nol... Tapi aku capek banget, Sar!





Tebak Dulu!

Raka mendorong tembok dengan gaya 200 N selama 10 menit, tetapi tembok sama sekali tidak bergeser. Berapa usaha yang dilakukan Raka pada tembok?

2.000 J, karena 200 N × 10 menit.

120.000 J, karena 200 N × 600 detik.

0 J, karena tembok tidak berpindah.

Tidak bisa dihitung tanpa massa tembok.

Jawabannya: 0 J. Dalam fisika, usaha adalah gaya dikali *perpindahan*, bukan gaya dikali *waktu*. Tembok tidak berpindah, jadi tembok tidak menerima energi sedikit pun. Rasa capek Raka nyata, tetapi energinya berubah menjadi panas di dalam ototnya sendiri, bukan masuk ke tembok.

8.1 Usaha: gaya yang membuat benda berpindah

Dalam bahasa sehari-hari, "usaha" berarti berjuang keras. Dalam fisika, artinya lebih tegas. **Usaha** (W , dari *work*) terjadi jika sebuah gaya membuat benda **berpindah**, dan gaya itu (atau sebagian darinya) searah perpindahan. Usaha adalah cara memindahkan energi: siapa yang melakukan usaha, memberikan energi kepada benda.

Usaha oleh gaya tetap. $W = F s \cos \theta$, dengan θ sudut antara arah gaya dan arah perpindahan. Satuannya **joule** (J): 1 J adalah usaha gaya 1 N yang memindahkan benda sejauh 1 m.

Bahasa sederhana • Gampangnya: **usaha = dorongan × jarak pindah**. Kalau kamu mendorong lemari dan lemarinya bergeser, kamu melakukan usaha. Kalau lemarinya tidak bergeser sedikit pun, usahamu nol, walaupun kamu kelelahan.

Sudut θ	$\cos \theta$	Usaha	Contoh
0° (gaya searah gerak)	1	positif, maksimum: $W = Fs$	mendorong gerobak bakso ke depan
antara 0° dan 90°	antara 0 dan 1	positif, tetapi lebih kecil	menarik koper dengan pegangan miring
90° (tegak lurus)	0	nol	memikul pikulan sambil berjalan mendatar; gaya normal lantai
180° (berlawanan)	-1	negatif : mengambil energi	gaya gesek dan rem pada motor yang melaju

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

Usaha = gaya × perpindahan × kosinus sudut di antara keduanya. Hanya bagian gaya yang searah gerak yang 'dihitung'.

F

Gaya N

s

Perpindahan m

θ

Sudut gaya-perpindahan °

W

Usaha J

USAHA

399,3

J

Gaya **50** N, perpindahan **10** m, sudut **37°** → usaha **399,3** J. Coba sudut **90°**: usahanya nol! Lebih dari **90°**: usahanya negatif.

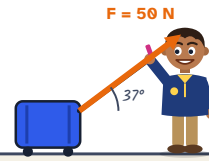
Satuan Nusantara: ≈ 10% dari 1 kkal (kalori makanan)

Cek satuan: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$. Satu joule kira-kira usaha mengangkat sebutir apel kecil setinggi 1 meter.

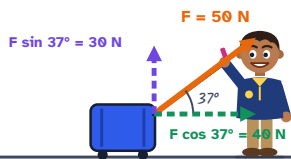
RUMUS HIDUP: GESER NILAINYA DAN KUMPULKAN KARTUNYA DI [AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#RM-USAHA-GAYA](https://aurumgen.my.id/physicspedia#RM-USAHA-GAYA)



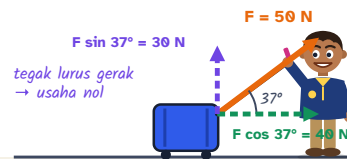
Langkah 1. Kak Nara menarik koper beroda sejauh 10 m dengan gaya 50 N. Pegangannya membentuk sudut 37° terhadap lantai. Berapa usahanya?



Langkah 2. Gaya tarik $F = 50$ N mengarah miring, sepanjang pegangan koper.

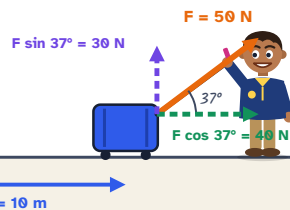


Langkah 3. Uraikan gaya menjadi dua komponen (pakai $\cos 37^\circ \approx 0,8$ dan $\sin 37^\circ \approx 0,6$): mendatar 40 N searah gerak, tegak 30 N.



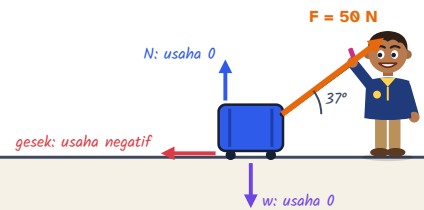
Langkah 4. Komponen tegak hanya "mengangkat sedikit" koper dan tegak lurus perpindahan, sehingga **tidak melakukan usaha**. Yang bekerja hanya 40 N.

$$W = 40 \text{ N} \times 10 \text{ m} = 400 \text{ J}$$



Langkah 5. Koper berpindah 10 m. Usahnya $W = F \cos \theta \cdot s = 40 \times 10 = 400 \text{ J}$.

$$W = 40 \text{ N} \times 10 \text{ m} = 400 \text{ J}$$



Langkah 6. Bonus: berat dan gaya normal tegak lurus gerak, jadi usahanya nol. Gesekan roda berlawanan arah gerak, jadi usahanya **negatif**: ia mengambil energi dari koper.



AWAS JEBAKAN: USAHA $\neq$ CAPEK

Memikul tas sambil diam, menahan galon di atas kepala, atau berjalan mendatar sambil memikul pikulan: semuanya melelahkan, tetapi usaha gaya angkatmu pada beban **nol**. Pada dua kasus pertama bebannya tidak berpindah. Pada kasus ketiga gaya angkatmu (ke atas) tegak lurus perpindahan (mendatar). Contoh paling ekstrem: gravitasi Bumi terus menarik satelit yang mengorbit melingkar, tetapi karena gayanya selalu tegak lurus gerak, gravitasi tidak melakukan usaha dan kelajuan satelit tetap.

CONTOH Mendorong gerobak sayur

Bu Ani mendorong gerobak sayur dengan gaya mendatar 80 N sejauh 25 m. Berapa usaha yang dilakukannya?

1 Gaya searah perpindahan, jadi $\theta = 0^\circ$ dan $\cos \theta = 1$.

2 $W = F s = 80 \times 25 = 2000 \text{ J}$.

Usahnya 2.000 J = 2 kJ. Energi sebanyak itu berpindah dari otot Bu Ani ke gerobak (lalu sebagian besar menjadi panas akibat gesekan roda).



LANJUT • IB & OLIMPIADE

USAHA OLEH GAYA YANG BERUBAH = LUAS DI BAWAH GRAFIK

Jika gaya berubah sepanjang lintasan, usaha adalah **luas di bawah grafik** F - x : $W = \int F \, dx$.

Dalam bentuk vektor, $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$, yaitu hasil kali titik (Bab 3). Contoh: menarik pegas dari $x = 0$ sampai x dengan gaya $F = kx$ menghasilkan luas segitiga $\frac{1}{2} \cdot x \cdot kx = \frac{1}{2}kx^2$. Itulah energi pegas yang akan kita temui di 8.3.

8.2 Energi kinetik dan teorema usaha-energi

Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Bayangkan energi sebagai **mata uang alam semesta**: bisa ditabung (energi potensial), dibelanjakan (energi kinetik), ditukar ke mata uang lain (panas, listrik, bunyi), tetapi jumlah totalnya tidak pernah berubah.

Benda yang bergerak memiliki **energi kinetik**. Bola yang melaju bisa memecahkan kaca, dan air sungai yang deras bisa memutar kincir. Makin besar massa dan kecepatannya, makin besar energi kinetiknya, dan kecepatan berpengaruh **kuadrat**!

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Energi gerak = setengah $\times$ massa $\times$ kecepatan kuadrat. Kecepatan dua kali lipat $\rightarrow$ energi empat kali lipat!

 m

Massa kg

 v

Kecepatan m/s

 E_k

Energi kinetik J

ENERGI KINETIK

30.000

J

Benda **150** kg yang melaju **20** m/s membawa energi kinetik **30.000** J. Gandakan kecepatannya: energinya menjadi 4 kali!

Satuan Nusantara: $\approx 7,2 \times 1$ kkal (kalori makanan)

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

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

Teorema usaha-energi. Usaha total (usaha oleh *semua* gaya) pada benda sama dengan perubahan energi kinetiknya: $W_{\text{total}} = \Delta E_k = \frac{1}{2} m v_{\text{akhir}}^2 - \frac{1}{2} m v_{\text{awal}}^2$.

Teorema ini menjelaskan sesuatu yang penting di jalan raya. Saat motor mengerem, gaya rem melakukan usaha negatif $-F_{\text{rem}} s$ yang menghabiskan energi kinetik $\frac{1}{2} m v^2$. Jadi jarak pengereman $s = \frac{m v^2}{2 F_{\text{rem}}}$ **sebanding dengan** v^2 . Ngebut dua kali lebih cepat berarti butuh jarak rem **empat kali lebih jauh**.

Motor beserta pengendaranya bermassa 150 kg melaju 72 km/jam. Rem memberi gaya rata-rata 1.200 N. Berapa jarak pengereman? Berapa jaraknya jika motor melaju 144 km/jam?

- 1 Ubah satuan: $72 \text{ km/jam} = 20 \text{ m/s}$.
- 2 Energi kinetik awal: $E_k = \frac{1}{2} \times 150 \times 20^2 = 30\,000 \text{ J}$.
- 3 Teorema usaha-energi: $-Fs = 0 - E_k \rightarrow s = \frac{30\,000}{1200} = 25 \text{ m}$.
- 4 Pada 144 km/jam (40 m/s), $E_k = \frac{1}{2} \times 150 \times 40^2 = 120\,000 \text{ J}$, sehingga $s = 100 \text{ m}$.

Kecepatan dua kali lipat membuat jarak pengereman empat kali lipat (25 m → 100 m). Itu sebabnya batas kecepatan di jalan sekolah sangat rendah.



TRIK KAK NARA: SATUAN ENERGI DARI PIRING MAKAN

Energi kinetik motor tadi (30.000 J) kira-kira sama dengan energi dalam **7 kkal**, kurang dari sebutir permen! Sebaliknya, energi **sepiring nasi goreng (±2,5 juta joule)** cukup untuk mempercepat motor itu dari diam sampai 72 km/jam lebih dari 80 kali. Tubuh kita ternyata "baterai" yang luar biasa.

8.3 Energi potensial: tabungan energi

Energi potensial adalah energi yang "ditabung" karena posisi atau bentuk benda. Kelapa di puncak pohon, air di bendungan, dan ketapel yang diregangkan menyimpan energi yang siap "dicairkan" menjadi gerak.

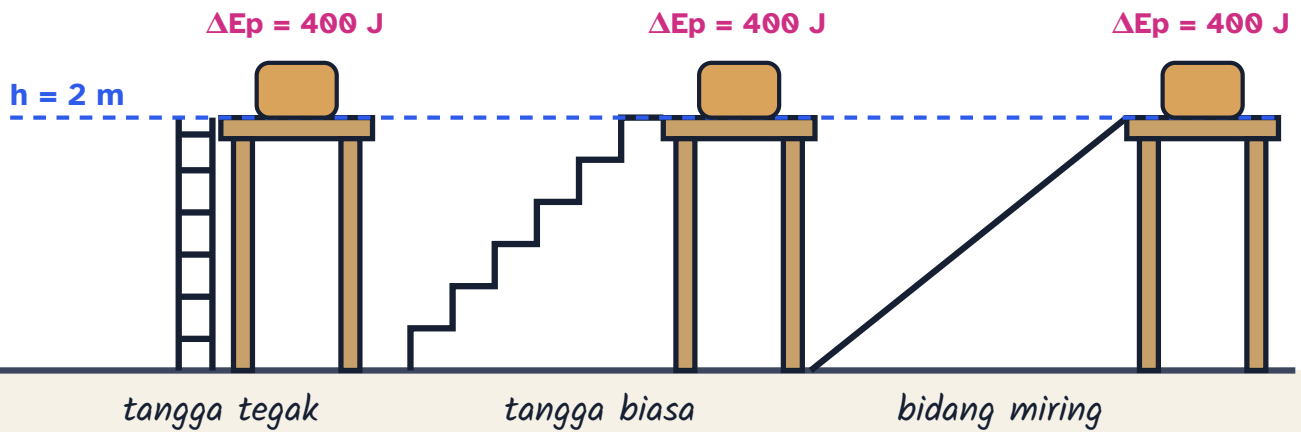
Energi potensial gravitasi

Untuk mengangkat benda bermassa m setinggi h dengan pelan-pelan, kamu harus melawan beratnya mg sejauh h . Usaha itu tersimpan sebagai $E_p = mgh$. Ketinggian h diukur dari **titik acuan** yang boleh kamu pilih sendiri (lantai, meja, atau permukaan laut). Yang selalu bermakna secara fisis adalah **perubahan** ΔE_p , bukan nilai mutlaknya.

Bahasa sederhana • Makin tinggi dan makin berat sebuah benda, makin besar energi tabungannya. Itu sebabnya buah kelapa yang jatuh dari pohon tinggi sangat berbahaya: energi tabungannya besar dan berubah menjadi energi gerak saat jatuh.

Energi potensial pegas

Pegas yang ditarik atau ditekan sejauh x menyimpan energi $E_p = \frac{1}{2}kx^2$, dengan k konstanta pegas (N/m). Energi ini berasal dari usaha melawan gaya pegas $F = kx$ yang makin besar saat pegas makin teregang (luas segitiga di grafik F - x). Shock absorber motor, trampolin, dan busur panah memakai tabungan energi semacam ini.



Karung beras 20 kg dinaikkan ke lantai rumah panggung setinggi 2 m ($g = 10 \text{ m/s}^2$) lewat tiga jalur berbeda. Pertambahan energi potensialnya selalu $mgh = 400 \text{ J}$. Gravitasi tidak peduli jalan mana yang kamu pilih: inilah ciri **gaya konservatif**.

	Gaya konservatif	Gaya nonkonservatif
Contoh	gravitasi, gaya pegas, gaya listrik	gesekan, hambatan udara, dorongan otot, rem
Usaha bergantung jalur?	tidak; hanya posisi awal dan akhir	ya; jalur lebih panjang, usaha gesek lebih besar
Usaha pada lintasan tertutup (kembali ke titik awal)	nol	tidak nol (energi "bocor" menjadi panas)
Punya energi potensial?	ya (mgh , $\frac{1}{2}kx^2$)	tidak

Peluncur mainan memiliki pegas dengan $k = 500 \text{ N/m}$ yang ditekan 4 cm . Pegas melontarkan bola plastik 10 g tegak ke atas. Abaikan gesekan dan gunakan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Berapa kecepatan bola saat lepas, dan setinggi apa bola naik?

- 1 Energi pegas: $E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 500 \times 0,04^2 = 0,4 \text{ J}$.
- 2 Semua berubah menjadi energi kinetik (abaikan kenaikan kecil selama 4 cm): $\frac{1}{2}mv^2 = 0,4 \rightarrow v = \sqrt{2 \times 0,4/0,01} = \sqrt{80} \approx 8,9 \text{ m/s}$.
- 3 Di puncak, semua menjadi energi potensial gravitasi: $mgh = 0,4 \rightarrow h = \frac{0,4}{0,01 \times 10} = 4 \text{ m}$.

Bola melesat $\pm 8,9 \text{ m/s}$ dan naik sampai 4 m , setinggi atap rumah! Itu sebabnya mainan pelontar tidak boleh diarahkan ke mata siapa pun.

8.4 Kekekalan energi mekanik: roller coaster tanpa mesin



Tebak Dulu!

Di taman air ada dua perosotan dari menara yang sama tingginya. Perosotan A lurus dan curam. Perosotan B panjang dan berkelok-kelok. Keduanya sangat licin (gesekan diabaikan). Siapa yang tiba di kolam dengan kelajuan lebih besar?

Perosotan A, karena lebih curam.

Perosotan B, karena lintasannya lebih panjang untuk mempercepat.

Sama besar, karena ketinggiannya sama.

Bergantung pada berat anak yang meluncur.

Jawabannya: sama besar. Tanpa gesekan, energi potensial mgh di puncak berubah seluruhnya menjadi energi kinetik di bawah: $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$, sehingga $v = \sqrt{2gh}$. Bentuk lintasan dan massa tidak muncul dalam rumus! Yang berbeda hanyalah **waktu** tempuhnya: perosotan curam lebih cepat sampai.

Energi mekanik adalah jumlah energi kinetik dan energi potensial: $E_m = E_k + E_p$. Jika hanya gaya konservatif yang melakukan usaha (tanpa gesekan dan hambatan udara), energi mekanik **kek**al. Energi hanya berpindah bolak-balik antara bentuk kinetik dan potensial.

Hukum kekekalan energi mekanik. $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$, atau $\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$.

RUMUS HIDUP

Kelajuan setelah turun setinggi h (tanpa gesekan)

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

Energi potensial yang 'dicairkan' saat turun setinggi h berubah menjadi tambahan energi kinetik. Massa tidak berpengaruh!

h Penurunan tinggi m

v_0 Kelajuan awal m/s

v Kelajuan di bawah m/s

KELAJUAN DI BAWAH

19,8

m/s

Turun **20** m dengan kelajuan awal **0** m/s → kelajuan di bawah **19,8** m/s, berapa pun massanya dan apa pun bentuk lintasannya (asal tanpa gesekan).

Satuan Nusantara: $\approx 1,8 \times$ ojek di jalan kota (± 40 km/jam) $\cdot \approx 20\%$ dari kereta cepat Whoosh (350 km/jam)
 $\cdot \approx 14 \times$ jalan kaki santai

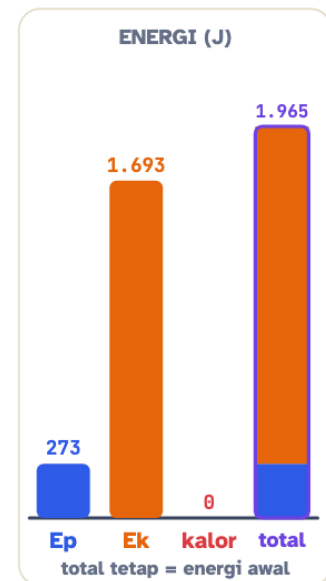
Cek satuan: $\sqrt{\text{m/s}^2 \cdot \text{m}} = \sqrt{\text{m}^2/\text{s}^2} = \text{m/s}$

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



TRIK KAK NARA: DERET 5–20–45

Dengan $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan mulai dari diam: jatuh **5 m** → 10 m/s, jatuh **20 m** → 20 m/s, jatuh **45 m** → 30 m/s, jatuh **80 m** → 40 m/s. Polanya $h = 5n^2 \rightarrow v = 10n$. Hafalkan empat pasangan ini, dan banyak soal pilihan ganda bisa kamu jawab dalam hitungan detik.



Tinggi

0,7 m

Kelajuan

9,2 m/s

Ep

273 J

Ek

1.693 J

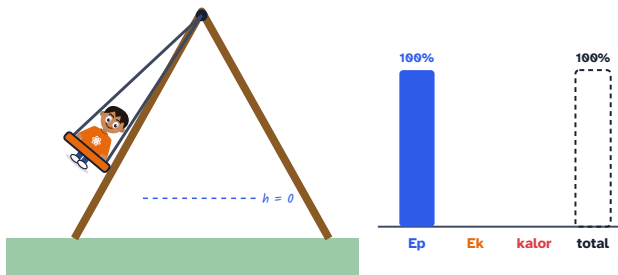
Kalor

0 J

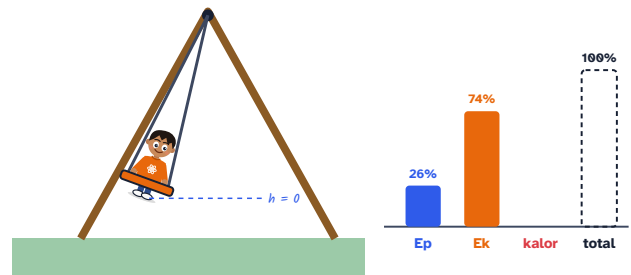
Keadaan

Meluncur (tanpa gesekan)

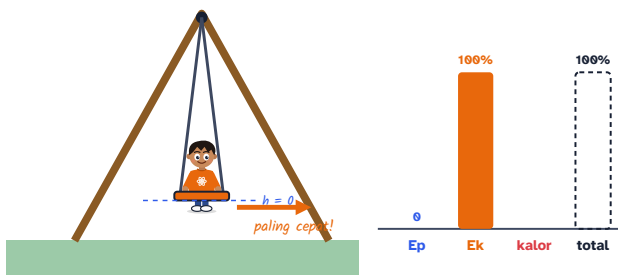
Ketuk atau seret lintasan untuk memilih titik awal, lalu tekan **Jalankan**. Perhatikan batang energi: biru = E_p , oranye = E_k , merah = kalor. Dengan gesekan nol, apakah Raka bisa melewati bukit yang *lebih tinggi* dari titik awalnya? Lalu naikkan gesekan: ke mana energinya "pergi"?



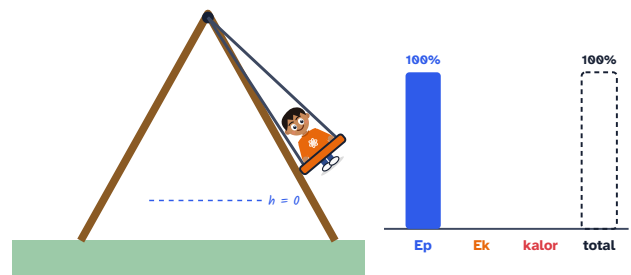
Langkah 1. Kak Nara menarik ayunan Raka ke belakang (simpangan 40°), lalu melepaskannya. Di titik tertinggi kecepatannya nol: semua energi berupa E_p .



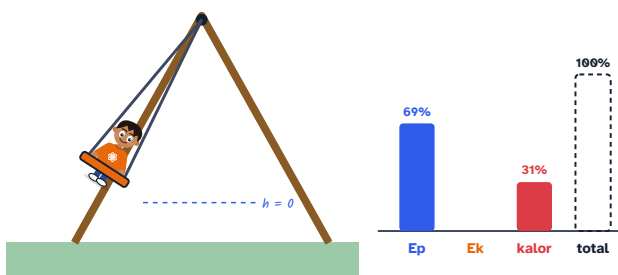
Langkah 2. Di tengah perjalanan turun (simpangan 20°), tinggi Raka tinggal sekitar seperempat tinggi awal. Sebagian besar E_p sudah berubah menjadi E_k .



Langkah 3. Di titik terendah, E_p (terhadap titik terendah) nol dan E_k maksimum. Di sinilah ayunan paling cepat.



Langkah 4. Ayunan naik lagi sampai ketinggian yang sama di sisi lain (jika gesekan diabaikan). E_k kembali menjadi E_p .



Langkah 5. Kenyataannya, hambatan udara dan gesekan di engsel mengubah sebagian energi menjadi panas. Ayunan makin rendah, tetapi **total** energi ($E_p + E_k + \text{kalor}$) tetap 100%.

Jika ada gesekan, energi mekanik **berkurang**, tetapi energi total tetap kekal. Selisihnya berubah menjadi **kalor** (energi termal) dan sedikit bunyi: $E_{m1} = E_{m2} + Q_{\text{gesek}}$. Ini adalah bentuk umum **hukum kekekalan energi**: energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya berubah bentuk.

Sari (40 kg) meluncur dari puncak perosotan setinggi 5 m, mulai dari diam. Di bawah, kelajuannya 8 m/s. Gunakan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Berapa energi yang berubah menjadi kalor?

- 1 Energi mekanik di puncak: $E_p = mgh = 40 \times 10 \times 5 = 2000 \text{ J}$ (dan $E_k = 0$).
- 2 Energi mekanik di bawah: $E_k = \frac{1}{2} \times 40 \times 8^2 = 1280 \text{ J}$ (dan $E_p = 0$).
- 3 Kalor gesekan: $Q = 2000 - 1280 = 720 \text{ J}$.

Sebanyak 720 J (36%) berubah menjadi panas pada celana renang dan perosotan. Tanpa gesekan, Sari akan tiba dengan $v = \sqrt{2 \times 10 \times 5} = 10 \text{ m/s}$.



TAMU DARI MASA LALU

Pada tahun 1840-an, **James Prescott Joule** (1818–1889), putra pemilik pabrik bir di Inggris, menjatuhkan beban yang memutar kincir kecil di dalam air. Gesekan kincir memanaskan air, dan Joule mengukur kenaikan suhu yang sangat kecil itu dengan termometer amat teliti. Hasilnya: usaha mekanik tertentu *selalu* menghasilkan panas dalam jumlah tertentu. Panas ternyata bukan "zat", melainkan bentuk energi. Untuk menghormatinya, satuan energi dinamai **joule**.

MITOS

"Energi bisa habis. Buktinya, bola yang memantul akhirnya berhenti."

MITOS

"Anak yang lebih berat meluncur lebih cepat di perosotan licin."

FAKTA

Energi bola tidak lenyap. Setiap pantulan mengubah sebagian energi menjadi panas (bola dan lantai sedikit menghangat) dan bunyi "tuk". Energi totalnya tetap; hanya bentuknya yang tidak lagi berguna untuk memantul.

FAKTA

Tanpa gesekan,
 $v = \sqrt{2gh}$
 sama sekali tidak bergantung pada massa. Anak berat memang punya energi lebih besar, tetapi juga butuh energi lebih besar untuk bergerak dengan kecepatan yang sama.

8.5 Daya dan efisiensi: seberapa cepat energi berpindah

Raka dan Sari sama-sama naik ke lantai tiga sekolah. Usaha melawan gravitasi kira-kira sama, tetapi Raka berlari dan sampai lebih dulu. Raka mengeluarkan **daya** lebih besar. Daya adalah **laju** usaha: berapa banyak energi yang dipindahkan setiap detik.

Daya. $P = \frac{W}{t}$, satuannya **watt** (W): 1 W = 1 J/s. Untuk benda yang didorong gaya F dengan kecepatan v , $P = Fv$.

RUMUS HIDUP Daya saat naik tangga

$$P = \frac{m g h}{t}$$

Daya = energi yang dipakai untuk naik (mgh) dibagi waktu. Naik secepat kilat = daya besar.

m Massa tubuh kg **h** Tinggi yang dinaiki m **t** Waktu s **P** Daya W

DAYA
368
W

Tubuh **50** kg naik setinggi **6** m dalam **8** s → daya **368** W. Bandingkan dengan lampu LED 10 W!

Satuan Nusantara: $\approx 92\%$ dari rice cooker saat memasak · $\approx 6\%$ dari mesin motor bebek · $\approx 37 \times$ lampu LED

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

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

Sumber atau alat	Daya (kira-kira)
Lampu LED rumah	5–15 W
Kipas angin berdiri	± 45 W
Rice cooker saat memasak	± 400 W
Remaja berlari menaiki tangga	± 300 – 700 W (sebentar saja)
Mesin motor bebek	± 6.000 W = 6 kW

kWh: satuan energi di tagihan listrik

PLN tidak menagih daya, melainkan **energi**. Satuannya kilowatt-jam (kWh): energi yang dipakai alat 1.000 W selama 1 jam. $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ juta joule}$. Rice cooker 400 W yang memasak 30 menit memakai $0,4 \times 0,5 = 0,2 \text{ kWh}$.

Efisiensi: tidak ada mesin yang sempurna

Setiap mesin mengubah energi masukan menjadi energi berguna, ditambah energi "terbuang" (biasanya panas).

Efisiensi $\eta = \frac{\text{energi (atau daya) keluaran berguna}}{\text{energi (atau daya) masukan}} \times 100\%$. Lampu pijar kuno hanya $\pm 5\%$ efisien (sisanya panas!), lampu LED jauh lebih baik, dan motor listrik besar bisa di atas 90%.

KERJAKAN BERSAMA Pompa air untuk tandon

Pompa air menaikkan 600 liter air (600 kg) ke tandon setinggi 10 m dalam 5 menit. Efisiensi pompa 50%. Berapa daya listrik yang dipakai pompa? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

1 Energi berguna (menaikkan air): $mgh = 600 \times 10 \times 10 = 60.000 \text{ J}$.

2 Daya keluaran: $P_{\text{out}} = \frac{60.000}{300 \text{ s}} = 200 \text{ W}$.

3 Daya masukan: $P_{\text{in}} = \frac{P_{\text{out}}}{\eta} = \frac{200}{0,5} = 400 \text{ W}$.

Pompa menyedot 400 W dari listrik rumah. Separuhnya (200 W) terbuang sebagai panas dan gesekan di motor serta pipa.



FISIKA INDONESIA: TANGGA ENERGI SUNGAI CITARUM

Sungai Citarum di Jawa Barat dibendung tiga kali berturut-turut: **Saguling** ($\pm 700 \text{ MW}$), **Cirata** ($\pm 1.000 \text{ MW}$), dan **Jatiluhur**. Air yang ditahan di waduk menyimpan energi potensial raksasa. Saat dialirkan turun lewat pipa pesat, energi potensial menjadi energi kinetik, memutar turbin, lalu generator mengubahnya menjadi listrik untuk jutaan rumah di Jawa dan Bali. Daya PLTA kira-kira $P = \eta \rho Q g h$: makin besar debit air Q dan beda tinggi h , makin besar dayanya. Di desa-desa Sumatra Barat dan Jawa, kincir air bambu memakai prinsip yang sama untuk mengangkat air ke sawah.

**MENGAPA MOBIL PUNYA KECEPATAN MAKSIMUM?**

Pada kecepatan tetap di jalan datar, gaya dorong mesin sama dengan gaya hambat. Hambatan udara kira-kira sebanding dengan v^2 , sehingga daya yang dibutuhkan $P = F_{\text{hambat}} v \propto v^3$.

Menggandakan kecepatan membutuhkan daya **delapan kali** lipat! Kecepatan maksimum tercapai saat daya mesin tidak sanggup lagi mengimbangi $F_{\text{hambat}} v$. Ini juga alasan kendaraan jauh lebih boros bahan bakar saat ngebut.

8.6 Pesawat sederhana: menukar gaya dengan jarak

Pesawat sederhana adalah alat yang membuat pekerjaan terasa lebih ringan: tuas, katrol, bidang miring, roda berporos, baji, dan sekrup. Rahasiannya adalah satu prinsip: **usaha tidak bisa dihemat, tetapi gaya bisa ditukar dengan jarak**. Jika kamu ingin memakai gaya separuhnya, kamu harus menariknya sejauh dua kali lipat. Usaha = gaya × jarak tetap sama (atau sedikit lebih besar karena gesekan).

Keuntungan mekanis. $KM = \frac{\text{beban } (w)}{\text{kuasa } (F)}$. Untuk alat ideal (tanpa gesekan),
 $KM = \frac{\text{jarak tempuh kuasa}}{\text{jarak tempuh beban}}.$

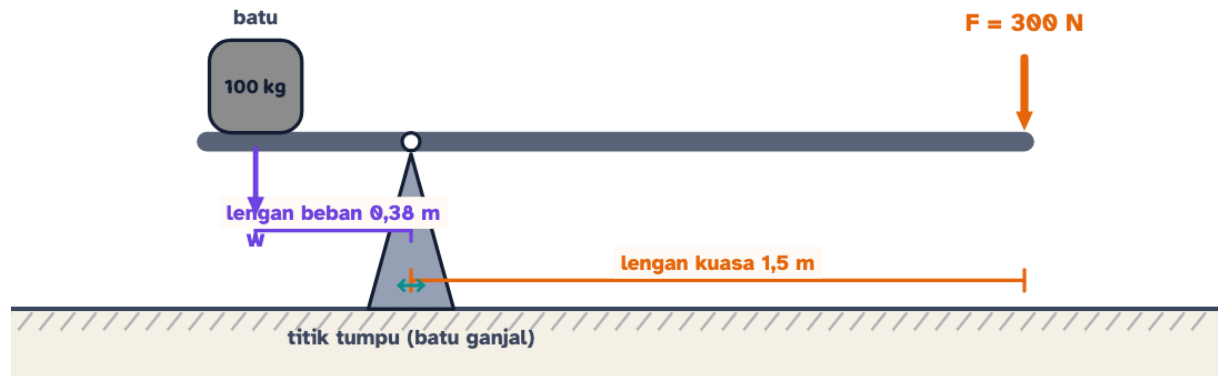
Tuas (pengungkit)

Tuas adalah batang kaku yang berputar pada **titik tumpu**. Syarat seimbangnya: beban × lengan beban = kuasa × lengan kuasa, sehingga $KM = \frac{\text{lengan kuasa}}{\text{lengan beban}}$. Rahasia putar-memutar ini akan kita bongkar lebih dalam di Bab 10 (torsi).

Jenis tuas	Urutan	Contoh	KM
Kelas I	beban – titik tumpu – kuasa	linggis, jungkat-jungkit, gunting, tang, dacin (timbangan gantung pasar)	bisa > 1 , $= 1$, atau < 1
Kelas II	titik tumpu – beban – kuasa	gerobak sorong, pemecah kemiri, pembuka tutup botol, stapler	selalu > 1
Kelas III	titik tumpu – kuasa – beban	sekop, pinset, joran pancing, sapu, lengan bawahmu	selalu < 1 (tetapi gerakan beban cepat dan jauh)

Kelas I - linggis

$$KM = 1,5 / 0,38 = 3,95 \rightarrow F_{\min} = 248 \text{ N}$$

berat beban $w = 980 \text{ N}$ 

Keuntungan mekanis

3,95

Gaya minimum

248 N

Tangan bergerak

0 cm

Beban naik

0 cm

Hasil

Cukup kuat: tekan Ungkit!

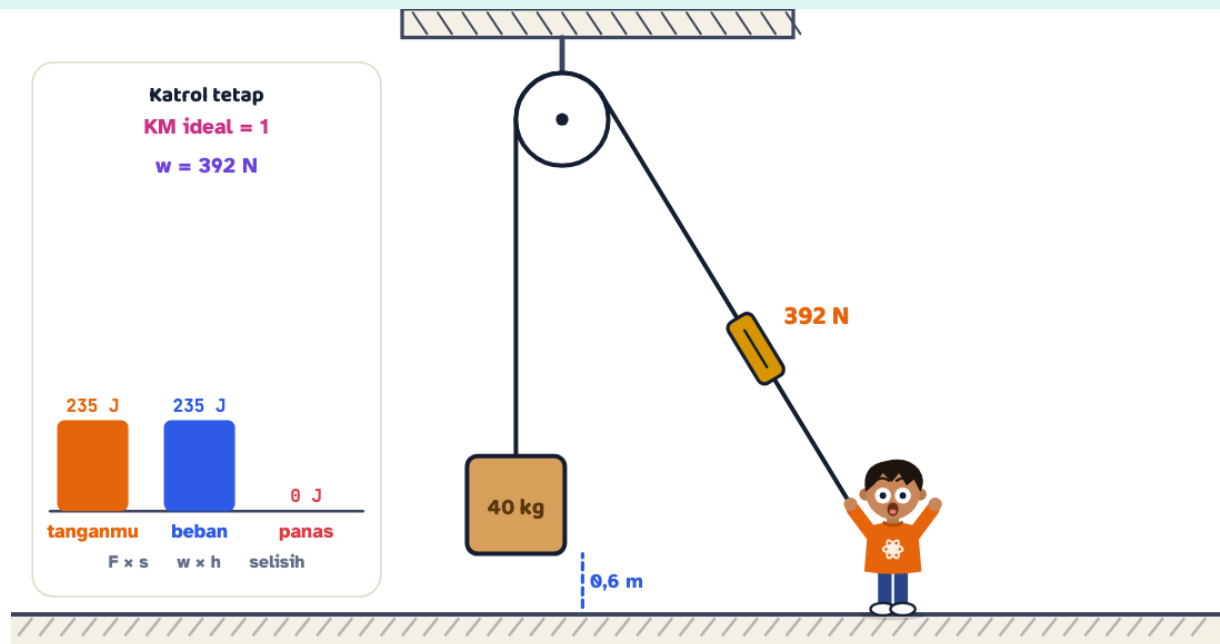
Pilih kelas tuas, geser bagian yang bertanda $\leftrightarrow$, atur massa beban dan gaya tanganmu, lalu tekan **Ungkit!**. Bandingkan jarak tempuh tangan dan beban. Apakah usaha tanganmu pernah lebih kecil daripada usaha pada beban?

Katrol dan takal

Katrol tetap (seperti kerekan timba sumur dan tiang bendera) tidak mengurangi gaya ($KM = 1$), tetapi mengubah arah tarikan: menarik ke bawah jauh lebih nyaman karena kamu bisa memakai berat badanmu. **Katrol bebas** ikut naik bersama beban dan ditopang dua tali, sehingga $KM = 2$. **Takal** (gabungan beberapa katrol, dipakai di pelabuhan dan bengkel) punya KM sama dengan **jumlah tali yang menopang beban**.

LAB MINI Katrol & takal: tarik talinya!

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-8



Gaya tarik
392 N

Tali ditarik
0,6 m

Beban naik
0,6 m

Usaha tangan
235 J

Usaha pada beban
235 J

Pilih susunan katrol dan massa beban, lalu tekan **Jalankan** untuk menarik tali sejauh 2 m. Bandingkan angka dinamometer dengan berat beban. Turunkan efisiensi: berapa usaha yang berubah menjadi panas?

Bidang miring

Mendorong drum ke bak truk lewat papan miring lebih ringan daripada mengangkatnya langsung. Untuk bidang miring licin dengan panjang s dan tinggi h : $F \cdot s = w \cdot h$, sehingga $KM = \frac{s}{h}$. Makin landai (makin panjang), makin ringan gaya dorongnya, tetapi makin jauh jaraknya. Jalan berkelok di pegunungan, tangga, sekrup, dan dongkrak ulir adalah bidang miring yang "dilipat".

COBA SENDIRI Takal di pelabuhan

Buruh pelabuhan mengangkat peti 200 kg memakai takal dengan 4 tali penopang. Ia ternyata perlu menarik dengan gaya 625 N. Berapa efisiensi takal, dan berapa meter tali yang ditarik untuk menaikkan peti 1,5 m? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

- 1 Berat peti: $w = 200 \times 10 = 2000 \text{ N}$. Takal ideal butuh $F = w/4 = 500 \text{ N}$.
- 2 Panjang tali yang ditarik: $4 \times 1,5 = 6 \text{ m}$ (setiap tali penopang memendek 1,5 m).
- 3 Usaha keluaran: $wh = 2000 \times 1,5 = 3000 \text{ J}$. Usaha masukan: $Fs = 625 \times 6 = 3750 \text{ J}$.
- 4 $\eta = \frac{3000}{3750} \times 100\% = 80\%$.

Efisiensi 80%. Gaya 625 N masih jauh lebih ringan daripada 2.000 N, tetapi buruh harus menarik 6 m tali, dan 750 J terbuang menjadi panas di poros-poros katrol.

MITOS

"Katrol dan tuas menghemat usaha."

MITOS

"Mesin dengan efisiensi 100% bisa dibuat kalau bahannya cukup bagus."

FAKTA

Pesawat sederhana menghemat

gaya

, bukan usaha. Gaya kecil dibayar dengan jarak yang jauh. Karena ada gesekan, usaha yang kamu keluarkan malah sedikit

lebih besar

daripada tanpa alat. Untungnya: pekerjaan berat jadi mungkin dilakukan.

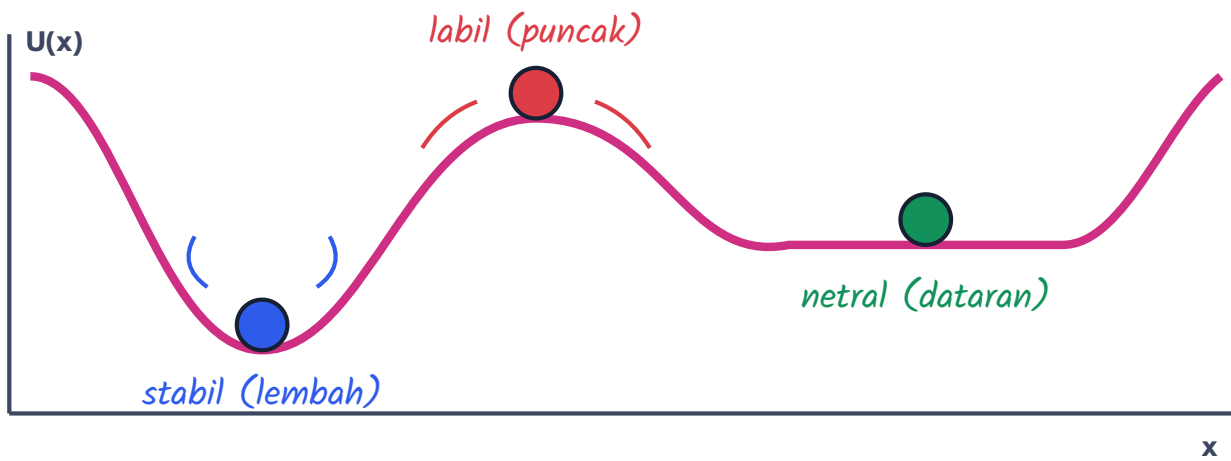
FAKTA

Selalu ada gesekan, hambatan udara, atau panas yang tak terhindarkan. Efisiensi bisa mendekati 100%, tetapi tidak pernah mencapainya. Mesin yang menghasilkan energi lebih banyak daripada masukannya (mesin abadi) melanggar hukum kekekalan energi.

8.7 Lanjut: keseimbangan dan grafik energi potensial

Bahasa sederhana • Bagian ini untuk yang penasaran. Intinya sederhana: kelereng di dasar mangkuk akan kembali ke dasar jika disenggol (stabil), sedangkan kelereng di atas bola terbalik akan menggelinding pergi (labil).

Gambarkan energi potensial U sebagai "pemandangan bukit dan lembah". Sebuah benda selalu "ingin" bergerak ke arah energi potensial yang lebih rendah, seperti kelereng yang menggelinding ke dasar lembah. Dari grafik $U(x)$ kita bisa membaca tiga jenis keseimbangan.



Lembah = keseimbangan **stabil** (disenggol, kembali). Puncak = **labil** (disenggol, menjauh). Dataran = **netral** (disenggol, diam di tempat baru).

Contoh nyata: bola di dasar mangkuk (stabil), pensil yang berdiri di ujung runcingnya (labil), dan bola di lantai datar (netral). Di Bab 10 kamu akan melihat hubungannya dengan **titik berat**: benda stabil jika titik beratnya naik saat benda dimiringkan.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

GAYA ADALAH "KEMIRINGAN" ENERGI POTENSIAL

Untuk gaya konservatif, $F = -\frac{dU}{dx}$. Tanda minus berarti gaya selalu menunjuk ke arah U yang **menurun**, seperti kelereng yang menuruni lereng. Di titik keseimbangan $dU/dx = 0$. Jika $d^2U/dx^2 > 0$ (lembah), keseimbangannya stabil; jika < 0 (puncak), labil. Contoh: untuk pegas $U = \frac{1}{2}kx^2$, sehingga $F = -kx$ (hukum Hooke) dan $x = 0$ stabil. Dekat lembah mana pun, U mirip parabola, jadi benda akan bergetar harmonik. Itulah alasan getaran harmonik (Bab 12) muncul di mana-mana di alam.



PLTA di waduk

Energi potensial air di Saguling dan Cirata diubah menjadi listrik. Makin tinggi air jatuh, makin besar dayanya.



Kelok 44, Sumatra Barat

Jalan menuju Danau Maninjau berkelok 44 kali. Jalan yang landai adalah bidang miring panjang: tanjakan terasa ringan, tetapi jaraknya jauh.



Rem regeneratif kereta listrik

Saat mengerem, motor listrik kereta modern bekerja sebagai generator. Energi kinetik diubah kembali menjadi listrik, bukan dibuang sebagai panas.



Dongkrak ulir

Ulir dongkrak adalah bidang miring yang dililitkan. Puluhan putaran engkol yang ringan mengangkat mobil beberapa sentimeter saja.



Dacin di pasar

Timbangan gantung tradisional adalah tuas kelas I: anak timbangan kecil yang jauh dari titik gantung menyeimbangkan karung berat yang dekat.



Pikulan pedagang

Berjalan mendatar sambil memikul: gaya angkat bahu tegak lurus gerak, jadi usahanya pada dagangan nol. Capeknya berasal dari otot yang terus bekerja.

⚡ Cek Cepat

Pada peristiwa berikut, gaya yang usahanya nol adalah...

gaya dorong Raka pada gerobak yang bergerak maju

gaya gesek lantai pada lemari yang digeser

gaya berat pada kelapa yang jatuh

gaya normal lantai pada koper yang ditarik mendatar

Bola 2 kg melaju 3 m/s. Energi kinetiknya...

9 J

6 J

18 J

3 J

Lampu LED 10 W menyala 5 jam. Energi listrik yang dipakai...

50 kWh

2 kWh

0,05 kWh

0,5 kWh

Kunci Cek Cepat: 1. D · 2. A · 3. C

Tantangan Rumah: ukur daya otot kakimu

Bahan: tangga di rumah atau sekolah, meteran, stopwatch HP, timbangan badan, teman sebagai pencatat

1. Ukur tinggi satu anak tangga, lalu kalikan dengan jumlah anak tangga untuk mendapat tinggi total h .
2. Timbang massamu m .
3. Naiki tangga dengan berjalan biasa sambil teman mencatat waktunya t . Ulangi dengan berjalan cepat (**jangan berlari**, pegang pegangan tangga).
4. Hitung daya $P = mgh/t$ untuk kedua cara.

Pertanyaan: Berapa watt dayamu? Setara berapa lampu LED 10 W? Mengapa usaha melawan gravitasi kedua cara itu sama, padahal rasa capeknya berbeda?

RINGKASAN KILAT Bab 8 dalam 3 menit

☒ Kamu sekarang bisa...

- menghitung **usaha** $W = Fs \cos \theta$ dan menjelaskan kapan usaha bernilai positif, negatif, atau nol
- memakai **teorema usaha-energi** serta menghitung energi kinetik, energi potensial gravitasi, dan energi pegas
- menerapkan **kekekalan energi mekanik** pada roller coaster, ayunan, dan benda jatuh, termasuk saat ada gesekan
- menghitung **daya**, **efisiensi**, dan energi listrik dalam kWh
- menjelaskan cara tuas, katrol, takal, dan bidang miring "menukar" gaya dengan jarak (**keuntungan mekanis**)

Istilah kunci

Rumus penting

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

Usaha oleh gaya tetap. Usaha = gaya × perpindahan × kosinus sudut di antara keduanya. Hanya bagian gaya yang searah gerak yang 'dihitung'.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Energi kinetik. Energi gerak = setengah × massa × kecepatan kuadrat. Kecepatan dua kali lipat → energi empat kali lipat!

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

Kelajuan setelah turun setinggi h (tanpa gesekan). Energi potensial yang 'dicairkan' saat turun setinggi h berubah menjadi tambahan energi kinetik. Massa tidak berpengaruh!

$$P = \frac{mgh}{t}$$

Daya saat naik tangga. Daya = energi yang dipakai untuk naik (mgh) dibagi waktu. Naik secepat kilat = daya besar.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Memikul tas sambil diam, menahan galon di atas kepala, atau berjalan mendatar sambil memikul pikulan: semuanya melelahkan, tetapi usaha gaya angkatmu pada beban nol.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=8

🧩 Teka-teki untuk Bab 9

Sebuah truk 10 ton dan sebuah sepeda motor melaju dengan **energi kinetik yang sama**. Keduanya direm dengan gaya yang sama besar. Menurut teorema usaha-energi, keduanya berhenti setelah menempuh *jarak* yang sama. Tetapi apakah keduanya berhenti dalam *waktu* yang sama?

▼ Intip petunjuk

Gaya × jarak mengubah energi kinetik. Gaya × **waktu** mengubah besaran lain: **momentum** $p = mv$. Dengan energi kinetik sama, momentumnya $p = \sqrt{2mE_k}$, jadi truk punya momentum jauh lebih besar dan butuh waktu pengereman lebih lama. Kita bongkar di Bab 9: Momentum, Impuls & Tumbukan.

09

Momentum: Siapa Paling Susah Dihentikan?

Bola pingpong dan bola bowling menggelinding sama cepat. Kamu berani menghentikan yang mana dengan kakimu? Bab ini membongkar besaran yang membuat airbag, helm, dan roket bekerja.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **momentum** $p = mv$ dan **impuls** $I = F\Delta t$, serta membaca impuls sebagai luas di bawah grafik $F-t$;
- menjelaskan mengapa airbag, helm, dan matras mengurangi gaya benturan;
- memakai **hukum kekekalan momentum** untuk tolakan (recoil), ledakan, dan tumbukan;
- membedakan tumbukan **lenting sempurna**, **lenting sebagian**, dan **tidak lenting sama sekali** memakai koefisien restitusi e ;
- menentukan **pusat massa** dan memahami mengapa gerakanya tidak terpengaruh ledakan.

PINGPONG LAWAN BOWLING

KOMIK • 4 PANEL

Lorong sekolah, sepulang les

KAK NARA

Dua bola ini akan kugelindingkan sama cepat. Siapa berani menghentikannya pakai kaki?



RAKA

Gampang! Bola pingpong... beres!

TUK!



RAKA

WAAA! Yang ini nggak mau berhenti!

SARI

Kecepatannya sama, tapi massanya beda ribuan kali, Rak!

GLUDUG!

KAK NARA

Yang membuat bola sulit dihentikan adalah **momentum**: massa $\times$ kecepatan.

TARSI

Fakta unik: bola bowling bisa lebih dari 2.000 kali lebih berat daripada bola pingpong (2,7 g)!

$$p = m \cdot v$$



Tebak Dulu!

Bola pingpong (2,7 g) dan bola bowling (6 kg) menggelinding sama-sama 2 m/s. Kamu ingin menghentikan masing-masing dalam waktu 0,5 detik. Gaya yang diperlukan...

sama besar, karena kecepatannya sama.

untuk bola bowling lebih dari 2.000 kali lebih besar.

untuk bola pingpong lebih besar, karena bola ringan lebih lincah.

tidak bisa ditentukan, karena bola bowling tidak mungkin dihentikan.

Jawabannya: bola bowling butuh gaya lebih dari 2.000 kali lebih besar. Gaya penghenti = perubahan momentum $\div$ waktu. Kecepatannya sama, tetapi massanya berbeda $6/0,0027 \approx 2200$ kali, jadi momentumnya juga berbeda sekitar 2.200 kali. Bola pingpong cukup disentuh $\pm 0,01$ N. Bola bowling butuh ± 24 N, kira-kira berat dua setengah kilogram beras!

9.1 Momentum: "jumlah gerak" sebuah benda

Newton menyebutnya *quantitas motus*, "jumlah gerak". Sekarang kita menyebutnya **momentum**: hasil kali massa dan kecepatan. Momentum mengukur seberapa **sulit** sebuah benda dihentikan (atau dibelokkan).

Momentum. $p = mv$. Satuannya kg·m/s. Momentum adalah **vektor**: arahnya sama dengan arah kecepatan. Bola yang melaju ke kanan dan bola yang melaju ke kiri dengan kelajuan sama punya momentum yang berlawanan tanda.

Bahasa sederhana • Gampangnya: benda yang **berat** dan **cepat** punya momentum besar, sehingga sulit dihentikan. Truk yang pelan pun bisa punya momentum lebih besar daripada motor yang ngebut.

Benda	Massa	Kecepatan	Momentum (kg·m/s)
Kelereng yang disentil	5 g	2 m/s	0,01
Bola pingpong saat dismes	2,7 g	20 m/s	±0,05
Bola sepak saat tendangan keras	0,43 kg	25 m/s	±11
Pelari cepat	60 kg	10 m/s	600
Motor + pengendara	150 kg	15 m/s (54 km/jam)	2.250
Truk bermuatan	10.000 kg	20 m/s (72 km/jam)	200.000



JAWABAN TEKA-TEKI BAB 8

Truk dan motor punya energi kinetik sama, lalu direm dengan gaya sama. Keduanya berhenti dalam *jarak* yang sama (gaya × jarak = energi kinetik), tetapi **tidak** dalam *waktu* yang sama. Gaya × waktu mengubah momentum, dan untuk energi kinetik yang sama, momentum truk jauh lebih besar. Jadi truk butuh waktu pengereman lebih lama.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MOMENTUM DAN ENERGI KINETIK SALING TERHUBUNG

Dari $p = mv$ dan $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ diperoleh $E_k = \frac{p^2}{2m}$ atau $p = \sqrt{2mE_k}$. Untuk energi kinetik yang sama, benda bermassa 100 kali lebih besar punya momentum 10 kali lebih besar. Perhatikan juga perbedaan sifatnya: momentum adalah vektor (bisa saling meniadakan), sedangkan energi kinetik skalar dan tidak pernah negatif.

9.2 Impuls: gaya × waktu

Untuk mengubah momentum, kamu perlu gaya yang bekerja **selama selang waktu tertentu**. Hasil kali gaya dan waktu disebut **impuls**. Dari Hukum II Newton dalam bentuk aslinya, $F = \Delta p / \Delta t$, kita mendapatkan teorema impuls-momentum.

Teorema impuls-momentum. $I = F \Delta t = \Delta p = mv_{\text{akhir}} - mv_{\text{awal}}$. Satuan impuls N·s, sama dengan kg·m/s.

Rumus ini menyimpan rahasia keselamatan. Perubahan momentum saat benda berhenti sudah tertentu ($\Delta p = mv$). Tetapi kita bisa memilih **waktunya**: makin lama waktu pengereman, makin kecil gaya yang diterima. Lutut yang ditekuk saat mendarat, sarung tinju, helm berbusa, airbag, dan zona remuk mobil semuanya bekerja dengan memperpanjang waktu benturan.

RUMUS HIDUP Gaya rata-rata saat benda dihentikan

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv}{\Delta t}$$

Gaya penghenti = momentum yang harus dihapus dibagi waktu menghapusnya. Perpanjang waktunya, gayanya mengecil!

m Massa kg

v Kelajuan sebelum berhenti m/s

Δt Lama benturan s

F Gaya rata-rata N

GAYA RATA-RATA

1.000

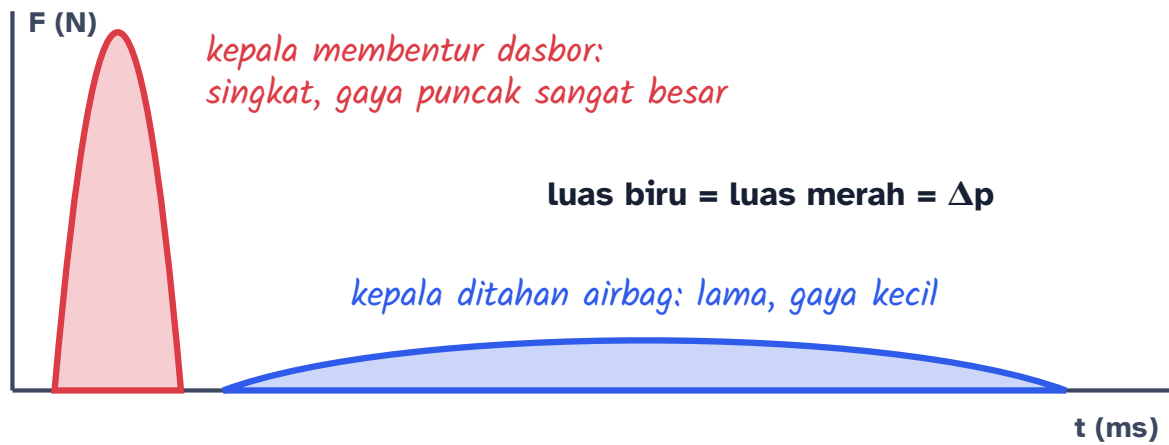
N

Benda **50 kg** yang melaju **6 m/s** lalu berhenti dalam **0,3 s** menerima gaya rata-rata **1.000 N**. Coba perkecil Δt menjadi 0,01 s: gayanya melonjak 30 kali!

Satuan Nusantara: $\approx 2 \times$ berat orang 50 kg $\cdot \approx 4,1 \times$ berat karung beras 25 kg $\cdot \approx 10\%$ dari berat mobil 1 ton

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

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



Impuls adalah **luas di bawah grafik $F-t$** . Kedua benturan menghentikan kepala yang sama dari kecepatan yang sama, jadi luasnya sama. Airbag "meratakan" grafik: waktunya panjang, puncaknya rendah.



Tebak Dulu!

Telur dijatuhkan dari ketinggian yang sama ke lantai keramik dan ke kasur. Di kasur, telur tidak pecah. Mengapa?

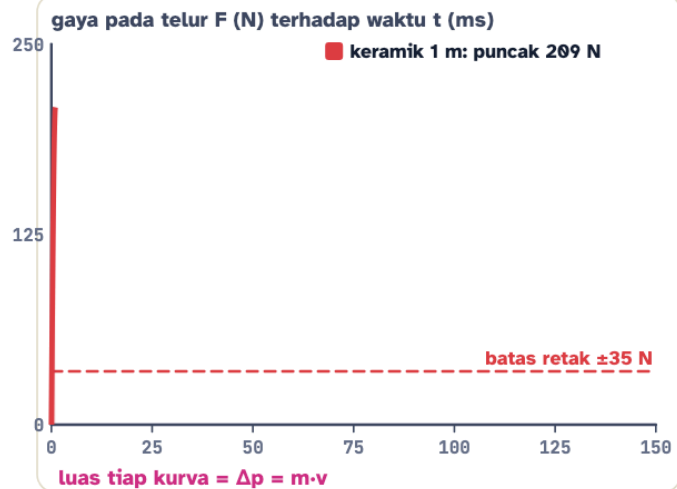
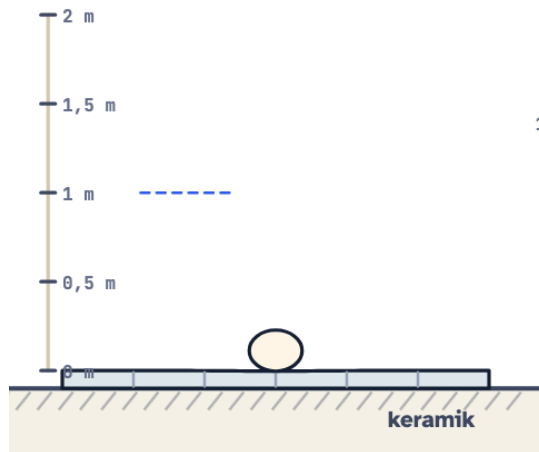
Kasur mengurangi perubahan momentum telur.

Kasur menyerap momentum telur sampai habis.

Kasur memperpanjang waktu benturan, sehingga gaya pada telur lebih kecil.

Telur menjadi lebih ringan saat jatuh ke kasur.

Jawabannya: waktu benturan lebih lama. Di keramik maupun di kasur, telur berhenti dari kecepatan yang sama, jadi perubahan momentumnya *sama*. Bedanya, keramik menghentikan telur dalam $\pm 0,002$ detik, sedangkan kasur $\pm 0,1$ detik, 50 kali lebih lama. Gaya rata-ratanya pun 50 kali lebih kecil. Buktikan sendiri di Lab Mini berikut!

gerak lambat $\times 750$ 

Kelajuan saat menyentuh

4,43 m/s

 $\Delta p = \text{luas grafik}$

0,266 N·s

Lama benturan

2 ms

F rata-rata

132,8 N

F puncak

208,6 N

Telur

Benturan (gerak lambat $\times 750$)

Pilih permukaan dan ketinggian, lalu tekan **Jalankan**. Benturan diputar dalam gerak lambat dan grafik $F-t$ tergambar. Ulangi dengan permukaan lain: luas di bawah kurva (Δp) tetap sama, tetapi puncaknya? Garis merah putus-putus adalah perkiraan gaya yang membuat cangkang retak.

**AWAS JEBAKAN**

Airbag, helm, dan matras **tidak** mengurangi perubahan momentum. Mereka hanya memperpanjang waktunya. Lebih mengejutkan lagi: benda yang **memantul** mengalami perubahan momentum *lebih besar* daripada benda yang berhenti menempel. Bola yang datang 10 m/s lalu memantul 10 m/s mengalami $\Delta v = 20$ m/s, dua kali lipat! Itu sebabnya bantalan pengaman dirancang agar tidak memantulkan benda.

CONTOH Tendangan penalti

Bola 0,4 kg yang diam ditendang hingga melaju 25 m/s. Kaki menyentuh bola selama 0,01 s. Berapa impuls dan gaya rata-rata kaki pada bola?

1 Impuls = perubahan momentum: $I = mv - 0 = 0,4 \times 25 = 10 \text{ N}\cdot\text{s}$.

2 Gaya rata-rata: $F = \frac{I}{\Delta t} = \frac{10}{0,01} = 1000 \text{ N}$.

Kaki menghantam bola dengan gaya rata-rata 1.000 N, setara berat orang bermassa 100 kg, tetapi hanya selama seperseratus detik.



FISIKA INDONESIA: MENGAPA BOM IKAN DILARANG

Indonesia berada di jantung **Segitiga Terumbu Karang** dunia. Sayangnya, masih ada yang menangkap ikan dengan bahan peledak. Ledakan di air menghasilkan gelombang tekanan yang memberi impuls sangat besar dalam waktu sangat singkat. Gaya puncaknya merobek organ dalam ikan (termasuk ikan kecil yang tidak ditangkap) dan menghancurkan karang yang butuh puluhan tahun untuk tumbuh. Karena merusak dan berbahaya bagi nelayan sendiri, penangkapan ikan dengan bahan peledak dilarang undang-undang.

9.3 Hukum kekekalan momentum

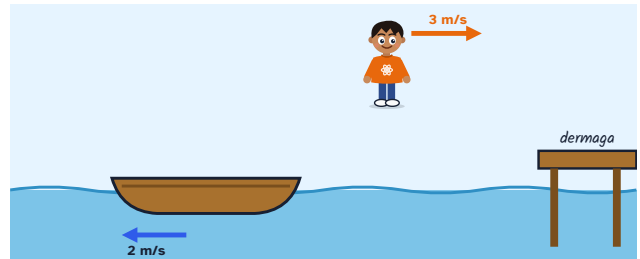
Bayangkan dua benda, A dan B, saling mendorong (bertumbukan, meledak, atau saling melempar). Menurut Hukum III Newton, gaya A pada B sama besar dan berlawanan arah dengan gaya B pada A, dan keduanya bekerja **selama waktu yang sama**. Jadi impulsnya juga sama besar dan berlawanan: momentum yang "hilang" dari A persis "pindah" ke B.

Hukum kekekalan momentum. Jika gaya luar total pada suatu sistem nol, momentum total sistem tetap: $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$.

$p_{\text{total}} = 0$ (semua diam)



Langkah 1. Raka (40 kg) berdiri di atas sampan (60 kg) yang diam di Sungai Musi. Momentum total sistem Raka + sampan = 0.



Langkah 2. Raka melompat ke arah dermaga dengan kecepatan 3 m/s. Kakinya mendorong sampan ke belakang, dan sampan mendorong Raka ke depan (Hukum III).

Raka: $40 \times (+3) = +120 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$
Sampan: $60 \times (-2) = -120 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$
jumlah tetap 0 ✓



Langkah 3. Momentum total harus tetap nol, jadi sampan terdorong ke belakang: $60v = -120 \rightarrow v = -2 \text{ m/s}$.

Raka: $40 \times (+3) = +120 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$
Sampan: $60 \times (-2) = -120 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$
jumlah tetap 0 ✓



Langkah 4. Akibatnya, dorongan lompatan "terbagi" dengan sampan, dan dermaga ternyata terlalu jauh... BYUR! Pelajaran: tambatkan sampan ke dermaga dulu. Tali tambat memberi gaya luar yang menahan sampan.

KERJAKAN BERSAMA

Melempar karung dari papan beroda

Kak Nara (60 kg) berdiri di atas papan beroda (5 kg) yang diam, sambil memeluk karung beras 25 kg. Ia melempar karung ke depan dengan kecepatan 2 m/s. Gesekan roda diabaikan. Berapa kecepatan Kak Nara setelah melempar?

1 Sistem: Kak Nara + papan + karung. Mula-mula diam, jadi $p_{\text{awal}} = 0$.

2 Setelah melempar: $25 \times 2 + (60 + 5)v = 0$.

3 $v = -\frac{50}{65} \approx -0,77 \text{ m/s}$.

Kak Nara meluncur mundur $\pm 0,77 \text{ m/s}$. Tanda minus berarti arahnya berlawanan dengan lemparan. Inilah prinsip rekoil (tolakan) yang juga mendorong roket.



TRIK KAK NARA: "SEBELUM = SESUDAH, JANGAN LUPA TANDA"

Pilih satu arah sebagai positif (misalnya ke kanan), lalu tulis semua kecepatan dengan tandanya. Benda yang bergerak ke kiri diberi tanda minus. Hampir semua kesalahan soal momentum berasal dari tanda yang terlupa!

Tumbukan: memantul, setengah memantul, atau menempel



Tebak Dulu!

Kelereng A menabrak lurus kelereng B yang diam. Massa keduanya sama, dan tumbukannya lenting sempurna (tidak ada energi yang hilang). Setelah tumbukan...

keduanya bergerak bersama dengan setengah kecepatan A.

A berhenti, B melaju dengan kecepatan awal A.

A memantul balik, B tetap diam.

B melaju dua kali kecepatan A.

Jawabannya: A berhenti, B melaju dengan kecepatan A. Pilihan "bergerak bersama setengah kecepatan" memenuhi kekekalan momentum, tetapi energi kinetiknya tinggal separuh, jadi tidak lenting sempurna. Satu-satunya cara agar momentum *dan* energi sama-sama kekal adalah A dan B "bertukar" kecepatan. Kamu bisa melihatnya pada permainan gundu dan bola biliar.

Dalam setiap tumbukan (tanpa gaya luar yang berarti), **momentum selalu kekal**. Yang berbeda adalah nasib energi kinetiknya.

Jenis tumbukan	Momentum	Energi kinetik	Koefisien restitusi	Contoh
Lenting sempurna	kekal	kekal	$e = 1$	tumbukan antarmolekul gas; kira-kira bola biliar
Lenting sebagian	kekal	berkurang	$0 < e < 1$	bola memantul, kelereng, mobil bertabrakan lalu terpisah
Tidak lenting sama sekali	kekal	berkurang paling banyak	$e = 0$	gerbong kereta tersambung, anak panah menancap di sasaran, lumpur menempel

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Kedua benda menempel dan bergerak bersama. Momentum total sebelum dibagi massa total sesudah.



Gerbong **20** ton (kecepatan **3** m/s) tersambung dengan gerbong **10** ton (**0** m/s). Setelah tersambung keduanya melaju **2** m/s.

Cek satuan: $\frac{\text{ton} \cdot \text{m/s}}{\text{ton}} = \text{m/s}$: satuan massa saling menghapus.

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

LAB MINI Rel tumbukan: dua troli, satu hukum

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-9

MOMENTUM (kg·m/s)

sebelum

A 4

B 0

total 4

sesudah

A —

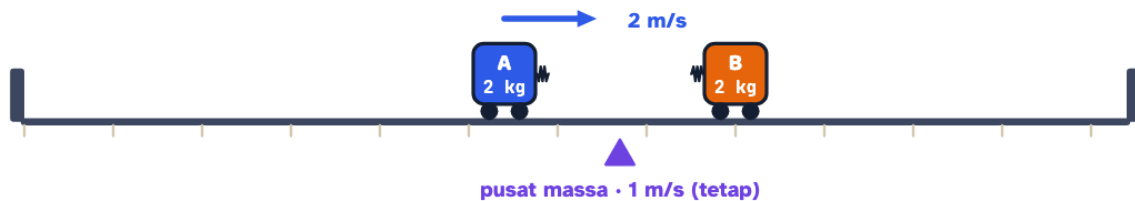
B —

total —

ENERGI KINETIK (J)

sebelum 4 J

sesudah: —



Σp sebelum

4 kg·m/s

Σp sesudah

—

Ek sebelum

4 J

Ek sesudah

—

v A sesudah

—

v B sesudah

—

Kadaan

Mendekat...

Atur massa, kecepatan, dan koefisien restitusi e , lalu tekan **Jalankan**. Bandingkan batang momentum dan energi sebelum dan sesudah. Segitiga ungu adalah **pusat massa**: apakah kecepatannya berubah saat tumbukan? Coba juga $e = 0$ (troli menempel) dan dua troli bermassa sama dengan $e = 1$.

KERJAKAN BERSAMA Langsir gerbong di stasiun

Gerbong barang 20 ton melaju 3 m/s lalu menabrak dan tersambung dengan gerbong 10 ton yang diam. Berapa kecepatan bersamanya, dan berapa energi kinetik yang hilang?

- 1 Kekekalan momentum: $20\,000 \times 3 + 0 = 30\,000 v' \rightarrow v' = 2 \text{ m/s}$.
- 2 Energi kinetik sebelum: $\frac{1}{2} \times 20\,000 \times 3^2 = 90\,000 \text{ J}$.
- 3 Energi kinetik sesudah: $\frac{1}{2} \times 30\,000 \times 2^2 = 60\,000 \text{ J}$.
- 4 Hilang: 30 000 J, menjadi panas, bunyi "JEDUG!", dan deformasi pengait.

Kecepatan bersama 2 m/s, dan sepertiga energi kinetik (30 kJ) berubah bentuk. Momentum tetap utuh, tetapi energi kinetik tidak.

Kelereng 10 g yang melaju 2 m/s menabrak lurus gundu besar 30 g yang diam. Tumbukannya lenting sempurna. Tentukan kecepatan keduanya setelah tumbukan.

- 1 Momentum: $0,01 \times 2 = 0,01 v'_1 + 0,03 v'_2$, atau $2 = v'_1 + 3v'_2$.
- 2 Lenting sempurna ($e = 1$): kecepatan relatif berbalik, $v'_2 - v'_1 = 2 - 0 = 2$.
- 3 Kurangkan kedua persamaan: $4v'_2 = 4 \rightarrow v'_2 = 1$ m/s, lalu $v'_1 = -1$ m/s.
- 4 Cek energi: sebelum $\frac{1}{2}(0,01)(4) = 0,02$ J; sesudah $\frac{1}{2}(0,01)(1) + \frac{1}{2}(0,03)(1) = 0,02$ J. ✓

Kelereng kecil memantul balik 1 m/s, gundu besar maju 1 m/s. Pada tumbukan lenting sempurna, benda ringan yang menabrak benda berat yang diam selalu terpental balik.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

RUMUS UMUM TUMBUKAN LENTING SEMPURNA 1D

Jika m_2 mula-mula diam: $v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1$ dan $v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$. Tiga kasus istimewa: massa sama $\rightarrow$ bertukar kecepatan; benda sangat berat menabrak benda ringan $\rightarrow$ benda ringan melesat hampir $2v_1$; benda ringan menabrak tembok berat $\rightarrow$ memantul dengan kelajuan hampir sama. Trik elegan: pindah ke kerangka pusat massa. Di sana tumbukan lenting hanya membalik arah kecepatan masing-masing benda.



TAMU DARI MASA LALU: PERANG "VIS VIVA"

Pada abad ke-17 dan ke-18, para ilmuwan berdebat sengit. René Descartes berpendapat besaran yang kekal adalah "jumlah gerak" (kira-kira mv). Gottfried Leibniz membela *vis viva*, "gaya hidup" mv^2 . Bertahun-tahun kemudian, **Émilie du Châtelet** mempopulerkan percobaan Willem 's Gravesande: bola logam dijatuhkan ke tanah liat. Bola dengan kecepatan dua kali lipat membuat lubang **empat kali** lebih dalam, sehingga v^2 memang penting. Ternyata keduanya benar! Momentum mv selalu kekal dalam tumbukan, sedangkan $\frac{1}{2}mv^2$ (energi kinetik) hanya kekal pada tumbukan lenting sempurna.

MITOS

"Dalam tumbukan, energi kinetik selalu kekal seperti momentum."

MITOS

"Benda yang lebih berat pasti punya momentum lebih besar."

FAKTA

Hanya momentum yang selalu kekal (tanpa gaya luar). Energi kinetik biasanya berkurang karena berubah menjadi panas, bunyi, dan perubahan bentuk. Hanya tumbukan lenting sempurna yang menyimpan seluruh energi kinetiknya.

FAKTA

Momentum bergantung pada massa **dan** kecepatan. Bola sepak 0,43 kg yang ditendang 25 m/s ($\pm 11 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$) punya momentum lebih besar daripada karung beras 5 kg yang didorong pelan 1 m/s ($5 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$).

9.5 Koefisien restitusi: seberapa "membal" sebuah tumbukan

Koefisien restitusi e membandingkan kelajuan relatif kedua benda sesudah dan sebelum tumbukan: $e = -\frac{v'_2 - v'_1}{v_2 - v_1}$. Nilainya antara 0 (menempel) dan 1 (lenting sempurna).

Untuk bola yang dijatuhkan ke lantai diam, rumus ini menjadi sangat praktis. Bola jatuh dari ketinggian h tiba dengan $\sqrt{2gh}$ dan memantul dengan $e\sqrt{2gh}$, sehingga naik setinggi $h' = e^2h$. Jadi $e = \sqrt{h'/h}$: cukup ukur tinggi jatuh dan tinggi pantulan!

$$h_n = h e^{2n}$$

Setiap kali memantul, tinggi bola dikali e^2 . Bola dengan $e = 0,8$ kehilangan 36% energinya pada setiap pantulan.

 h

Tinggi jatuh awal m

 e

Koefisien restitusi

 n

Pantulan ke-

 h_n

Tinggi pantulan m

TINGGI PANTULAN

1,152

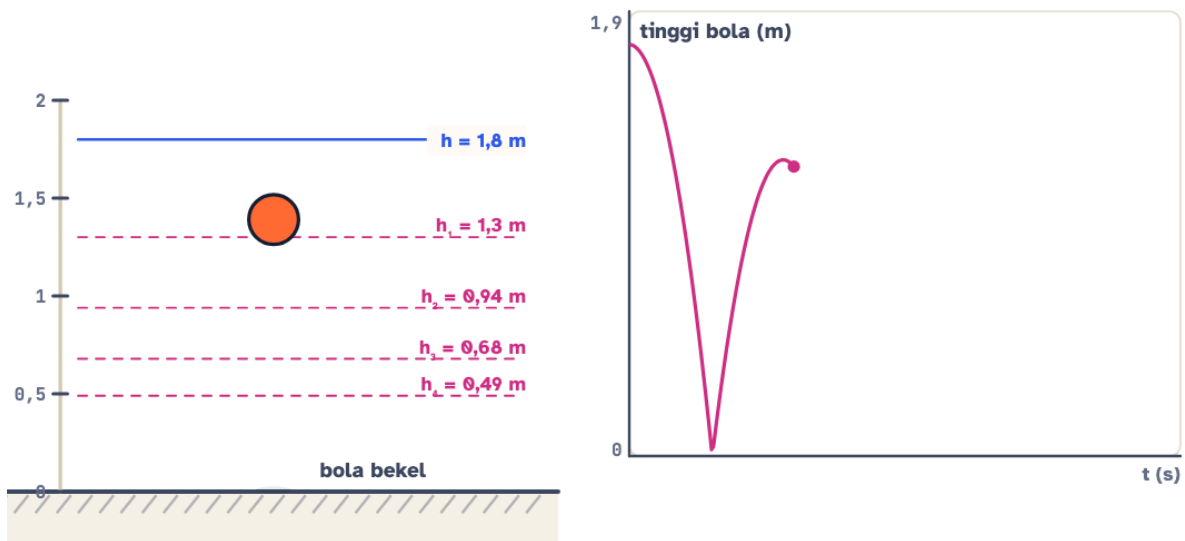
m

Bola dijatuhkan dari **1,8** m dengan $e = 0,8$. Setelah pantulan ke-**1**, tingginya tinggal **1,152** m.

Satuan Nusantara: $\approx 77\%$ dari tinggi Raka $\cdot \approx 144 \times$ semut rangrang

Cek satuan: e tidak bersatuan, sehingga h_n bersatuan meter seperti h .

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



Pantulan ke-1

1,295 m

Pantulan ke-2

—

Pantulan ke-3

—

Energi tersisa per pantulan

72 %

Jumlah pantulan

1

Waktu sampai diam (teori)

7,48 s

Pilih jenis bola (atau geser e sendiri) dan tinggi jatuh, lalu tekan **Jalankan**. Garis putus-putus menunjukkan ramalan $h_n = e^{2n}h$. Apakah bola menyentuh garis-garis itu? Bola dengan e berapa yang paling lama memantul?

Bola (di lantai keras)	e kira-kira	Energi tersisa per pantulan (e^2)
Bola pingpong	$\pm 0,9$	$\pm 81\%$
Bola bekel (karet padat)	$\pm 0,85$	$\pm 72\%$
Bola basket	$\pm 0,8$	$\pm 64\%$
Bola tenis	$\pm 0,75$	$\pm 56\%$
Gumpalan plastisin	± 0	$\pm 0\%$ (menempel)

Bola basket dijatuhkan dari ketinggian 1,8 m dan memantul setinggi 1,2 m. Berapa koefisien restitusinya, dan setinggi apa pantulan kedua?

1 $e = \sqrt{h'/h} = \sqrt{1,2/1,8} = \sqrt{0,667} \approx 0,82.$

2 Pantulan kedua: $h_2 = e^2 \times h_1 = 0,667 \times 1,2 = 0,8 \text{ m}.$

$e \approx 0,82$. Setiap pantulan menyisakan dua pertiga tinggi sebelumnya: 1,8 m $\rightarrow$ 1,2 m $\rightarrow$ 0,8 m $\rightarrow \pm 0,53 \text{ m}$, dan seterusnya.

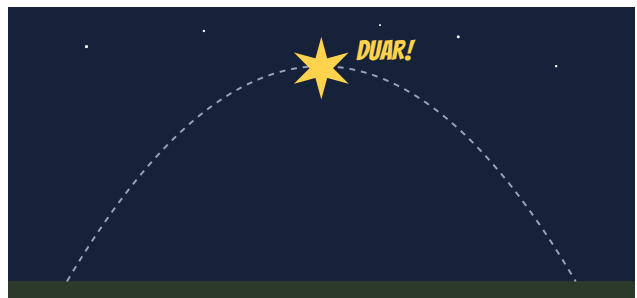
9.6 Pusat massa: titik yang "mewakili" seluruh sistem

Setiap sistem benda punya satu titik istimewa yang disebut **pusat massa**, yaitu posisi rata-rata massanya. Untuk benda-benda pada satu garis: $x_{\text{pm}} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$. Pusat massa lebih dekat ke benda yang lebih berat.

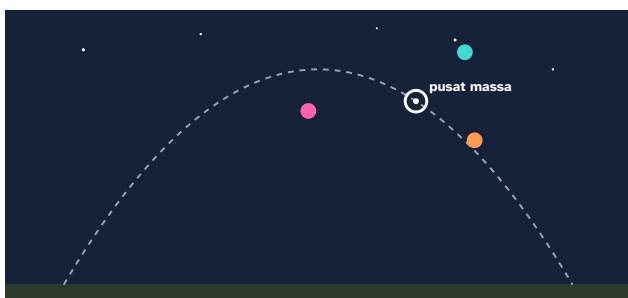
Gerak pusat massa. Pusat massa bergerak seolah-olah seluruh massa sistem terkumpul di sana dan semua **gaya luar** bekerja padanya. Gaya dalam (tumbukan, ledakan, dorongan antaranggota sistem) tidak bisa mengubah gerak pusat massa.



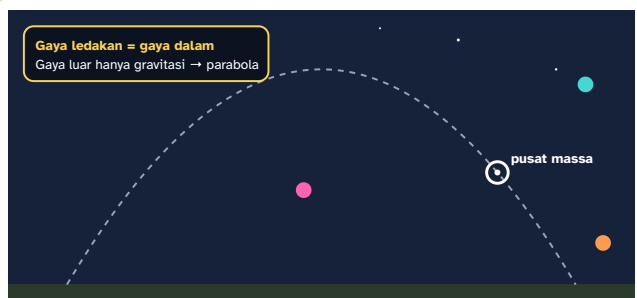
Langkah 1. Kembang api ditembakkan miring. Tanpa ledakan, ia akan mengikuti lintasan parabola (garis putus-putus), seperti di Bab 5.



Langkah 2. Di puncak lintasan, kembang api meledak menjadi tiga pecahan bermassa sama. DUAR!



Langkah 3. Pecahan terbang ke arah berbeda-beda. Tetapi lihat lingkaran putih, pusat massa ketiganya: ia tetap di garis parabola!



Langkah 4. Selama belum ada pecahan yang menyentuh tanah, pusat massa terus menempuh parabola semula. Ledakan adalah gaya dalam, jadi tidak mengubah gerak pusat massa. Satu-satunya gaya luar tetap gravitasi.

CONTOH Pusat massa dua orang di perahu

Raka (40 kg) duduk di ujung kiri perahu ($x = 0$) dan Kak Nara (60 kg) di ujung kanan ($x = 4$ m). Massa perahu diabaikan. Di mana pusat massa mereka?

1
$$x_{\text{pm}} = \frac{40 \times 0 + 60 \times 4}{40 + 60} = \frac{240}{100}.$$

2
$$x_{\text{pm}} = 2,4 \text{ m dari ujung kiri.}$$

Pusat massa berada 2,4 m dari Raka, lebih dekat ke Kak Nara yang lebih berat. Jika keduanya bertukar tempat di perahu yang mengapung, pusat massa mereka tidak boleh berpindah (tidak ada gaya luar mendatar), sehingga perahunya yang bergeser!



LANJUT • IB & OLIMPIADE

BENDA KONTINU DAN TRIK "MASSA NEGATIF"

Untuk benda kontinu, jumlahan menjadi integral: $x_{\text{pm}} = \frac{1}{M} \int x \, dm$. Hasil penting: setengah cakram pejal berjari-jari R punya pusat massa $\frac{4R}{3\pi}$ dari sisi lurus; kerucut pejal $\frac{h}{4}$ dari alasnya. Untuk benda yang dilubangi, anggap lubang sebagai benda bermassa **negatif**: $x_{\text{pm}} = \frac{Mx_{\text{utuh}} - mx_{\text{lubang}}}{M - m}$. Trik ini menyelesaikan soal "pelat berlubang" dalam satu baris.

9.7 Lanjut: roket, si pelempar gas

Bahasa sederhana • Roket terbang dengan cara "melempar" gas panas ke belakang sangat cepat. Gas terdorong ke belakang, roket terdorong ke depan, persis seperti Kak Nara yang melempar karung dari papan beroda.

Roket adalah contoh kekekalan momentum yang paling dramatis. Setiap detik, mesin roket menyemburkan massa Δm gas dengan kecepatan u relatif terhadap roket. Gas membawa momentum ke belakang, sehingga roket mendapat momentum ke depan. Gaya dorongnya $F = u \frac{\Delta m}{\Delta t}$: makin cepat dan makin banyak gas yang disemburkan, makin besar dorongannya.



TAMU DARI MASA LALU

Konstantin Tsiolkovsky (1857–1935) adalah guru matematika di sebuah kota kecil di Rusia. Ia hampir tuli sejak kecil dan banyak belajar sendiri di perpustakaan. Pada tahun 1903 ia menerbitkan persamaan yang menjadi dasar semua perjalanan antariksa, puluhan tahun sebelum roket pertama mencapai luar angkasa. Kalimatnya yang terkenal: "Bumi adalah buaian umat manusia, tetapi manusia tidak bisa tinggal di buaian selamanya."

**PERSAMAAN ROKET TSIOLKOVSKY**

Di ruang hampa tanpa gravitasi, kekekalan momentum untuk semburan kecil dm memberi $m dv = -u dm$. Integrasikan dari massa awal m_0 sampai massa akhir m_1 :

$$\Delta v = u \ln \frac{m_0}{m_1}.$$

Logaritma ini kejam: untuk menggandakan Δv , perbandingan massa harus **dikuadratkan**. Itu sebabnya roket ke orbit hampir seluruhnya berisi bahan bakar dan dibuat bertingkat: tangki kosong dibuang supaya tidak ikut dipercepat. Indonesia juga mengembangkan roket sendiri, misalnya seri RX dari LAPAN (kini BRIN).

**Helm berbusa**

Busa di dalam helm remuk perlahan saat benturan, sehingga kepala berhenti dalam waktu lebih lama dan gaya pada kepala berkurang.

**Zona remuk & airbag**

Bagian depan mobil sengaja dibuat mudah ringsek. Lebih baik mobilnya yang remuk perlahan daripada penumpangnya berhenti mendadak.

**Matras lompat tinggi**

Atlet lompat tinggi mendarat di matras tebal. Waktu pendaratan bertambah lama, gaya pada punggung mengecil.

**Main gundu**

Gundu yang menabrak lurus gundu lain yang sama besar bisa berhenti di tempat, sementara gundu sasaran melesat: tukar kecepatan!

**Selang pemadam kebakaran**

Air yang menyembur deras ke depan mendorong selang ke belakang, sehingga petugas pemadam harus memegangnya dengan kuat. Itu rekoil!

**Menangkap bola**

Pemain yang menarik tangannya ke belakang saat menangkap bola memperpanjang waktu tangkapan, jadi telapak tangan tidak terasa perih.

**Cek Cepat**

Motor 150 kg melaju 10 m/s. Momentumnya...

15 kg·m/s

1.500 kg·m/s

7.500 kg·m/s

160 kg·m/s

Airbag mengurangi cedera karena...

mengurangi massa penumpang

mengurangi perubahan momentum penumpang

membuat penumpang memantul kembali

memperpanjang waktu penumpang berhenti

Bola dijatuhkan dari 2 m dan memantul setinggi 0,5 m. Koefisien restitusinya...

0,5

0,25

0,75

4

Kunci Cek Cepat: 1. B · 2. D · 3. A

Tantangan Rumah: detektif pantulan

Bahan: beberapa bola berbeda (bola bekel, bola pingpong, bola plastik, bola tenis), meteran yang ditempel di dinding, HP dengan mode video gerak lambat (*slow motion*)

1. Tempelkan meteran tegak di dinding, mulai dari lantai.
2. Jatuhkan bola dari ketinggian 1 m (dasar bola sejajar angka 100 cm) tanpa didorong.
3. Rekam dengan video gerak lambat, lalu putar ulang untuk membaca tinggi pantulan pertama h' . Ulangi 3 kali dan ambil rata-ratanya.
4. Hitung $e = \sqrt{h'/1 \text{ m}}$ untuk setiap bola. Coba juga di lantai keramik, karpet, dan rumput.

Pertanyaan: Bola mana yang paling "membal"? Apakah nilai e hanya milik bola, atau juga bergantung pada lantainya? Ke mana perginya energi yang hilang?

RINGKASAN KILAT Bab 9 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- menghitung **momentum** $p = mv$ dan **impuls** $I = F\Delta t$, serta membaca impuls sebagai luas di bawah grafik $F-t$
- menjelaskan mengapa airbag, helm, dan matras mengurangi gaya benturan
- memakai **hukum kekekalan momentum** untuk tolakan (recoil), ledakan, dan tumbukan
- membedakan tumbukan **lenting sempurna**, **lenting sebagian**, dan **tidak lenting sama sekali** memakai koefisien restitusi e
- menentukan **pusat massa** dan memahami mengapa geraknya tidak terpengaruh ledakan

Istilah kunci

momentum

impuls

Koefisien restitusi

pusat massa

Rumus penting

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m v}{\Delta t}$$

Gaya rata-rata saat benda dihentikan. Gaya penghenti = momentum yang harus dihapus dibagi waktu menghapusnya. Perpanjang waktunya, gayanya mengecil!

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Kecepatan bersama setelah tumbukan menempel. Kedua benda menempel dan bergerak bersama. Momentum total sebelum dibagi massa total sesudah.

$$h_n = h e^{2n}$$

Tinggi pantulan ke-n. Setiap kali memantul, tinggi bola dikali e^2 . Bola dengan $e = 0,8$ kehilangan 36% energinya pada setiap pantulan.

Jangan sampai terjebak

- Airbag, helm, dan matras tidak mengurangi perubahan momentum.

 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=9

Teka-teki untuk Bab 10

Sari duduk di kursi putar sambil merentangkan tangan, lalu Raka memutarinya pelan. Tanpa ada yang mendorong lagi, Sari merapatkan tangannya ke dada, dan tiba-tiba ia berputar **jauh lebih cepat!** Tidak ada gaya luar yang mempercepatnya. Apakah ada "momentum" khusus untuk benda yang berputar, dan mengapa ia ikut kekal?

▼ Intip petunjuk

Untuk benda berputar, yang penting bukan hanya massa, tetapi juga **seberapa jauh** massa itu dari sumbu putar. Saat tangan dirapatkan, "kelembaman putar"-nya mengecil, sehingga kecepatan putarnya harus membesar. Besaran yang kekal bernama **momentum sudut**. Kita bongkar di Bab 10: Rotasi & Kesetimbangan Benda Tegar.

10 Rotasi: Ilmu Memutar, Menyeimbangkan, dan Menggelinding

Mengapa gagang pintu selalu dipasang jauh dari engsel? Mengapa gasing yang berputar tidak roboh? Selamat datang di dunia benda yang berputar, tempat jarak sama pentingnya dengan gaya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung **torsi** $\tau = rF \sin \theta$ dan menjelaskan peran lengan momen;
- memakai dua syarat **kesetimbangan benda tegar** ($\Sigma F = 0$ dan $\Sigma \tau = 0$) untuk jungkat-jungkit, pikulan, dan jembatan;
- menentukan **titik berat** dan menilai kapan benda stabil atau terguling;
- memahami **momen inersia**, memakai $\tau = I\alpha$, dan memprediksi pemenang balapan menggelinding;
- menerapkan **kekekalan momentum sudut** pada penari, gasing, dan peloncat indah.

PINTU KELAS YANG BANDEL

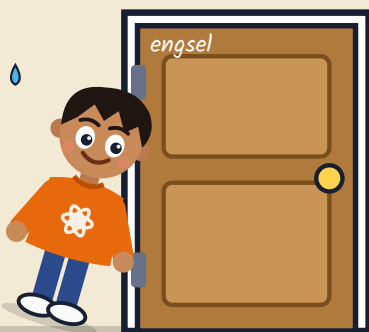
KOMIK • 4 PANEL

Pagi hari, depan kelas

RAKA

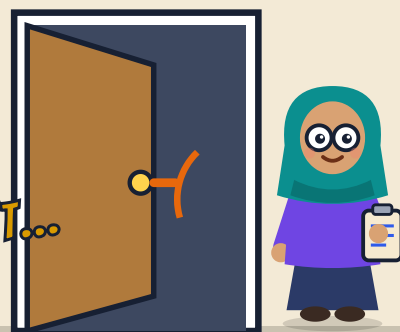
Uggh! Kenapa pintu ini berat banget? Sudah kudorong sekuat tenaga!

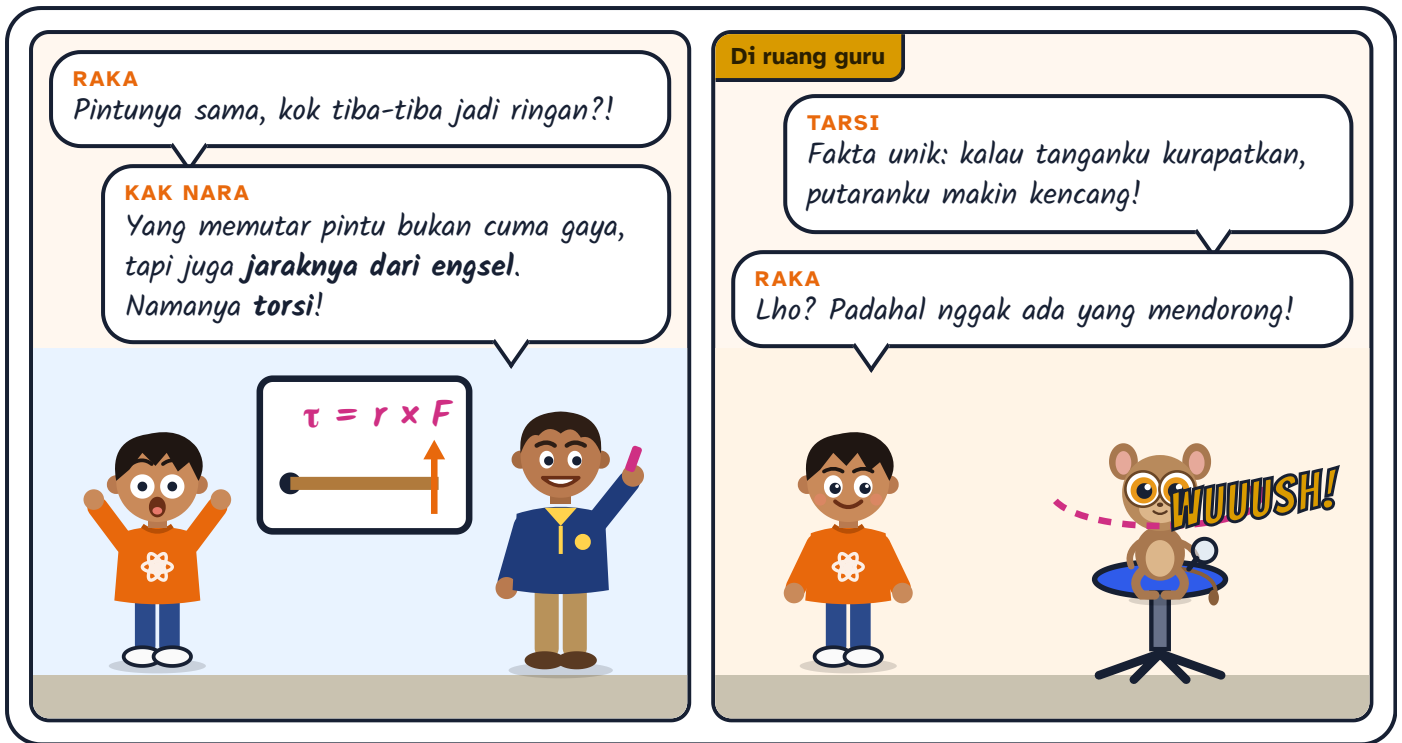
NGIIK?

**SARI**

Coba dorong di dekat gagangnya, Rak. Pakai satu jari pun bisa!

KRIIET...





Tebak Dulu!

Kamu ingin membuka pintu yang berat dengan gaya sekecil mungkin. Di mana dan ke arah mana sebaiknya kamu mendorong?

Dekat engsel, tegak lurus daun pintu.

Di tengah daun pintu, ke arah mana saja.

Di tepi terjauh dari engsel, sejajar daun pintu (ke arah engsel).

Di tepi terjauh dari engsel, tegak lurus daun pintu.

Jawabannya: di tepi terjauh, tegak lurus daun pintu. Efek memutar sebuah gaya (torsi) bergantung pada *besar gaya*, *jarak dari sumbu putar*, dan *arah gaya*. Jarak terbesar dan arah tegak lurus memberi efek putar paling besar. Mendorong sejajar daun pintu ke arah engsel tidak memutar pintu sama sekali, sekuat apa pun dorongannya!

10.1 Torsi: efek memutar sebuah gaya

Di Bab 6, gaya mengubah gerak **lurus**. Untuk gerak **berputar**, yang menentukan adalah **torsi** atau *momen gaya* (τ , dibaca "tau"). Torsi besar jika gayanya besar, jaraknya dari sumbu putar jauh, dan arahnya tegak lurus terhadap "lengan" yang menghubungkan sumbu dengan titik tangkap gaya.

Torsi. $\tau = r F \sin \theta = F \cdot d$, dengan r jarak sumbu ke titik tangkap gaya, θ sudut antara r dan F , dan $d = r \sin \theta$ disebut **lengan momen** (jarak tegak lurus dari sumbu ke garis kerja gaya). Satuannya N·m. Kita sepakati: torsi yang memutar **berlawanan arah jarum jam** bernilai positif.

Bahasa sederhana • Gampangnya: **torsi = gaya × jarak dari poros**. Makin jauh dari poros kamu mendorong, makin mudah benda berputar. Itu sebabnya gagang pintu dipasang di ujung, jauh dari engsel.

RUMUS HIDUP Torsi pada pintu

$$\tau = r F \sin \theta$$

Efek memutar = jarak dari engsel × gaya × sinus sudut. Dorong jauh dari engsel dan tegak lurus daun pintu.



Gaya **20** N di jarak **0,8** m dari engsel dengan sudut **90°** menghasilkan torsi **16** N·m. Geser jaraknya menjadi **0,2** m: kamu butuh gaya empat kali lebih besar untuk torsi yang sama.

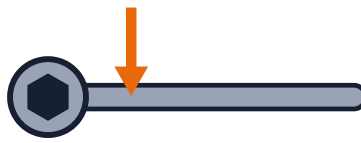
Cek satuan: N · m. Walaupun sama-sama N·m, torsi **bukan** joule: torsi tidak memindahkan energi, hanya mengukur efek putar.

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

gaya sama-sama 100 N, efek putarnya berbeda



$r = 0,30 \text{ m}$, tegak lurus
 $\tau = 0,30 \times 100 = 30 \text{ N}\cdot\text{m}$



$r = 0,10 \text{ m}$, tegak lurus
 $\tau = 0,10 \times 100 = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$



sejajar gagang ($\theta = 0^\circ$)
 $\tau = 0$: mur tidak berputar!

Kunci roda motor: gaya yang sama memberi torsi berbeda bergantung pada jarak dan arahnya. Montir yang kesulitan melepas mur sering menyambung gagang kunci dengan pipa agar lengannya lebih panjang.



AWAS JEBAKAN

Jarak yang dipakai adalah **lengan momen**, yaitu jarak *tegak lurus* dari sumbu ke garis kerja gaya, bukan sekadar jarak ke titik tangkap gaya. Gaya yang garis kerjanya melewati sumbu putar (misalnya menarik gagang pintu lurus menjauhi engsel) menghasilkan torsi **nol**, sebesar apa pun gayanya.

CONTOH Melepas mur roda motor

Raka mendorong ujung kunci roda sepanjang 25 cm dengan gaya 80 N tegak lurus gagang. Berapa torsinya? Jika mur butuh torsi 30 N·m untuk lepas, berhasilkah ia?

- 1 $\tau = rF \sin 90^\circ = 0,25 \times 80 \times 1 = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$.
- 2 $20 \text{ N}\cdot\text{m} < 30 \text{ N}\cdot\text{m}$, jadi mur belum lepas.
- 3 Dengan pipa sambungan, panjang lengan menjadi 40 cm: $\tau = 0,40 \times 80 = 32 \text{ N}\cdot\text{m} > 30 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Gaya yang sama, lengan lebih panjang: mur pun lepas. Tidak perlu otot lebih besar, cukup fisika yang lebih cerdas!

10.2 Kesetimbangan benda tegar: tidak bergeser, tidak berputar

Benda titik cukup memenuhi $\Sigma F = 0$ agar seimbang. Tetapi papan jungkat-jungkit bisa saja tidak bergeser namun **berputar**. Benda tegar (benda yang bentuknya tidak berubah) baru benar-benar setimbang jika memenuhi **dua syarat**.

Syarat kesetimbangan benda tegar. (1) $\Sigma F = 0$: tidak ada percepatan lurus. (2) $\Sigma \tau = 0$ terhadap titik mana pun: tidak ada percepatan sudut. Trik jitu: pilih titik poros di tempat gaya yang tidak diketahui bekerja, agar torsinya nol dan hilang dari persamaan.

LAB MINI

Jungkat-jungkit: seret, timbang, seimbangkan!

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-10

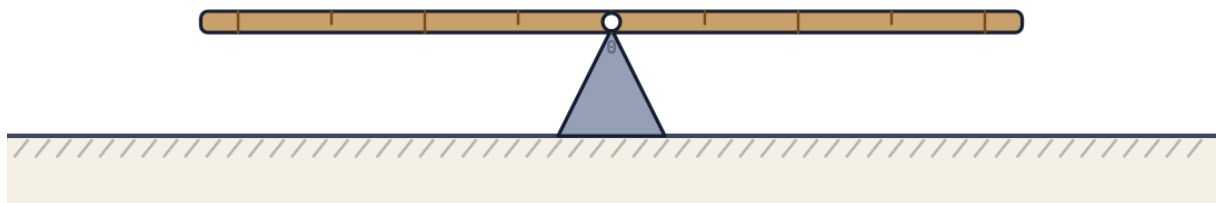


TORSI TERHADAP TITIK TUMPU

↺ kiri 0

↻ kanan 0

Papan kosong: seret beban ke papan



Torsi kiri (↺)

0 N·m

Torsi kanan (↻)

0 N·m

$\Sigma \tau$ (↺ positif)

0 N·m

Keadaan

Papan kosong: seret beban ke papan

Seret Raka, Sari, Kak Nara, atau karung beras ke atas papan (posisi melompat tiap 10 cm). Bandingkan torsi kiri dan kanan. Bisakah kamu menyeimbangkan Kak Nara (60 kg) hanya dengan Raka (40 kg)? Lalu geser titik tumpu: papan bermassa 20 kg pun ikut menyumbang torsi!



TAMU DARI MASA LALU

Archimedes dari Syracuse (±287–212 SM) adalah orang pertama yang menuliskan hukum tuas secara matematis: beban yang seimbang berbanding terbalik dengan jaraknya ke titik tumpu. Ia begitu yakin pada hukumnya sehingga konon berkata, "Berikan aku tempat berpijak dan tuas yang cukup panjang, maka akan kuangkat Bumi!" (Hitung sendiri: tuasnya harus panjang sekali.)

Bu Siti memikul pikulan bambu sepanjang 1,5 m (massanya diabaikan). Keranjang kiri berisi 30 kg sayur, keranjang kanan 20 kg, digantung di kedua ujung. Di mana bahunya harus diletakkan agar pikulan setimbang? Berapa gaya yang ditanggung bahunya? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

- 1 Misalkan bahu berjarak x dari ujung kiri. Torsi terhadap bahu harus nol: $300 \cdot x = 200 \cdot (1,5 - x)$.
- 2 $300x + 200x = 300 \rightarrow x = 0,6 \text{ m}$ dari ujung kiri (keranjang yang lebih berat).
- 3 $\Sigma F = 0$: gaya bahu = $300 + 200 = 500 \text{ N}$ ke atas.

Bahu diletakkan 0,6 m dari keranjang 30 kg, lebih dekat ke beban yang berat. Pedagang berpengalaman melakukannya otomatis dengan menggeser pikulan sampai terasa "pas".

Papan homogen sepanjang 6 m dan berat 300 N bertumpu pada kedua ujungnya di atas parit. Sari (berat 400 N) berdiri 2 m dari ujung kiri. Berapa gaya yang ditanggung tumpuan kiri dan kanan?

- 1 Pilih poros di tumpuan kiri, sehingga gaya tumpuan kiri N_A tidak muncul dalam persamaan torsi.
- 2 Berat papan bekerja di tengah (3 m). $\Sigma \tau = 0$: $N_B \times 6 = 300 \times 3 + 400 \times 2 = 1700 \rightarrow N_B \approx 283 \text{ N}$.
- 3 $\Sigma F = 0$: $N_A = 300 + 400 - 283 = 417 \text{ N}$.

Tumpuan kiri menanggung $\pm 417 \text{ N}$ dan kanan $\pm 283 \text{ N}$. Tumpuan yang lebih dekat dengan Sari menanggung lebih banyak. Cek: torsi terhadap tumpuan kanan $N_A \times 6 = 300 \times 3 + 400 \times 4 = 2500 \rightarrow N_A \approx 417 \text{ N}$. ✓



FISIKA INDONESIA: JEMBATAN YANG BISA "MENUNDUK"

Jembatan Ampera di Palembang, yang diresmikan tahun 1965, dulu punya bagian tengah yang bisa diangkat agar kapal tinggi bisa lewat di Sungai Musi. Agar mesin pengangkatnya tidak terlalu berat, setiap menara jembatan dilengkapi **bandul pemberat** (*counterweight*) yang mengimbangi berat bentang tengah, prinsip yang sama dengan jungkat-jungkit dan katrol. Karena proses mengangkatnya lama dan mengganggu lalu lintas, fungsi ini dihentikan sekitar tahun 1970, dan bandul pemberatnya kemudian diturunkan.

**TANGGA BERSANDAR DAN GAYA ENGSEL**

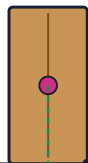
Tangga homogen bermassa m bersandar pada dinding licin dengan sudut θ terhadap lantai kasar. Gaya dinding N_w mendatar; lantai memberi $N = mg$ ke atas dan gesekan $f = N_w$. Torsi terhadap kaki tangga: $N_w L \sin \theta = mg \frac{L}{2} \cos \theta$, sehingga $f = \frac{mg}{2 \tan \theta}$. Tangga tidak tergelincir jika $f \leq \mu mg$, yaitu $\tan \theta \geq \frac{1}{2\mu}$. Pada soal engsel, ingat bahwa gaya engsel punya **dua komponen** (mendatar dan tegak) yang biasanya dicari dengan $\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma F_y = 0$ setelah torsi terhadap engsel diselesaikan.

10.3 Titik berat dan kestabilan

Gravitasi menarik setiap bagian benda, tetapi efek totalnya sama seperti satu gaya yang bekerja di satu titik: **titik berat**. Untuk benda di dekat permukaan Bumi, titik berat sama dengan pusat massa (Bab 9). Pada benda homogen yang simetris, titik beratnya di tengah. Penggaris bisa kamu seimbangkan di satu jari jika jari tepat di bawah titik beratnya.

Syarat stabil. Benda yang berdiri tetap stabil selama **garis vertikal dari titik beratnya jatuh di dalam bidang alasnya**. Jika garis itu keluar dari alas, berat benda menghasilkan torsi yang menggulingkannya.

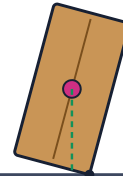
tegak: sangat stabil



tepi alas (poros guling)

Langkah 1. Lemari tinggi berdiri tegak. Titik beratnya (bulatan merah muda) ada di tengah, dan garis vertikal darinya jatuh tepat di tengah alas.

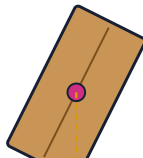
miring 15°: garis berat masih di dalam alas → kembali tegak



tepi alas (poros guling)

Langkah 2. Dimiringkan 15°: garis vertikal dari titik berat masih jatuh di dalam alas. Torsi berat lemari memutarinya kembali ke posisi tegak.

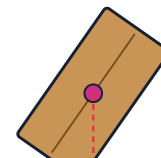
miring ±27°: titik berat tepat di atas tepi alas (kritis)



tepi alas (poros guling)

Langkah 3. Pada sudut kritis ($\tan \theta = \frac{\text{setengah lebar}}{\text{tinggi titik berat}} = \frac{40}{80}$, sekitar 27°), titik berat tepat di atas tepi alas. Sedikit saja lagi...

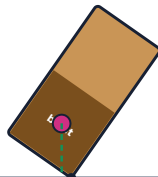
miring 35°: garis berat keluar dari alas → TERGULING!



tepi alas (poros guling)

Langkah 4. ...garis berat keluar dari alas, torsi berat kini menggulingkan lemari. BRUK! Itu sebabnya lemari tinggi sebaiknya dipaku ke dinding.

titik berat rendah: miring 35° pun masih kembali tegak



tepi alas (poros guling)

Langkah 5. Lemari yang sama, tetapi laci bawahnya diisi barang berat. Titik beratnya turun, sudut kritisnya naik menjadi 45°. Titik berat rendah + alas lebar = stabil.



TRIK KAK NARA: MENEMUKAN TITIK BERAT DENGAN DUA JARI

Letakkan sapu atau penggaris panjang mendatar di atas kedua jari telunjukmu yang berjauhan. Geser kedua jari perlahan saling mendekat. Ajaib: jari-jarimu selalu bertemu tepat di titik berat! Jari yang lebih dekat ke titik berat menanggung beban lebih besar, sehingga gesekannya lebih besar dan ia "tertahan", sementara jari yang lain bergeser. Begitu bergantian, sampai keduanya bertemu.

MITOS

"Titik berat selalu berada di dalam bahan benda."

MITOS

"Benda yang lebih berat selalu lebih sulit terguling."

FAKTA

Tidak selalu! Titik berat cincin, bumerang, dan huruf L berada di ruang kosong. Pelompat tinggi gaya Fosbury melengkungkan tubuhnya sehingga titik beratnya bisa lewat

di bawah

mistar, padahal tubuhnya melewati di atasnya.

FAKTA

Yang menentukan sudut guling adalah

letak

titik berat dan

lebar

alas, bukan beratnya. Truk berat yang muatannya ditumpuk tinggi lebih mudah terguling di tikungan daripada mobil kecil yang rendah.

10.4

Momen inersia: "massa" untuk gerak berputar

Di gerak lurus, massa mengukur kelembaman: seberapa sulit benda dipercepat. Di gerak berputar, perannya diambil oleh **momen inersia** I . Bedanya, momen inersia tidak hanya bergantung pada *berapa banyak* massa, tetapi juga *di mana* massa itu berada terhadap sumbu putar. Massa yang jauh dari sumbu jauh lebih "malas" diputar.

Momen inersia. Untuk kumpulan partikel, $I = \sum m_i r_i^2$, dengan r_i jarak tiap partikel ke sumbu putar. Satuannya $\text{kg}\cdot\text{m}^2$. Karena jaraknya dikuadratkan, massa yang dua kali lebih jauh menyumbang empat kali lebih besar.

Benda (massa M , jari-jari R atau panjang L)	Sumbu	Momen inersia	$k = I/(MR^2)$
Cincin atau pipa tipis (pelek sepeda)	pusat, tegak lurus bidang	MR^2	1
Silinder pejal atau cakram	sumbu silinder	$\frac{1}{2}MR^2$	0,5
Bola berongga tipis (bola pingpong)	diameter	$\frac{2}{3}MR^2$	0,67
Bola pejal (kelereng, bola bekel)	diameter	$\frac{2}{5}MR^2$	0,4
Batang tipis	tengah batang	$\frac{1}{12}ML^2$	–
Batang tipis	ujung batang	$\frac{1}{3}ML^2$	–

Bahasa sederhana • Contoh sehari-hari: memutar sapu yang dipegang di tengah terasa ringan, tetapi memutarnya sambil dipegang di ujung terasa berat. Massanya sama, tetapi letak massanya terhadap tanganmu berbeda.

**TEOREMA SUMBU SEJAJAR DAN SUMBU TEGAK LURUS**

Sumbu sejajar: jika sumbu digeser sejauh d dari sumbu yang melalui pusat massa, $I = I_{\text{pm}} + Md^2$. Contoh: batang terhadap ujungnya, $\frac{1}{12}ML^2 + M(\frac{L}{2})^2 = \frac{1}{3}ML^2$. **Sumbu tegak lurus** (khusus benda pipih di bidang xy): $I_z = I_x + I_y$. Contoh: cakram terhadap diameternya, $I_x = I_y = \frac{1}{2}I_z = \frac{1}{4}MR^2$. Momen inersia benda kontinu dihitung dengan integral $I = \int r^2 dm$.

10.5**Dinamika rotasi: Hukum II Newton versi putar**

Torsi total menyebabkan **percepatan sudut** α (rad/s²), persis seperti gaya total menyebabkan percepatan. Hampir setiap rumus gerak lurus punya "kembaran" rotasinya.

Hukum II Newton untuk rotasi. $\Sigma \tau = I\alpha$. Torsi sama, momen inersia lebih kecil → percepatan sudut lebih besar.

Gerak lurus	Gerak berputar	Penghubung
posisi x (m)	sudut θ (rad)	$s = r\theta$
kecepatan v	kecepatan sudut ω	$v = \omega r$
percepatan a	percepatan sudut α	$a_t = \alpha r$
massa m	momen inersia I	$I = \sum mr^2$
gaya $F = ma$	torsi $\tau = I\alpha$	$\tau = rF \sin \theta$
momentum $p = mv$	momentum sudut $L = I\omega$	$L = rp$ (untuk partikel)
energi kinetik $\frac{1}{2}mv^2$	energi kinetik rotasi $\frac{1}{2}I\omega^2$	

Timba berisi air (5 kg) tergantung pada tali yang dililitkan di kerekan kayu berbentuk silinder pejal (massa 4 kg, jari-jari 0,1 m). Timba dilepas dan jatuh ke dalam sumur. Abaikan gesekan. Berapa percepatan timba? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

1 Timba (gerak lurus): $mg - T = ma$.

2 Kerekan (berputar): $TR = I\alpha = \frac{1}{2}MR^2 \cdot \frac{a}{R} \rightarrow T = \frac{1}{2}Ma$.

3 Jumlahkan: $mg = (m + \frac{1}{2}M)a \rightarrow a = \frac{5 \times 10}{5 + 2} \approx 7,1 \text{ m/s}^2$.

Timba jatuh dengan $\pm 7,1 \text{ m/s}^2$, lebih lambat dari jatuh bebas, karena sebagian energinya dipakai untuk memutar kerekan. Kerekan bermassa berperan seperti "massa tambahan" sebesar $I/R^2 = 2 \text{ kg}$.

10.6 Energi kinetik rotasi dan balapan menggelinding

Benda yang berputar menyimpan **energi kinetik rotasi** $\frac{1}{2}I\omega^2$. Roda yang menggelinding melakukan dua gerak sekaligus: bergeser (translasi) dan berputar (rotasi). Jika tidak selip, titik roda yang menyentuh tanah sesaat diam dan $v = \omega R$.

Energi benda menggelinding. $E_k = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2(1 + k)$, dengan $k = \frac{I}{mR^2}$.



Tebak Dulu!

Bola pejal, silinder pejal, dan cincin (massa dan jari-jarinya sama) dilepas bersamaan dari puncak lereng yang sama. Semuanya menggelinding tanpa selip. Siapa yang tiba di bawah paling dulu?

Cincin, karena massanya di tepi sehingga "terlempar" lebih cepat.

Ketiganya bersamaan, karena massa dan jari-jarinya sama.

Bola pejal.

Silinder pejal, karena bentuknya paling stabil.

Jawabannya: bola pejal. Energi potensial yang sama harus dibagi untuk translasi dan rotasi. Benda yang massanya terkumpul dekat sumbu (k kecil) hanya perlu sedikit energi untuk berputar, sehingga sisa energinya untuk meluncur lebih banyak. Urutannya: bola pejal ($k = 0,4$), silinder pejal ($0,5$), cincin (1). Hebatnya, hasil ini sama untuk bola sebesar kelereng maupun sebesar batu besar!

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+k}}$$

Mirip $v = \sqrt{2gh}$, tetapi dibagi $(1+k)$ karena sebagian energi dipakai untuk berputar.

h Tinggi lereng m

k Faktor bentuk $I/(mR^2)$

v Kelajuan di dasar m/s

KELAJUAN DI DASAR

4,1
m/s

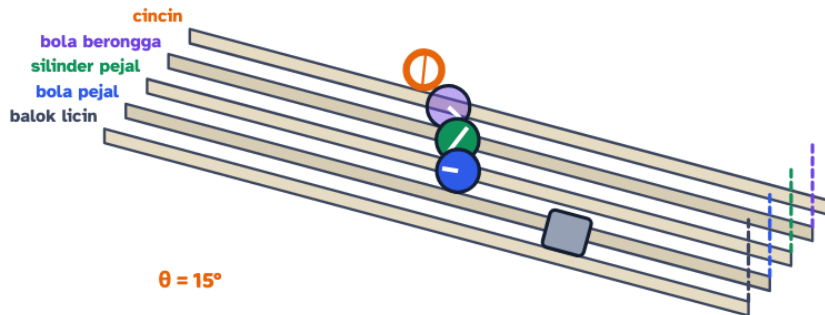
Dari lereng setinggi **1,2** m, benda dengan $k = \mathbf{0,4}$ tiba dengan kelajuan **4,1** m/s. Massa dan jari-jari tidak muncul di rumus!

Cek satuan: $\sqrt{\text{m/s}^2 \cdot \text{m}} = \text{m/s}$; k tidak bersatuan.

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

LAB MINI Balapan menggelinding di lereng

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-10



HASIL & ENERGI

1. balok licin ...
2. bola pejal ...
3. silinder pejal ...
4. bola berongga ...
5. cincin ...

oranye = translasi, ungu = rotasi

benda kecil:
waktunya tetap sama!

Juara penggelinding

—

Waktu juara

—

Waktu cincin

—

Waktu bola pejal

—

Atur kemiringan lereng lalu tekan **Jalankan**. Lima peserta: balok licin (meluncur tanpa berputar), bola pejal, silinder pejal, bola berongga, dan cincin. Siapa juaranya? Aktifkan "benda besar & berat": apakah urutan dan waktunya berubah? Perhatikan juga batang pembagian energi translasi (oranye) dan rotasi (ungu).



AWAS JEBAKAN

Benda yang menggelinding tanpa selip **tidak** kehilangan energi karena gesekan, walaupun ada gaya gesek statis. Titik yang menyentuh tanah sesaat diam, jadi gesekan statis tidak melakukan usaha. Gesekan itu hanya "mengalihkan" sebagian energi menjadi putaran. Energi baru hilang jika benda **selip** (gesekan kinetis).

10.7 Momentum sudut dan kekekalannya

Kembaran rotasi dari momentum adalah **momentum sudut** $L = I\omega$ (satuan $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$). Seperti momentum yang hanya berubah jika ada gaya luar, momentum sudut hanya berubah jika ada **torsi luar**.

Hukum kekekalan momentum sudut. Jika torsi luar total nol, $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$.

Momen inersia mengecil $\rightarrow$ kecepatan sudut membesar, dan sebaliknya.

$$\omega_2 = \frac{I_1 \omega_1}{I_2}$$

Rapatkan tangan (I kecil), putaran makin kencang. Rentangkan tangan (I besar), putaran melambat.

I_1 Momen inersia awal $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

ω_1 Kecepatan sudut awal rad/s

I_2 Momen inersia akhir $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

ω_2 Kecepatan sudut akhir rad/s

KECEPATAN SUDUT AKHIR

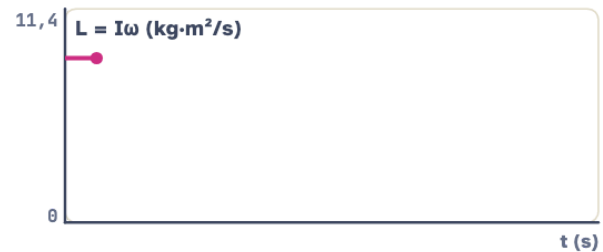
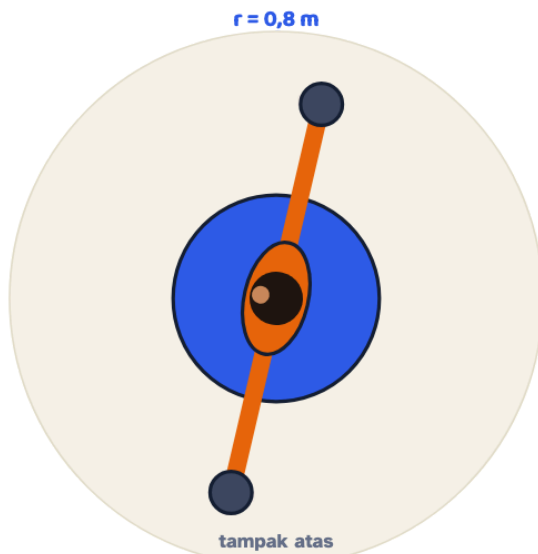
7,5

rad/s

Momen inersia berubah dari **4** menjadi **1,6** $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, sehingga putaran berubah dari **3** menjadi **7,5** rad/s . Momentum sudut tetap sama!

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

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



tanpa torsi luar: L tetap

Momen inersia I
 $5,84 \text{ kg·m}^2$

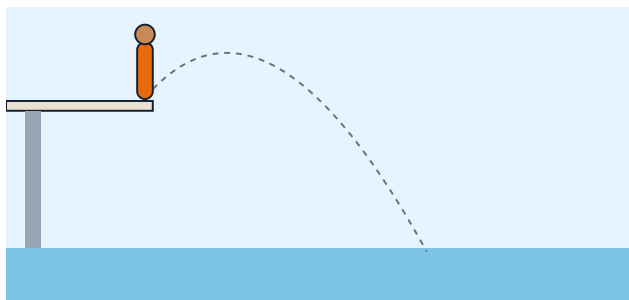
Kecepatan sudut ω
 $1,5 \text{ rad/s}$

Putaran
 14 rpm

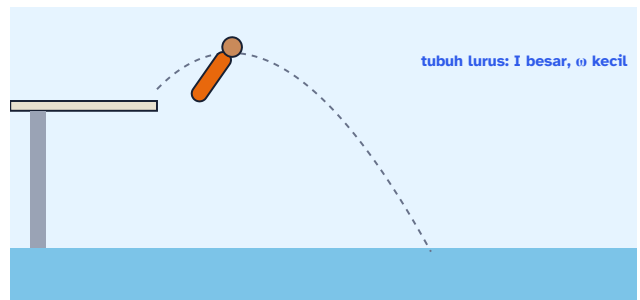
Momentum sudut L
 $8,76 \text{ kg·m}^2/\text{s}$

Ek rotasi
 $6,6 \text{ J}$

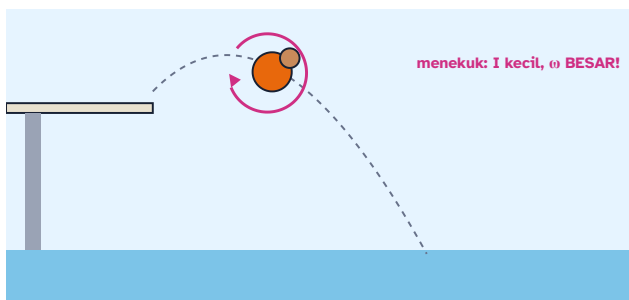
Tekan **Putar!** untuk memberi dorongan, lalu geser **jarak dumbel** saat kursi berputar. Amati ω dan L di grafik. Momentum sudut tetap, tetapi bagaimana dengan energi kinetik rotasinya? Nyalakan "gesekan poros" untuk melihat torsi luar mencuri momentum sudut.



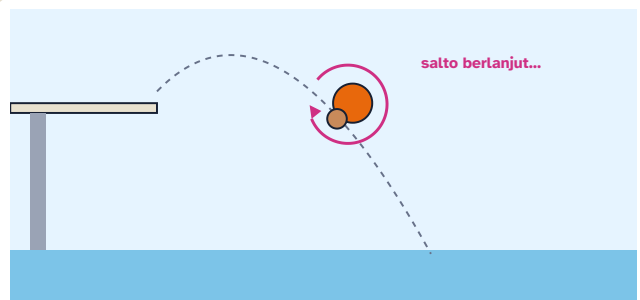
Langkah 1. Peloncat indah bersiap di ujung papan loncat. Saat menolak papan, kakinya memberi torsi sehingga tubuhnya mulai berputar pelan.



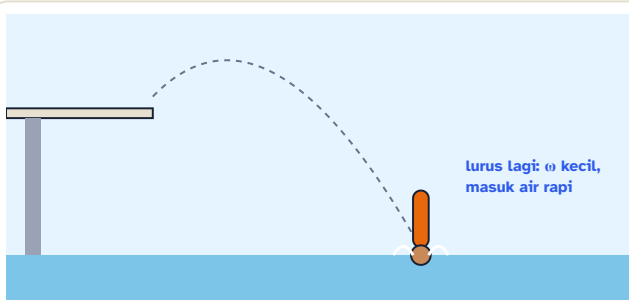
Langkah 2. Di udara tidak ada torsi luar (gravitasi bekerja di titik beratnya), jadi momentum sudut $L = I\omega$ tetap. Dengan tubuh lurus, I besar dan putarannya lambat.



Langkah 3. Ia menekuk tubuh (posisi *tuck*), memeluk lututnya. Momen inersianya bisa turun beberapa kali lipat, sehingga putarannya menjadi beberapa kali lebih cepat. Salto ganda!



Langkah 4. Selama tetap menekuk, ia terus berputar cepat sambil jatuh mengikuti lintasan parabola titik beratnya.



Langkah 5. Sebelum menyentuh air, ia meluruskan tubuh lagi. I membesar, ω mengecil, dan tubuhnya masuk air hampir tanpa cipratan. Semua tanpa "mesin" putar: hanya mengatur I !



FISIKA INDONESIA: GASING NUSANTARA

Gasing dimainkan dari Sumatra sampai Papua, dengan nama dan bentuk berbeda: gasing dari kayu keras di Kepulauan Riau, gangsing di Jawa, hingga gasing bambu yang berdengung. Gasing yang baik punya banyak massa di bagian tepinya, sehingga momen inersianya besar. Setelah dilempar dengan tali, gasing menyimpan momentum sudut besar. Selama momentum sudutnya besar, arah sumbu putarnya "keras kepala", sulit dirobuhkan, sehingga gasing berdiri tegak di atas ujung runcingnya. Baru setelah gesekan menghabiskan putarannya, gasing mulai bergoyang dan roboh.

**MOMENTUM SUDUT ADALAH VEKTOR: PRESESI GASING**

Momentum sudut $L = I\omega$ mengarah sepanjang sumbu putar (aturan tangan kanan). Torsi mengubah L : $\tau = dL/dt$. Pada gasing miring, berat menghasilkan torsi yang **tegak lurus** L . Akibatnya L tidak jatuh, melainkan berbelok perlahan mengelilingi sumbu tegak: gerak **presesi**, dengan kecepatan sudut $\Omega = \frac{mgr}{I\omega}$. Makin cepat gasing berputar, makin lambat presesinya. Untuk partikel, $L = r \times p$; planet yang mengorbit Matahari pun punya momentum sudut yang kekal.

MITOS

"Penari mempercepat putarannya dengan mendorong lantai saat merapatkan tangan."

MITOS

"Benda yang lebih berat menggelinding lebih cepat menuruni lereng."

FAKTA

Tidak perlu dorongan apa pun! Merapatkan tangan memperkecil momen inersia, sehingga ω membesar agar $L = I\omega$ tetap. Energi kinetik rotasinya memang naik, dan energinya berasal dari otot lengan yang menarik tangan ke dalam.

FAKTA

Kelajuan menggelinding

$$v = \sqrt{2gh/(1+k)}$$

hanya bergantung pada

bentuk

(nilai

k

), bukan massa atau ukuran. Kelereng kecil dan bola bowling (keduanya bola pejal) tiba bersamaan.

**Gagang pintu**

Dipasang jauh dari engsel agar lengan momennya besar: dorongan kecil cukup untuk membuka pintu yang berat.

**Kunci roda motor**

Gagang yang panjang (atau disambung pipa) memperbesar torsi untuk melepas mur yang macet.

**Egrang**

Pemain egrang terus menggeser kakinya agar garis vertikal dari titik beratnya tetap jatuh di atas pijakan egrang yang sempit.



Pikulan

Bahu diletakkan lebih dekat ke keranjang yang lebih berat, agar torsi kedua beban terhadap bahu sama besar.



Sepeda yang melaju

Roda yang berputar cepat punya momentum sudut besar, sehingga sepeda lebih mudah dijaga tetap tegak daripada saat berjalan pelan.



Gasing tradisional

Massa di tepi gasing memperbesar momen inersia, sehingga gasing menyimpan momentum sudut lebih banyak dan berputar lebih lama.

Cek Cepat

Gaya 40 N bekerja tegak lurus pada ujung kunci sepanjang 0,25 m. Torsinya...

160 N·m

0,1 N·m

10 N·m

40 N·m

Raka (40 kg) duduk 1,5 m dari titik tumpu jungkat-jungkit. Agar seimbang, Kak Nara (60 kg) harus duduk di sisi lain pada jarak...

1,5 m

1,0 m

2,25 m

0,5 m

Peseluncur es berputar dengan tangan terentang, lalu merapatkan tangannya. Yang terjadi...

momen inersia mengecil, kecepatan sudut membesar

momen inersia membesar, kecepatan sudut mengecil

momentum sudutnya bertambah

kecepatan sudutnya tetap

Kunci Cek Cepat: 1. C · 2. B · 3. A

Tantangan Rumah: titik berat sapu dan balapan kaleng

Bahan: sapu ijuk, dua kaleng bekas yang sama (satu kosong lalu ditutup, satu berisi pasir padat), papan atau buku tebal untuk membuat lereng

1. Letakkan sapu mendatar di atas kedua jari telunjuk, lalu geser kedua jari saling mendekat perlahan. Tandai tempat jari bertemu: itulah titik beratnya. Mengapa letaknya lebih dekat ke bagian ijuk?
2. Buat lereng landai dari papan. Lepaskan kedua kaleng bersamaan dari garis start yang sama.
3. Ulangi 3 kali dan catat kaleng mana yang sampai duluan.

Pertanyaan: Kaleng berisi pasir padat mirip silinder pejal ($k \approx 0,5$), sedangkan kaleng kosong mirip pipa (k mendekati 1). Apakah hasilmu sesuai dengan ramalan Lab Mini? (Hati-hati dengan tepi kaleng yang tajam.)

RINGKASAN KILAT **Bab 10 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menghitung **torsi** $\tau = rF \sin \theta$ dan menjelaskan peran lengan momen
- memakai dua syarat **kesetimbangan benda tegar** ($\Sigma F = 0$ dan $\Sigma \tau = 0$) untuk jungkat-jungkit, pikulan, dan jembatan
- menentukan **titik berat** dan menilai kapan benda stabil atau terguling
- memahami **momen inersia**, memakai $\tau = I\alpha$, dan memprediksi pemenang balapan menggelinding
- menerapkan **kekekalan momentum sudut** pada penari, gasing, dan peloncat indah

Istilah kunci

torsi

titik berat

momen inersia

momentum sudut

Rumus penting

$$\tau = r F \sin \theta$$

Torsi pada pintu. Efek memutar = jarak dari engsel $\times$ gaya $\times$ sinus sudut. Dorong jauh dari engsel dan tegak lurus daun pintu.

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+k}}$$

Kelajuan di dasar lereng (menggeling tanpa selip). Mirip $v = \sqrt{2gh}$, tetapi dibagi $(1+k)$ karena sebagian energi dipakai untuk berputar.

$$\omega_2 = \frac{I_1 \omega_1}{I_2}$$

Kekekalan momentum sudut. Rapatkan tangan (I kecil), putaran makin kencang. Rentangkan tangan (I besar), putaran melambat.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Jarak yang dipakai adalah lengan momen, yaitu jarak tegak lurus dari sumbu ke garis kerja gaya, bukan sekadar jarak ke titik tangkap gaya.
- Benda yang menggeling tanpa selip tidak kehilangan energi karena gesekan, walaupun ada gaya gesek statis.

📄 Tangga Latihan: 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=10

🧩 Teka-teki untuk Bab 11

Komet Halley melesat sangat cepat saat dekat Matahari, tetapi merayap pelan di ujung orbitnya yang jauh, melewati orbit Neptunus. Tidak ada mesin yang mempercepat atau mengeremnya. Mengapa ini mirip penari yang merapatkan dan merentangkan tangannya? Gaya apa yang bekerja, dan mengapa gaya itu tidak mengubah momentum sudut komet?

▼ Intip petunjuk

Gaya gravitasi Matahari selalu mengarah tepat ke Matahari, sehingga torsiya terhadap Matahari nol. Momentum sudut komet $L = mvr$ kekal: saat jarak r kecil, kelajuan v besar. Inilah inti Hukum Kepler II. Kita bongkar di Bab 11: Gravitasi & Satelit.

11 Gravitasi & Satelit: Jatuh Tanpa Pernah Sampai

Apel jatuh ke tanah, tetapi Bulan tidak. Satelit SATRIA-1 tampak "diam" di atas Indonesia, padahal melesat 3 km setiap detik. Satu gaya yang sama menjelaskan semuanya.

Setelah bab ini, kamu bisa

- menghitung gaya tarik antara dua benda dengan **hukum gravitasi Newton** dan menjelaskan arti "kuadrat terbalik";
- menjelaskan mengapa nilai g berbeda di khatulistiwa, di puncak gunung, di orbit, dan di planet lain;
- menghitung **kecepatan orbit**, **periode satelit**, dan **kecepatan lepas**;
- menjelaskan orbit **geostasioner** dan mengapa letak Indonesia di khatulistiwa sangat istimewa;
- memakai tiga **hukum Kepler** dan menjelaskan mengapa astronot di ISS melayang.

SATELIT YANG TAK PERNAH JATUH

KOMIK • 4 PANEL

Malam hari, di teras rumah

RAKA

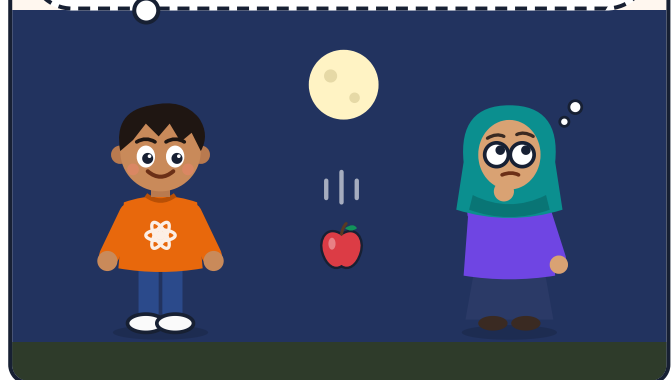
Kak, antena parabola tetangga kok nggak pernah digeser? Satelitnya diam di langit, ya?

**SARI**

Kalau diam, kenapa nggak jatuh? Apel aja jatuh!

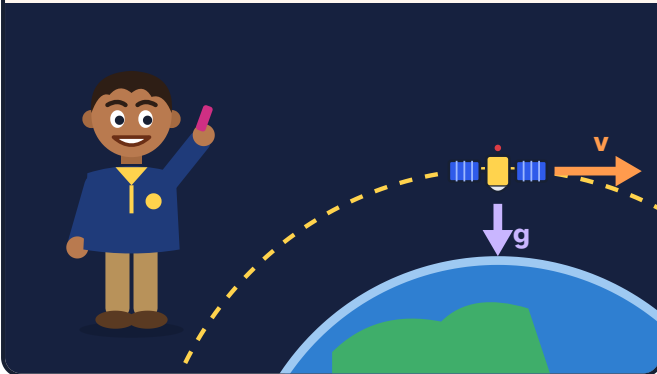
RAKA

Mungkin di atas sana nggak ada gravitasi...



KAK NARA

Satelit itu justru *sedang jatuh*, terus-menerus! Tapi ia melaju ke samping begitu cepat, sehingga permukaan Bumi "melengkung menjauh" di bawahnya.



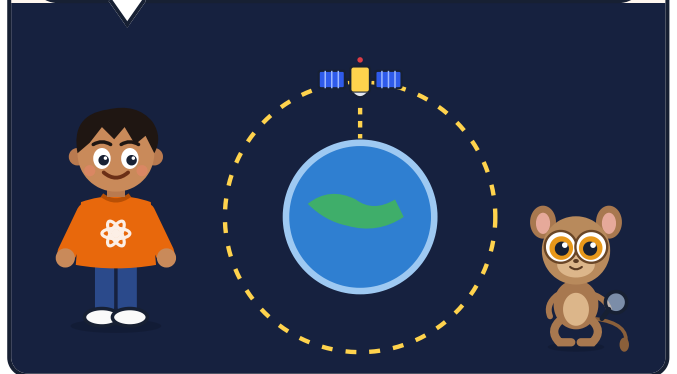
Fakta unik dari Tarsi

TARSI

SATRIA-1 mengitari Bumi tepat sekali sehari, sama dengan putaran Bumi. Dari Indonesia, ia tampak diam!

RAKA

Jatuh terus tapi nggak pernah sampai? Keren!



Tebak Dulu!

Astronot di Stasiun Luar Angkasa Internasional (ISS), sekitar 400 km di atas Bumi, melayang-layang. Kira-kira berapa besar tarikan gravitasi Bumi di sana, dibandingkan di permukaan?

0%, karena di luar angkasa tidak ada gravitasi.

Sekitar 10%, karena sudah sangat jauh dari Bumi.

Sekitar 90%, hampir sama dengan di permukaan.

Lebih dari 100%, karena lebih dekat ke Matahari.

Jawabannya: sekitar 89%! Jari-jari Bumi ± 6.400 km, jadi naik 400 km hanya menambah jarak dari pusat Bumi sekitar 6%. Gravitasi di ISS masih kuat. Astronot melayang bukan karena gravitasinya hilang, melainkan karena mereka dan stasiunnya *sama-sama jatuh* mengelilingi Bumi. Rahasiannya kita bongkar di subbab 11.7.

11.1 Hukum gravitasi Newton: apel dan Bulan

Konon, Isaac Newton muda sedang duduk di kebun ketika melihat apel jatuh. Ia lalu bertanya: *apakah gaya yang menarik apel itu juga mencapai Bulan?* Pertanyaan sederhana ini mengubah sejarah. Jawabannya: **ya**. Gaya yang sama menarik apel, Bulan, planet, dan bintang.

Hukum gravitasi Newton. Setiap dua benda bermassa saling menarik dengan gaya yang sebanding dengan hasil kali massanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat keduanya.

Dalam bentuk rumus: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$. Huruf G adalah **tetapan gravitasi umum**, $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$. Angka ini *sangat* kecil. Itulah sebabnya kamu tidak merasa ditarik oleh meja atau temanmu. Gravitasi baru terasa kalau salah satu massanya raksasa, seperti Bumi.

Bahasa sederhana • Gampangnya: **semua benda saling tarik-menarik**. Makin berat bendanya, makin kuat tarikannya. Makin jauh jaraknya, makin lemah tarikannya. Bumi sangat berat, jadi tarikannya membuat kita tetap menempel di tanah.

RUMUS HIDUP

Hukum gravitasi Newton

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gaya tarik = $G \times$ massa pertama $\times$ massa kedua, dibagi kuadrat jarak pusat ke pusat.
Jarak dijadikan dua kali, gayanya tinggal seperempat!

m_1 Massa benda 1 kg

m_2 Massa benda 2 kg

r Jarak pusat ke pusat m

F Gaya gravitasi N

GAYA GRAVITASI

490,966

N

Benda $5,97 \times 10^{24}$ kg dan 50 kg yang pusatnya berjarak $6,37 \times 10^6$ m saling menarik dengan gaya **490,966** N. Coba buat $m_1 = 50$ kg dan $r = 1$ m: itulah tarikanmu pada teman sebangku!

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

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

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



TRIK KAK NARA: HUKUM "KUADRAT TERBALIK"

Bayangkan semprotan cat. Dari jarak 1 m, catnya menutupi satu ubin. Dari jarak 2 m, cat yang sama tersebar ke $2 \times 2 = 4$ ubin, jadi tiap ubin hanya sebagian seperempat. Gravitasi "menyebar" dengan cara yang sama: jarak $\times 2 \rightarrow$ gaya $\div 4$, jarak $\times 3 \rightarrow$ gaya $\div 9$, jarak $\times 10 \rightarrow$ gaya $\div 100$.



Tebak Dulu!

Bumi menarik sebuah apel dengan gaya 1 N. Berapa besar gaya apel menarik Bumi?

Nol, karena apel terlalu kecil untuk menarik apa pun.

Sangat kecil, sekitar sepersejuta newton.

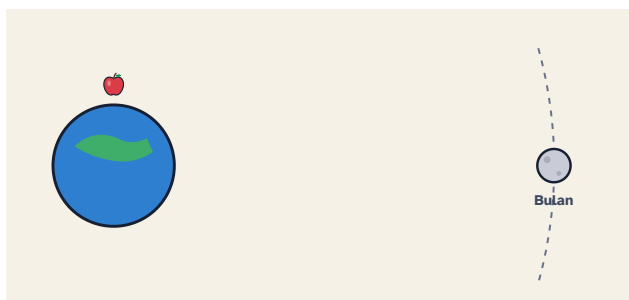
Tepat 1 N juga, hanya arahnya ke atas.

Lebih dari 1 N, karena Bumi lebih besar.

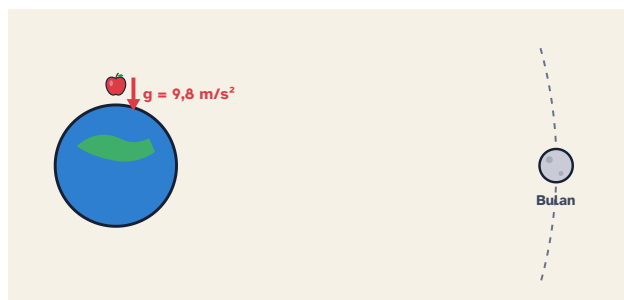
Tepat 1 N! Ingat Hukum III Newton dari Bab 6: gaya selalu berpasangan, sama besar, berlawanan arah. Rumus $F = Gm_1m_2/r^2$ pun simetris: tukar m_1 dan m_2 , hasilnya sama. Lalu mengapa Bumi tidak "melompat" ke arah apel? Karena percepatan = gaya/massa. Gaya 1 N pada massa 6×10^{24} kg menghasilkan percepatan yang terlalu kecil untuk diukur.

Ujian besar Newton: apakah Bulan "jatuh" seperti apel?

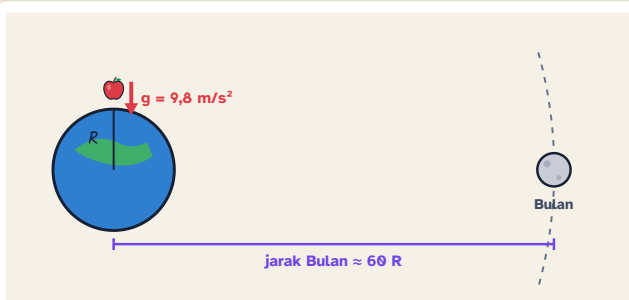
Newton tidak cukup dengan menebak. Ia menghitung. Ikuti langkah-langkahnya, seolah kamu duduk di samping Newton tahun 1660-an.



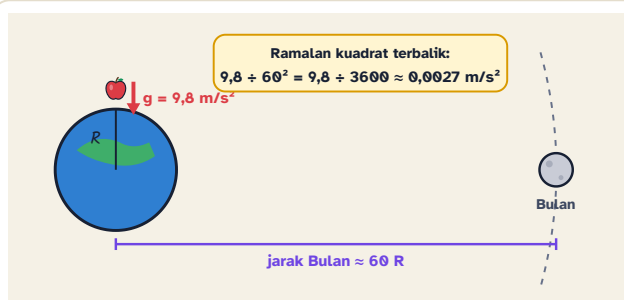
Langkah 1. Di satu sisi ada Bumi dan sebuah apel. Di sisi lain, jauh sekali, ada Bulan yang mengitari Bumi.



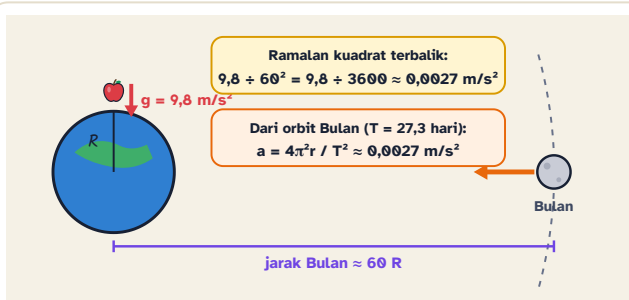
Langkah 2. Apel di permukaan Bumi jatuh dengan percepatan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.



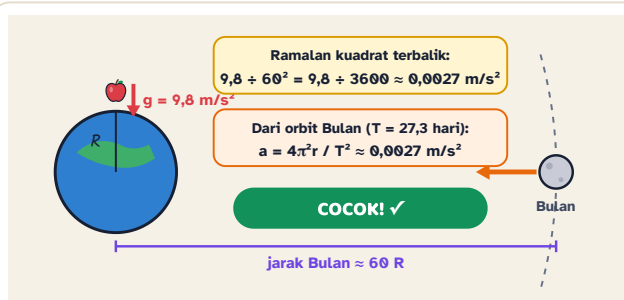
Langkah 3. Apel berjarak R (jari-jari Bumi) dari pusat Bumi. Bulan berjarak sekitar $60R$.



Langkah 4. Kalau gravitasi mengikuti kuadrat terbalik, tarikan Bumi di jarak Bulan tinggal $1/60^2 = 1/3600$ kalinya: sekitar $0,0027 \text{ m/s}^2$.



Langkah 5. Sekarang hitung dengan cara lain. Bulan bergerak melingkar dengan periode 27,3 hari, jadi ia punya percepatan sentripetal $a = 4\pi^2 r / T^2$. Hasilnya juga $\approx 0,0027 \text{ m/s}^2$!



Langkah 6. Dua cara, satu jawaban. Gaya yang menjatuhkan apel adalah gaya yang sama yang membelokkan Bulan. Gravitasi berlaku di seluruh alam semesta.



AWAS JEBAKAN

Dalam $F = Gm_1m_2/r^2$, jarak r diukur dari **pusat ke pusat**, bukan dari permukaan. Untuk satelit yang terbang 400 km di atas Bumi, $r = 6.371 + 400 = 6.771 \text{ km}$, bukan 400 km. Lupa menambahkan jari-jari Bumi adalah kesalahan paling sering di bab ini!



TAMU DARI MASA LALU

Newton menulis hukum gravitasi dalam buku *Principia* (1687), tetapi ia tidak tahu nilai G . Lebih dari seratus tahun kemudian, tahun 1798, Henry Cavendish menggantung batang dengan bola timbal kecil pada kawat tipis. Ia mengukur puntiran kawat yang sangat kecil ketika bola timbal besar didekatkan. Dari hasilnya, nilai G dan massa Bumi akhirnya bisa dihitung. Karena itu eksperimennya dijuluki "menimbang Bumi".

11.2 Medan gravitasi dan nilai g yang berubah-ubah

Bayangkan Bumi dikelilingi "kabut tarikan" yang tak terlihat. Di mana pun kamu menaruh benda bermassa, kabut itu menariknya menuju pusat Bumi. Kabut ini disebut **medan gravitasi**. Kuatnya medan diukur sebagai **gaya per kilogram**, satuannya N/kg, yang ternyata sama dengan m/s^2 . Itulah g !

Dari $mg = \frac{GMm}{R^2}$, massa benda m saling coret, sehingga $g = \frac{GM}{R^2}$. Nilai g hanya bergantung pada massa dan jari-jari planet, bukan pada benda yang jatuh. Karena itu bola besi dan kelereng jatuh bersamaan (kalau hambatan udara diabaikan).

RUMUS HIDUP Percepatan gravitasi di ketinggian h

$$g_h = g_0 \left(\frac{R}{R + h} \right)^2$$

Makin tinggi, makin lemah tarikan Bumi. Tetapi turunnya pelan: di ketinggian ISS masih tersisa hampir 90%.

h Ketinggian dari permukaan km

g_h Percepatan gravitasi m/s^2

PERCEPATAN GRAVITASI

8,676

m/s^2

Pada ketinggian **400** km, percepatan gravitasi tinggal **8,676** m/s^2 (di permukaan 9,8 m/s^2).

Cek satuan: h dan $R = 6.371$ km harus bersatuan sama, karena yang dipakai hanya perbandingannya.

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

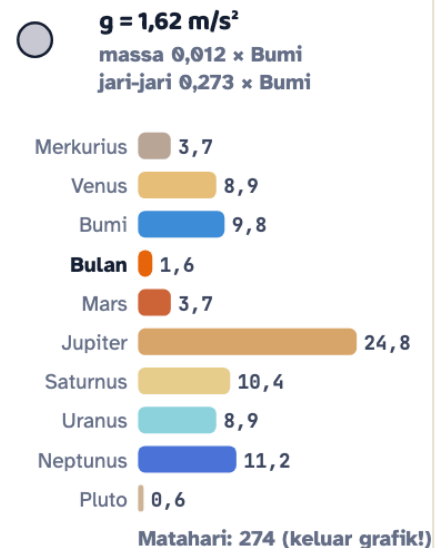
Tempat	Ketinggian	g (m/s^2)
Kutub Utara atau Selatan	permukaan laut	9,83
Pontianak (tepat di khatulistiwa)	permukaan laut	9,78
Puncak Jaya, Papua	4.884 m	$\pm 9,77$

Stasiun luar angkasa ISS	± 400 km	$\pm 8,7$
Satelit geostasioner	35.786 km	$\pm 0,22$
Jarak Bulan	± 384.000 km	$\pm 0,0027$

Mengapa g di khatulistiwa lebih kecil daripada di kutub? Ada dua sebab. Pertama, Bumi agak "gendut" di khatulistiwa: jari-jarinya ± 21 km lebih besar daripada di kutub, jadi kamu sedikit lebih jauh dari pusat Bumi. Kedua, Bumi berputar. Orang di khatulistiwa ikut berputar sejauh ± 40.000 km per hari, dan sebagian kecil tarikan gravitasi "terpakai" untuk membelokkan gerakannya menjadi lingkaran. Jadi timbangan di Pontianak menunjukkan angka sedikit lebih kecil ($\pm 0,5\%$) daripada di kutub.

LAB MINI Timbangan antarplanet: berapa beratmu di Jupiter?

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-11



Gravitasi g 1,62 m/s²	Berat 81 N	Angka timbangan 8,3 kg	Tinggi lompatan 3,03 m	Lama melayang 3,87 s
--	----------------------	----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------

Pilih planet, lalu tekan **Lompat!** Raka melompat dengan tenaga kaki yang sama seperti di Bumi (setinggi 0,5 m). Di mana ia melayang paling lama? Perhatikan bahwa **massanya tidak pernah berubah**, hanya beratnya.

**GRAVITASI DI DALAM BUMI DAN TEOREMA KULIT**

Newton membuktikan dua hal ajaib untuk bola homogen. (1) Di **luar** bola, medannya sama seperti jika seluruh massa dipusatkan di titik pusat. (2) Di **dalam** kulit bola berongga, medan gravitasinya **nol**: tarikan dari bagian kulit yang dekat (sedikit massa) tepat diimbangi tarikan dari bagian yang jauh (banyak massa). Akibatnya, jika kamu menggali ke dalam Bumi homogen sampai jarak r dari pusat, hanya massa di dalam bola berjari-jari r yang menarikmu: $M(r) = Mr^3/R^3$. Jadi $g(r) = g_0 \frac{r}{R}$: naik lurus dari nol di pusat sampai g_0 di permukaan, lalu turun sebanding $1/r^2$ di luar. Medan juga dapat ditulis lewat **potensial gravitasi** $V = -GM/r$: $g = -\frac{dV}{dr}$.

11.3**Energi potensial gravitasi dan kecepatan lepas**

Di Bab 8 kamu memakai $E_p = mgh$. Rumus itu hanya tepat di dekat permukaan Bumi, karena di sana g hampir tetap. Untuk perjalanan ke luar angkasa, kita butuh rumus lengkapnya:

$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

Kenapa negatif? Kita memilih titik nol energi potensial di tempat yang **jauh tak terhingga**. Bayangkan Bumi berada di dasar sebuah **sumur gravitasi**. Di bibir sumur (sangat jauh), energinya nol. Makin dalam ke dasar sumur, makin negatif energinya. Untuk keluar dari sumur, kamu harus "membayar" energi.

Jika kamu melempar bola ke atas, bola naik lalu jatuh lagi. Lempar lebih cepat, ia naik lebih tinggi. Adakah kecepatan yang membuat bola **tidak pernah kembali**? Ada! Energi kinetiknya harus cukup untuk memanjat seluruh sumur: $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R}$. Hasilnya disebut **kecepatan lepas**.

$$v_{\text{lepas}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Kecepatan minimum agar benda lolos dari tarikan planet selamanya. Massa benda yang dilempar tidak berpengaruh!

M Massa planet (× massa Bumi) × Bumi

R Jari-jari planet (× jari-jari Bumi) × Bumi

v_{lepas} Kecepatan lepas km/s

KECEPATAN LEPAS

11,19

km/s

Planet bermassa **1** kali Bumi dan berjari-jari **1** kali Bumi punya kecepatan lepas **11,19** km/s. Coba Bulan: M = 0,0123 dan R = 0,273.

Cek satuan: $\sqrt{\frac{\text{N m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}}} = \sqrt{\text{m}^2/\text{s}^2} = \text{m/s}$, lalu dibagi 1000 menjadi km/s.

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

Benda langit	g permukaan (m/s^2)	Kecepatan lepas (km/s)
Bulan	1,6	2,4
Mars	3,7	5,0
Bumi	9,8	11,2
Jupiter	24,8	59,5
Matahari	274	618

Massa Bulan $7,35 \times 10^{22}$ kg dan jari-jarinya 1.737 km. Hitung kecepatan lepas dari permukaan Bulan. ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$)

- 1 Ubah jari-jari ke meter: $R = 1,737 \times 10^6 \text{ m}$.
- 2
$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 7,35 \times 10^{22}}{1,737 \times 10^6}}$$
- 3 Pembilang: $9,80 \times 10^{12}$. Dibagi R : $5,64 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$.
- 4 $v = \sqrt{5,64 \times 10^6} \approx 2,37 \times 10^3 \text{ m/s}$.

Kecepatan lepas Bulan $\pm 2,4 \text{ km/s}$, kurang dari seperempat milik Bumi. Itulah sebabnya roket Apollo bisa pulang dari Bulan dengan roket kecil, sedangkan untuk berangkat dari Bumi butuh roket raksasa.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

MENGAPA BULAN TIDAK PUNYA UDARA?

Molekul gas bergerak acak dengan kelajuan rata-rata beberapa ratus m/s (Bab 16), dan sebagian kecil jauh lebih cepat. Jika kelajuan rata-rata molekul suatu gas melebihi sekitar 1/6 kecepatan lepas, molekul-molekul tercepatnya terus lolos, sehingga dalam jutaan tahun gas itu "bocor" ke angkasa. Kecepatan lepas Bulan hanya 2,4 km/s, jadi Bulan kehilangan hampir semua gasnya. Jupiter (59,5 km/s) bahkan masih menyimpan hidrogen, gas paling ringan. Dan jika sebuah benda sangat masif tetapi sangat kecil sehingga $v_{\text{lepas}} > c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, cahaya pun tak bisa lolos: itulah lubang hitam.

11.4 Gerak satelit: rahasia "jatuh sambil menyamping"

Newton membayangkan sebuah meriam di puncak gunung yang sangat tinggi, di atas udara. Tembakan pelan jatuh dekat kaki gunung. Tembakan lebih cepat jatuh lebih jauh. Karena Bumi bulat, permukaannya melengkung menjauh di bawah peluru. Pada kecepatan tertentu, peluru terus jatuh, tetapi permukaan Bumi selalu "lari" dengan laju yang sama. Peluru tidak pernah menyentuh tanah. Peluru itu **mengorbit!**

Bahasa sederhana • Gampangnya: satelit itu seperti bola yang dilempar sangat-sangat kencang ke samping. Ia terus jatuh ke arah Bumi, tetapi karena Bumi bulat, ia selalu "meleset". Jatuh terus, meleset terus, jadilah orbit.



v orbit lingkaran
7,35 km/s

v lepas
10,4 km/s

Nasib peluru
Jatuh 5.180 km dari gunung

Waktu terbang
15 menit

Ketinggian
0 km

Atur kecepatan tembak, lalu tekan **Jalankan**. Mulai dari 4 km/s, naikkan sedikit demi sedikit. Temukan kecepatan yang membuat orbit **lingkaran sempurna**, lalu kecepatan yang membuat peluru **lepas selamanya**. Bandingkan dengan angka di pojok kanan atas. Ubah juga tinggi gunungnya.

Agar orbitnya lingkaran, gaya gravitasi harus tepat menjadi gaya sentripetal (Bab 7): $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$. Massa satelit m saling coret, sehingga

$$v_{\text{orbit}} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad \text{dan} \quad T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R + h}}$$

Makin rendah orbitnya, makin kencang satelit harus melaju. Massa satelit tidak berpengaruh sama sekali.

 h

Ketinggian orbit km

 v

Kecepatan orbit km/s

KECEPATAN ORBIT

7,67

km/s

Di ketinggian **400** km, satelit harus melaju **7,67** km/s supaya tidak jatuh dan tidak lepas.

Cek satuan: $\sqrt{\frac{\text{m}^3/\text{s}^2}{\text{m}}} = \text{m/s}$, lalu dibagi 1000 menjadi km/s. (GM Bumi = $3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$.)

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

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R + h)^3}{GM}}$$

Makin tinggi orbitnya, makin lama satu putaran: jalannya lebih jauh DAN lajunya lebih pelan.

h Ketinggian orbit km

T Periode orbit jam

PERIODE ORBIT

23,93

jam

Satelit di ketinggian **35.786** km butuh **23,93** jam untuk sekali mengelilingi Bumi.

Cek satuan: $\sqrt{\text{m}^3/(\text{m}^3/\text{s}^2)} = \text{s}$, lalu dibagi 3600 menjadi jam.

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



Tiga "jalur tol" satelit. Makin tinggi orbitnya, makin pelan lajunya dan makin lama periodenya.

CONTOH Tarikan antara Raka dan Sari

Raka (50 kg) dan Sari (45 kg) duduk berjarak 1 m. Berapa gaya gravitasi di antara mereka?

$$1 \quad F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{50 \times 45}{1^2}.$$

$$2 \quad F = 6,67 \times 10^{-11} \times 2250 \approx 1,5 \times 10^{-7} \text{ N}.$$

Hanya $1,5 \times 10^{-7} \text{ N}$, kira-kira seberat sebutir pasir halus. Jadi kalau Raka bilang ia "tertarik" pada Sari, itu jelas bukan karena gravitasi. 😊

KERJAKAN BERSAMA Kecepatan dan periode ISS

ISS mengorbit pada ketinggian $\pm 400 \text{ km}$. Dengan $R = 6.371 \text{ km}$ dan $GM = 3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$, hitung kecepatan orbit dan periodenya.

$$1 \quad \text{Jarak dari pusat Bumi: } r = 6.371 + 400 = 6.771 \text{ km} = 6,771 \times 10^6 \text{ m}.$$

$$2 \quad v = \sqrt{GM/r} = \sqrt{3,986 \times 10^{14} / 6,771 \times 10^6} = \sqrt{5,887 \times 10^7} \approx 7.670 \text{ m/s}.$$

$$3 \quad T = 2\pi r/v = 2\pi \times 6,771 \times 10^6 / 7670 \approx 5.545 \text{ s} \approx 92 \text{ menit}.$$

ISS melaju $\pm 7,7 \text{ km/s}$ ($\pm 27.600 \text{ km/jam}$) dan mengelilingi Bumi setiap $\pm 92 \text{ menit}$, sekitar 15-16 kali sehari. Para astronotnya melihat matahari terbit belasan kali setiap hari!



AWAS JEBAKAN

"Satelit yang lebih berat harus terbang lebih cepat." Salah! Dalam $v = \sqrt{GM/r}$ tidak ada massa satelit. Satelit raksasa dan baut kecil yang terlepas, jika berada di orbit yang sama, melaju dengan kecepatan yang sama. Itulah sebabnya sampah antariksa sangat berbahaya: baut kecil pun melesat $\pm 7-8 \text{ km/s}$.



TAMU DARI MASA LALU

Gambar meriam di puncak gunung itu benar-benar dibuat Newton. Gambarnya ada dalam tulisan *A Treatise of the System of the World*, yang terbit tahun 1728, setahun setelah Newton wafat. Butuh 229 tahun lagi sampai manusia benar-benar "menembakkan" benda ke orbit: satelit Sputnik 1 pada tahun 1957.



LANJUT • OLIMPIADE

ENERGI ORBIT DAN PARADOKS SATELIT

Untuk orbit lingkaran, $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{2r}$ dan $E_p = -\frac{GMm}{r}$, sehingga energi totalnya $E = -\frac{GMm}{2r} = -E_k$. Sekarang bayangkan satelit rendah yang direm sedikit oleh sisa udara tipis.

Energi totalnya berkurang (makin negatif), jadi r mengecil, dan $E_k = -E$ justru **bertambah**! Hambatan udara membuat satelit makin cepat. Separuh energi potensial yang dilepas menjadi energi kinetik, separuh lagi menjadi kalor gesekan.

11.5 Orbit geostasioner: satelit yang "parkir" di langit Indonesia

Bumi berputar sekali dalam ± 24 jam (tepatnya 23 jam 56 menit relatif terhadap bintang). Jika sebuah satelit mengorbit di atas khatulistiwa, searah putaran Bumi, dengan periode yang **sama persis**, maka dari permukaan Bumi satelit itu tampak diam. Orbit ini disebut **orbit geostasioner**. Dari rumus periode, ketinggiannya pasti ± 35.786 km, dan lajunya $\pm 3,07$ km/s.

Karena tampak diam, antena parabola di rumah cukup diarahkan sekali ke satu titik di langit lalu dikunci. Satelit komunikasi, siaran TV, dan satelit cuaca banyak ditempatkan di orbit ini.

COBA SENDIRI

Menghitung ketinggian geostasioner sendiri

Periode rotasi Bumi terhadap bintang **86.164 s**. Dengan $GM = 3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ dan jari-jari Bumi di khatulistiwa **6.378 km**, hitung ketinggian satelit geostasioner.

1 Dari $T = 2\pi\sqrt{r^3/GM}$, kuadratkan: $r^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2}$.

2 $T^2 = (86.164)^2 = 7,424 \times 10^9 \text{ s}^2$.

3 $r^3 = \frac{3,986 \times 10^{14} \times 7,424 \times 10^9}{39,48} = 7,496 \times 10^{22} \text{ m}^3$.

4 $r = \sqrt[3]{7,496 \times 10^{22}} \approx 4,216 \times 10^7 \text{ m} = 42.164 \text{ km}$.

5 Ketinggian: $h = r - R = 42.164 - 6.378 = 35.786 \text{ km}$.

Satelit geostasioner berada ± 35.786 km di atas khatulistiwa, hampir tiga kali diameter Bumi. Semua satelit geostasioner di dunia berbagi "cincin" yang sama, sehingga posisinya (disebut *slot orbit*) diatur secara internasional.



FISIKA INDONESIA

Pada 8 Juli 1976, Indonesia meluncurkan satelit **Palapa A1**. Indonesia termasuk negara pertama di dunia yang memakai satelit komunikasi domestik (sering disebut yang ketiga, setelah Kanada dan Amerika Serikat), karena sadar bahwa ribuan pulauanya sulit dihubungkan dengan kabel. Nama Palapa diambil dari Sumpah Palapa Gajah Mada tentang menyatukan Nusantara. Pada Juni 2023 menyusul **SATRIA-1**, satelit internet berkapasitas besar di slot orbit 146° BT, untuk menghubungkan sekolah, puskesmas, dan kantor desa di daerah terpencil. Letak Indonesia di khatulistiwa juga menguntungkan untuk peluncuran roket: putaran Bumi di khatulistiwa memberi "dorongan gratis" ± 465 m/s ke arah timur, dan roket bisa langsung menuju bidang orbit geostasioner. Karena itu Biak, Papua, lama dikaji sebagai calon bandar antariksa. Di Pulau Timor, NTT, berdiri Observatorium Nasional Timau dengan teleskop 3,8 m untuk mengamati langit selatan.

MITOS

"Satelit butuh mesin yang terus menyala supaya tidak jatuh."

MITOS

"Satelit geostasioner benar-benar diam di angkasa."

FAKTA

Satelit "meluncur" tanpa mesin. Kecepatan menyamping ditambah tarikan Bumi sudah cukup untuk mengorbit selamanya (jika tanpa udara). Mesin kecil hanya dinyalakan sesekali untuk mengoreksi posisi.

FAKTA

Ia melesat ± 3 km/s! Ia hanya tampak diam karena berputar mengelilingi Bumi tepat secepat Bumi berputar, seperti dua penari yang bergandengan berputar bersama.

11.6 Tiga hukum Kepler: aturan main planet

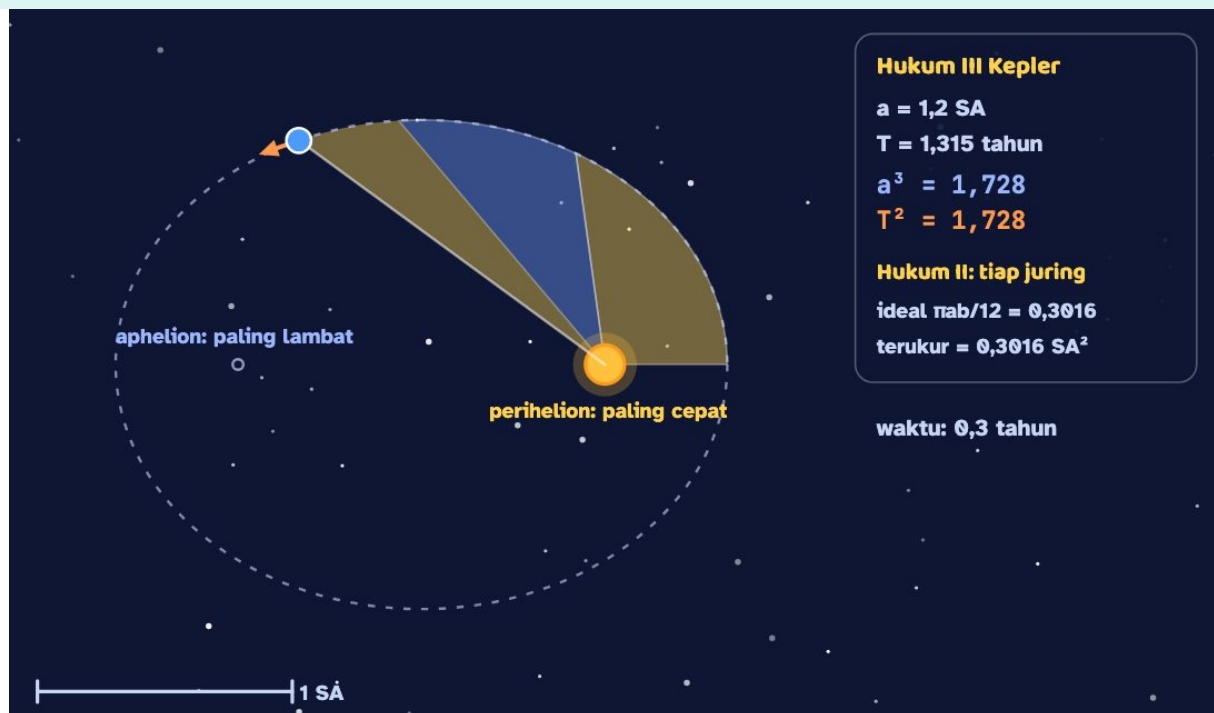


TAMU DARI MASA LALU

Tycho Brahe (1546–1601) mencatat posisi planet selama puluhan tahun dengan ketelitian luar biasa, tanpa teleskop. Asistennya, Johannes Kepler, menghabiskan bertahun-tahun mencocokkan data Mars dengan orbit lingkaran, tetapi selalu meleset ± 8 menit busur. Kepler tidak menyerah dan tidak memaksa datanya. Ia justru membuang gagasan orbit lingkaran yang sudah dipercaya selama 2.000 tahun. Hasilnya: tiga hukum gerak planet (1609 dan 1619), yang hampir 70 tahun kemudian dijelaskan Newton dengan hukum gravitasi.

1. **Hukum I (orbit elips):** setiap planet bergerak dalam orbit berbentuk **elips**, dengan Matahari berada di salah satu titik fokusnya.
2. **Hukum II (luas sama):** garis yang menghubungkan planet dan Matahari menyapu **luas yang sama dalam selang waktu yang sama**. Akibatnya planet bergerak paling cepat di titik terdekat (*perihelion*) dan paling lambat di titik terjauh (*aphelion*).
3. **Hukum III (harmoni):** kuadrat periode sebanding dengan pangkat tiga setengah sumbu panjang orbit:

$$T^2 \propto a^3.$$



Periode T

1,31 tahun

Laju planet

21,3 km/s

Jarak ke Matahari

1,49 SA

Luas juring terakhir

0,3016 SA^2

Tekan **Jalankan**. Setiap juring berwarna disapu dalam waktu yang sama (1/12 periode). Bandingkan bentuk juring di dekat Matahari (pendek-gemuk) dan di jauh (panjang-kurus). Luasnya? Lalu ubah a dan lihat bagaimana periode berubah.

Planet	a (SA)	T (tahun)	a^3	T^2
Merkurius	0,387	0,241	0,058	0,058
Venus	0,723	0,615	0,378	0,378
Bumi	1,000	1,000	1,000	1,000
Mars	1,524	1,881	3,54	3,54
Jupiter	5,203	11,86	140,9	140,7
Saturnus	9,537	29,46	867	868

Lihat dua kolom terakhir: hampir kembar! Jika a diukur dalam satuan astronomi (SA, jarak rata-rata Bumi-Matahari, ± 150 juta km) dan T dalam tahun, maka untuk semua planet di tata surya berlaku $T^2 = a^3$. Newton

kemudian membuktikan bahwa tetapannya adalah $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_{\text{Matahari}}}$. Artinya, dari periode dan jarak satu planet saja, kita bisa **menimbang Matahari!**



TRIK KAK NARA: KEPLER II = PENARI BALI

Ingat penari yang berputar makin cepat saat merapatkan tangannya (Bab 10)? Planet juga begitu. Saat dekat Matahari, "lengannya" pendek, jadi ia berputar lebih cepat. Saat jauh, ia melambat. Hukum II Kepler sebenarnya adalah kekekalan momentum sudut.

11.7 "Tanpa bobot" di ISS: jatuh bebas tanpa henti

Ingat timbangan di dalam lift pada Bab 6? Angka timbangan adalah gaya normal $N = m(g + a)$. Jika lift jatuh bebas, $a = -g$, sehingga $N = 0$. Kamu melayang, padahal gravitasi masih bekerja penuh!

Di ISS terjadi hal yang persis sama. Stasiun, astronot, sendok, dan tetesan air semuanya jatuh mengelilingi Bumi dengan percepatan yang sama. Tidak ada yang menekan lantai, jadi semuanya melayang. Keadaan ini disebut **tanpa bobot** (lebih tepatnya, *tanpa bobot semu*), bukan tanpa gravitasi.

Bahasa sederhana • Gampangnya: astronot melayang bukan karena gravitasinya hilang, melainkan karena mereka **sedang jatuh bersama-sama** dengan stasiunnya. Rasanya seperti detik pertama saat kamu terjun dari papan loncat kolam renang.



Antena parabola

Diarahkan sekali ke satelit geostasioner lalu dikunci, karena satelitnya tampak diam di langit.



Peta di ponsel

Navigasi ojek online memakai sinyal beberapa satelit di orbit menengah (± 20.000 km) untuk menentukan posisimu.



Pasang surut laut

Gravitasi Bulan menarik sisi Bumi yang dekat lebih kuat daripada sisi jauh. Selisih tarikan ini membuat laut pasang, dan nelayan memakai jadwalnya.



Prakiraan cuaca

Citra awan yang dipakai BMKG datang dari satelit cuaca geostasioner yang terus "menatap" wilayah Indonesia.



Astronot bertambah tinggi

Tanpa tekanan bobot, tulang belakang astronot sedikit merenggang. Tinggi badan mereka bisa bertambah beberapa sentimeter selama di orbit.

MITOS

"Di luar angkasa tidak ada gravitasi."

MITOS

"Astronot melayang karena di orbit tidak ada udara."

FAKTA

Gravitasi menjangkau tanpa batas, hanya melemah dengan jarak. Di ISS masih $\pm 89\%$. Bulan mengelilingi Bumi dan Bumi mengelilingi Matahari justru

karena gravitasi.

FAKTA

Udara tidak ada hubungannya. Astronot melayang karena ia dan stasiunnya jatuh bebas bersama. Di wahana menara jatuh bebas di Bumi pun kamu melayang sesaat, padahal udaranya ada.

COBA SENDIRI Menimbang Bumi dengan Bulan

Bulan mengorbit Bumi pada jarak rata-rata $3,84 \times 10^8$ m dengan periode 27,3 hari. Perkirakan massa Bumi. ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$)

- 1 Dari $T^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{GM}$, maka $M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$.
- 2 $T = 27,3 \times 86.400 = 2,359 \times 10^6$ s, sehingga $T^2 = 5,564 \times 10^{12} \text{ s}^2$.
- 3 $r^3 = (3,84 \times 10^8)^3 = 5,662 \times 10^{25} \text{ m}^3$.
- 4 $M = \frac{39,48 \times 5,662 \times 10^{25}}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,564 \times 10^{12}} \approx 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$.

Sekitar 6×10^{24} kg, sangat dekat dengan nilai resmi $5,97 \times 10^{24}$ kg. Kita baru saja menimbang planet tanpa timbangan!

Cek Cepat

Jika jarak antara dua benda dijadikan 3 kali semula, gaya gravitasi di antara keduanya menjadi...

3 kali semula

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

9 kali semula

$\frac{1}{9}$ kali semula

Kecepatan sebuah satelit dalam orbit lingkaran bergantung pada...

massa Bumi dan jari-jari orbit

massa satelit dan ketinggiannya

bentuk dan ukuran satelit

kekuatan mesin satelit

Astronot di ISS melayang karena...

gravitasi Bumi di sana nol

gaya tarik Bulan mengimbangi gravitasi Bumi

astronot dan stasiun sama-sama jatuh bebas mengelilingi Bumi

udara di dalam ISS mendorong astronot ke atas

Kunci Cek Cepat: 1. D • 2. A • 3. C

Tantangan Rumah: orbit dari sedotan

Bahan: badan pulpen bekas atau sedotan keras, benang ± 1 m, penghapus atau tutup botol, 4–8 jepit kertas

1. Ikat penghapus di satu ujung benang. Masukkan benang melewati badan pulpen, lalu ikat 4 jepit kertas di ujung bawahnya.
2. Pegang pulpen tegak, lalu putar penghapus dalam lingkaran mendatar di atas kepala sampai jepit kertas melayang diam. Lakukan di luar ruangan dan jauhkan dari wajah teman!
3. Tarik ujung bawah benang sedikit sehingga lingkarannya mengecil. Amati kecepatan penghapus.
4. Tambah jepit kertas menjadi 8. Seberapa cepat penghapus harus diputar agar jari-jari lingkarannya tetap sama?

Pertanyaan: Jepit kertas berperan seperti gravitasi Bumi, dan penghapus seperti satelit. Mengapa penghapus makin cepat saat lingkarannya mengecil (hubungkan dengan Hukum II Kepler)? Mengapa "gravitasi" yang lebih kuat membutuhkan kecepatan orbit yang lebih besar?

RINGKASAN KILAT **Bab 11 dalam 3 menit**

Kamu sekarang bisa...

- menghitung gaya tarik antara dua benda dengan **hukum gravitasi Newton** dan menjelaskan arti "kuadrat terbalik"
- menjelaskan mengapa nilai g berbeda di khatulistiwa, di puncak gunung, di orbit, dan di planet lain
- menghitung **kecepatan orbit**, **periode satelit**, dan **kecepatan lepas**
- menjelaskan orbit **geostasioner** dan mengapa letak Indonesia di khatulistiwa sangat istimewa
- memakai tiga **hukum Kepler** dan menjelaskan mengapa astronot di ISS melayang

Istilah kunci

tetapan gravitasi umum

medan gravitasi

sumur gravitasi

kecepatan lepas

orbit geostasioner

elips

tanpa bobot

Rumus penting

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Hukum gravitasi Newton. Gaya tarik = $G \times$ massa pertama $\times$ massa kedua, dibagi kuadrat jarak pusat ke pusat. Jarak dijadikan dua kali, gayanya tinggal seperempat!

$$g_h = g_0 \left(\frac{R}{R + h} \right)^2$$

Percepatan gravitasi di ketinggian h . Makin tinggi, makin lemah tarikan Bumi. Tetapi turunnya pelan: di ketinggian ISS masih tersisa hampir 90%.

$$v_{\text{lepas}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Kecepatan lepas dari permukaan planet.

Kecepatan minimum agar benda lolos dari tarikan planet selamanya. Massa benda yang dilempar tidak berpengaruh!

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}$$

Kecepatan orbit satelit Bumi. Makin rendah orbitnya, makin kencang satelit harus melaju. Massa satelit tidak berpengaruh sama sekali.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}}$$

Periode satelit (berapa jam sekali putar). Makin tinggi orbitnya, makin lama satu putaran: jalannya lebih jauh DAN lajunya lebih pelan.

⚠ Jangan sampai terjebak

- Dalam $F = Gm_1m_2/r^2$, jarak r diukur dari pusat ke pusat, bukan dari permukaan.
- "Satelit yang lebih berat harus terbang lebih cepat." Salah!

 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=11

Teka-teki untuk Bab 12

Bayangkan terowongan lurus dari Pontianak menembus pusat Bumi sampai ke hutan Amazon di sisi lain. Udara dan gesekan diabaikan. Raka menjatuhkan bola ke dalamnya. Bola melesat ke pusat Bumi, melewatinya, lalu... muncul di Amerika Selatan, jatuh kembali, dan bolak-balik selamanya! Berapa lama satu kali perjalanan? Dan mengapa gerak bola ini mirip beban yang tergantung di pegas?

▼ Intip petunjuk

Ingat kotak "Lanjut" di subbab 11.2: di dalam Bumi, $g(r) = g_0 r/R$. Gaya pada bola sebanding dengan jaraknya dari pusat dan selalu mengarah ke pusat, persis seperti gaya pegas $F = -kx$. Gerak seperti ini disebut **getaran harmonik**. Jawabannya (sekitar 42 menit sekali jalan!) ada di Bab 12.

12 Elastisitas & Getaran: Pegas, Ayunan, dan Jembatan yang Menari

Kenapa ketapel bisa melontarkan kerikil, jok motor tidak membuatmu terpelantai, dan jembatan gantung bisa bergoyang hebat hanya karena langkah kaki? Semuanya soal benda yang "ingin kembali" ke bentuk dan posisi semula.

Setelah bab ini, kamu bisa

- memakai **hukum Hooke** $F = kx$ dan menghitung konstanta pegas, termasuk susunan **seri** dan **paralel**;
- membedakan **tegangan**, **regangan**, dan **modulus Young**, serta membaca kurva tegangan-regangan sampai bahan patah;
- mengenali **getaran harmonik sederhana** dan menghitung periode pegas-beban serta bandul;
- menjelaskan perpindahan energi kinetik dan potensial selama benda bergetar;
- menjelaskan **redaman** dan **resonansi** pada shock absorber, ayunan, jembatan, dan gedung.

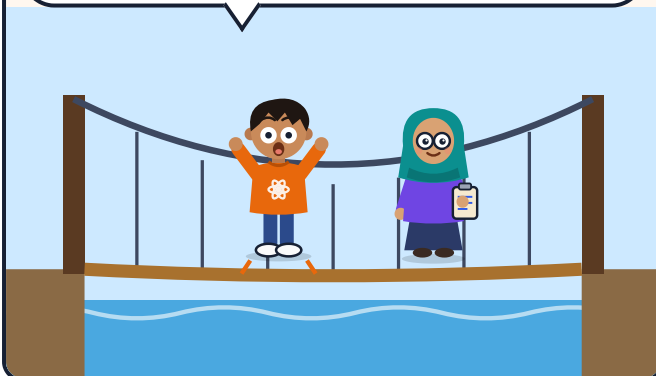
JEMBATAN GANTUNG YANG MENARI

KOMIK • 4 PANEL

Jembatan gantung desa, Sabtu sore

RAKA

Ayo lompat bareng, Sar! Satu, dua! Satu, dua!

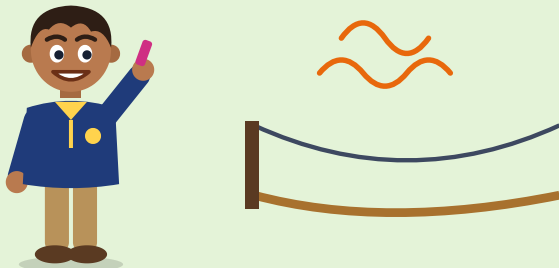
**SARI**

Rak, STOP! Goyangannya makin besar, padahal lompatanmu biasa aja!

GOYANG!

KAK NARA

Lompatan kalian pas seirama dengan ayunan alami jembatan. Dorongan kecil yang seirama terus menumpuk jadi goyangan besar. Namanya **resonansi**!

**Fakta unik dari Tarsi****TARSI**

Tahun 2000, jembatan baru di London ditutup dua hari setelah dibuka. Langkah ribuan pejalan kaki membuatnya bergoyang!

RAKA

Jadi jangan melompat seirama jembatan... dicatat!



**JANGAN
LOMPAT
BERSAMAAN**

**Tebak Dulu!**

Raka (50 kg) dan adiknya (25 kg) bergantian duduk di ayunan taman yang sama, dengan posisi duduk yang sama dan simpangan kecil. Siapa yang ayunannya bolak-balik lebih lambat (periodenya lebih lama)?

Raka, karena lebih berat sehingga lebih "malas" bergerak.

Adiknya, karena lebih ringan sehingga mudah "melayang".

Sama saja.

Tergantung seberapa kuat ayunan itu didorong.

Jawabannya: sama! Benda yang lebih berat memang lebih sulit digerakkan (massanya besar), tetapi ditarik gravitasi lebih kuat (beratnya besar). Kedua efek ini saling menghapus, persis seperti batu dan kelereng yang jatuh bersamaan. Periode ayunan hanya bergantung pada panjang tali dan nilai g : $T = 2\pi\sqrt{L/g}$. Kita buktikan di subbab 12.5.

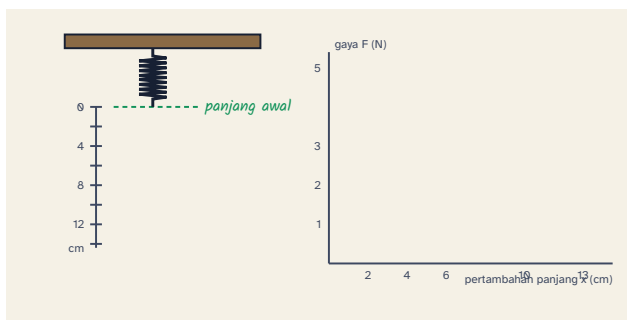
Hukum Hooke: pegas yang "ingin pulang"

Tarik karet ketapel, lalu lepaskan: karet kembali ke bentuk semula. Tekan jok motor, lalu lepaskan: jok mengembang lagi. Sifat benda yang kembali ke bentuk semula setelah gaya dihilangkan disebut **elastis**. Sebaliknya, plastisin (lilin mainan) yang ditekan tetap penyok. Itu sifat **plastis**.

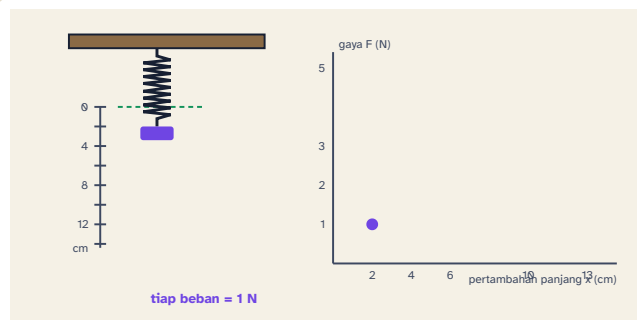
Benda elastis seperti anak kecil yang ditarik tangannya oleh kakaknya: makin jauh ia ditarik dari tempatnya, makin kuat ia menarik balik. Pada pegas, gaya pemulih itu **sebanding** dengan pertambahan panjangnya. Robert Hooke merumuskannya tahun 1678:

Hukum Hooke. Selama batas elastis tidak dilampaui, gaya yang diperlukan untuk meregangkan pegas sebanding dengan pertambahan panjangnya: $F = kx$.

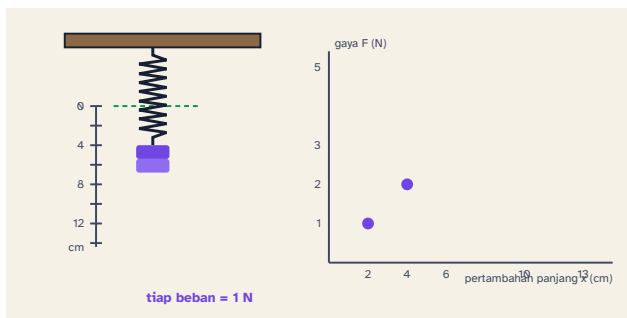
Bahasa sederhana • Gampangnya: tarik pegas 1 cm butuh gaya tertentu. Tarik 2 cm, butuh gaya dua kali. Tarik 3 cm, tiga kali. Tetapi kalau ditarik terlalu jauh, pegas rusak dan tidak bisa kembali lagi.



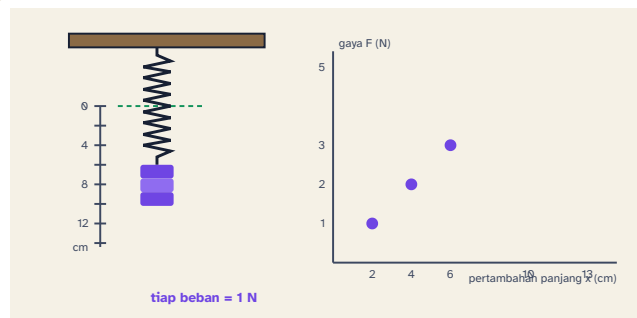
Langkah 1. Sebuah pegas tergantung bebas. Kita tandai panjang awalnya dengan garis hijau.



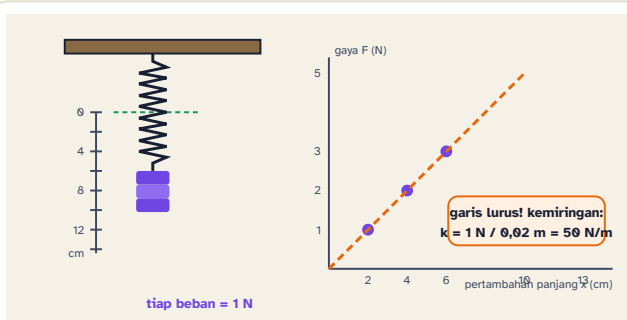
Langkah 2. Gantung satu beban (1 N). Pegas bertambah panjang 2 cm. Catat titiknya di grafik.



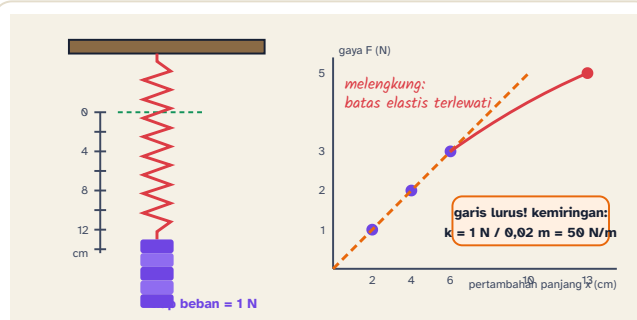
Langkah 3. Dua beban (2 N); pertambahan panjang 4 cm. Dua kali gaya, dua kali regangan.



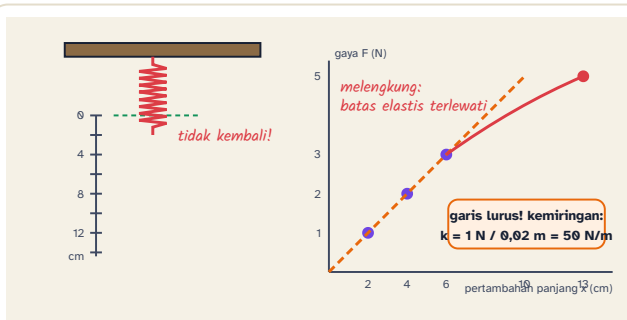
Langkah 4. Tiga beban (3 N); 6 cm. Pola yang sama!



Langkah 5. Titik-titiknya membentuk garis lurus melalui titik asal. Kemiringannya adalah **konstanta pegas** $k = F/x = 1 \text{ N} / 0,02 \text{ m} = 50 \text{ N/m}$. Makin besar k , makin kaku pegasnya.



Langkah 6. Lima beban (5 N); seharusnya 10 cm, tetapi pegas memanjang 13 cm. Grafiknya melengkung karena **batas elastis** sudah terlewat.



Langkah 7. Semua beban dilepas; pegas tidak kembali ke panjang awal, masih 2 cm lebih panjang. Pegas sudah mengalami **deformasi plastis**.

$$F = kx$$

Gaya pegas = konstanta pegas $\times$ pertambahan panjang. Tarik dua kali lebih jauh, pegas melawan dua kali lebih kuat.

 k

Konstanta pegas N/m

 x

Pertambahan panjang cm

 F

Gaya pegas N

GAYA PEGAS

10

N

Pegas dengan $k = 200$ N/m yang ditarik 5 cm melawan dengan gaya 10 N.

Satuan Nusantara: $\approx 10 \times$ berat apel kecil (± 100 g) $\cdot \approx 4\%$ dari berat karung beras 25 kg $\cdot \approx 2\%$ dari berat orang 50 kg

Cek satuan: $\text{N/m} \times \text{m} = \text{N}$. Ubah cm ke m dulu: bagi 100.

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



AWAS JEBAKAN

Dalam $F = kx$, x adalah **pertambahan panjang**, bukan panjang pegas. Pegas 20 cm yang ditarik menjadi 25 cm memiliki $x = 5$ cm. Ingat juga satuannya: jika k dalam N/m, x harus dalam meter.



TAMU DARI MASA LALU

Robert Hooke (1635–1703) takut idenya dicuri. Tahun 1676 ia hanya menerbitkan teka-teki huruf acak: *ceiinoosssttuv*. Dua tahun kemudian ia membuka rahasianya. Huruf-huruf itu adalah susunan acak kalimat Latin *ut tensio, sic vis*, artinya "sebagaimana regangannya, begitulah gayanya".

12.2

Tegangan, regangan, dan modulus Young

Konstanta pegas k bergantung pada bentuk benda. Kawat baja tipis lebih mudah meregang daripada batang baja tebal, walaupun bahannya sama. Untuk membandingkan **bahan**, fisikawan memakai tiga besaran:

- **Tegangan** (stress) $\sigma = \frac{F}{A}$: gaya per luas penampang. Satuannya Pa (N/m^2). Tali rafia dan tambang kapal yang ditarik gaya sama mengalami tegangan sangat berbeda.

- **Regangan** (strain) $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$: pertambahan panjang dibagi panjang awal. Tidak bersatuan, sering ditulis dalam persen.
- **Modulus Young** $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{FL_0}{A \Delta L}$: ukuran kekakuan bahan. Makin besar E , makin sulit bahan diregangkan.

RUMUS HIDUP Pertambahan panjang kawat atau batang

$$\Delta L = \frac{F L_0}{\frac{\pi}{4} d^2 E}$$

Kawat makin panjang dan gaya makin besar → makin melar. Kawat makin tebal dan bahan makin kaku → makin sedikit melar.

F Gaya tarik N

L_0 Panjang awal m

d Diameter kawat ($A = \pi d^2/4$) mm

E Modulus Young GPa

ΔL Pertambahan panjang mm

PERTAMBAHAN PANJANG

0,637

mm

Batang sepanjang **2 m** berdiameter **10 mm** (modulus **200 GPa**) yang ditarik **5.000 N** bertambah panjang **0,637 mm**.

Cek satuan: $\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{N}/\text{m}^2} = \text{m}$, lalu dikali 1000 menjadi mm. (1 GPa = 10^9 Pa.)

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

Bahan	Modulus Young E (GPa)	Kuat tarik (MPa, perkiraan)	Sifat saat patah
Baja (besi beton)	200	400–600	ulet: meleleh dan "berleher" dulu
Aluminium paduan	70	±300	ulet

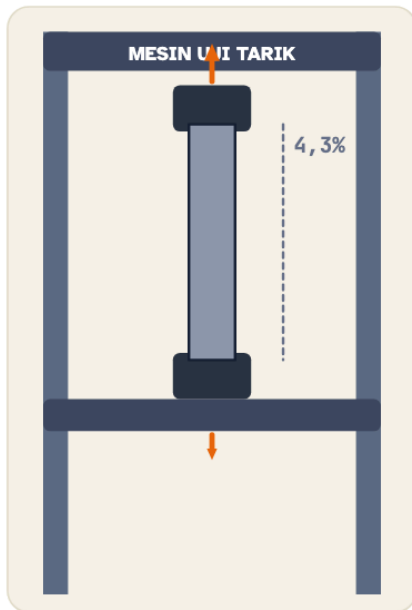
Tembaga	± 120	± 220	sangat ulet (mudah dibentuk kabel)
Serat bambu (arah memanjang)	$\pm 10-20$	$\pm 100-300$	cukup getas, berserat
Kayu jati (searah serat)	$\pm 10-13$	± 100	getas
Beton	$\pm 20-30$	$\pm 2-5$ (kuat ditekan, lemah ditarik!)	getas
Kaca	± 70	$\pm 30-100$	getas: patah tanpa peringatan
Karet	$\pm 0,01-0,1$	$\pm 15-25$	sangat melar (sampai ratusan persen)

Kurva tegangan–regangan: "biografi" sebuah bahan

Jika sebatang bahan ditarik pelan-pelan sampai putus sambil dicatat tegangan dan regangannya, kita mendapat kurva tegangan–regangan. Untuk baja, kurvanya punya beberapa daerah: (1) **daerah elastis** yang lurus (hukum Hooke, kemiringannya E); (2) **titik luluh**, saat baja mulai "mengalir" dan tidak bisa kembali sepenuhnya; (3) **daerah plastis**, ketika baja makin kuat sambil memanjang; (4) **kuat tarik maksimum**; (5) **penciutan leher** (*necking*); dan (6) **titik patah**.

LAB MINI Mesin uji tarik: tarik sampai putus!

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-12



Tegangan σ

306,4 MPa

Regangan ϵ

4,286 %

Gaya tarik

15,32 kN

Keadaan

Plastis: tak kembali penuh

Regangan permanen

4,133 %

Pilih bahan, lalu tekan **Jalankan** untuk menarik. Tekan **Lepas beban** di tengah jalan: apakah bahan kembali ke panjang awal? Coba sekali di daerah elastis dan sekali setelah titik luluh. Nyalakan **Perbesar daerah elastis** untuk melihat garis hukum Hooke.

KERJAKAN BERSAMA Besi beton yang ditarik

Besi beton berdiameter 10 mm dan panjang 3 m ditarik gaya 10 kN. Modulus Young baja 200 GPa. Hitung tegangan dan pertambahan panjangnya.

- 1 Luas penampang: $A = \frac{\pi}{4}d^2 = \frac{\pi}{4}(0,010)^2 = 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$.
- 2 Tegangan: $\sigma = F/A = 10.000/7,85 \times 10^{-5} \approx 1,27 \times 10^8 \text{ Pa} = 127 \text{ MPa}$.
- 3 Regangan: $\epsilon = \sigma/E = 1,27 \times 10^8 / 2 \times 10^{11} = 6,4 \times 10^{-4}$.
- 4 Pertambahan panjang: $\Delta L = \epsilon L_0 = 6,4 \times 10^{-4} \times 3 \approx 1,9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Besi memanjang hanya $\pm 1,9 \text{ mm}$, dan tegangannya (127 MPa) masih di bawah titik luluh besi beton ($\pm 240\text{--}420 \text{ MPa}$). Besi itu aman dan akan kembali ke panjang semula.



FISIKA INDONESIA

Orang Indonesia sering menyebut pegas sebagai "per", dari bahasa Belanda *veer*. Nenek moyang kita juga sudah lama memakai bahan elastis yang hebat: **bambu**. Serat bambu kuat menahan tarikan, ringan, dan lentur. Rumah dan jembatan bambu bisa melentur saat gempa lalu kembali, alih-alih retak seperti dinding bata tanpa tulangan. Karena itu bambu kini diteliti lagi sebagai bahan bangunan tahan gempa dan ramah lingkungan, termasuk oleh perguruan tinggi di Indonesia.

MITOS

"Bahan elastis artinya bahan yang mudah melar, seperti karet."

MITOS

"Besi tidak bisa memanjang."

FAKTA

Dalam fisika, elastis berarti **bisa kembali ke bentuk semula**. Baja sangat elastis pada beban sedang, tetapi sulit melar karena modulus Young-nya ribuan kali modulus karet.

FAKTA

Semua bahan memanjang saat ditarik, hanya sedikit sekali. Kabel baja lift setinggi 100 m bisa memanjang beberapa sentimeter saat lift penuh penumpang.



LANJUT • IB & OLIMPIADE

ENERGI DALAM KAWAT DAN TEGANGAN TERMAL

Usaha untuk meregangkan kawat sama dengan luas di bawah grafik F - x : $W = \frac{1}{2}F \Delta L = \frac{1}{2}k(\Delta L)^2$. Dibagi volume AL_0 , energi per volume adalah $\frac{1}{2}\sigma\epsilon$. Jika batang dijepit di kedua ujung lalu dipanaskan sebesar ΔT , ia "ingin" memuai sebesar $\alpha L_0 \Delta T$ tetapi ditahan. Muncullah **tegangan termal** $\sigma = E\alpha\Delta T$. Untuk rel baja ($\alpha = 1,2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$) yang suhunya naik 25°C , tegangannya 60 MPa! Itulah sebabnya rel diberi celah atau dipasang dengan perhitungan khusus. Saat ditarik, kawat juga sedikit mengecil diameternya; perbandingan regangan melintang terhadap regangan memanjang disebut **rasio Poisson** ($\pm 0,3$ untuk baja, $\pm 0,5$ untuk karet).

12.3

Susunan pegas: seri dan paralel

Motor bebek punya **dua** shock absorber di roda belakang, berdampingan. Kasur per berisi ratusan pegas berdiri berjajar. Bagaimana menghitung kekakuan gabungannya?

Susunan	Yang sama	Yang dijumlahkan	Konstanta pengganti	Efek
Paralel (berdampingan)	pertambahan panjang x	gaya: $F = F_1 + F_2$	$k_p = k_1 + k_2$	lebih kaku

Seri (disambung
memanjang)

gaya F di tiap
pegas

pertambahan panjang:
 $x = x_1 + x_2$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

lebih
lembek



TRIK KAK NARA: "BERDIRI BAHU-MEMBAHU" VS "BERGANDENGAN MEMANJANG"

Paralel itu seperti teman-teman yang mengangkat meja **bersama-sama**: bebannya terbagi, jadi terasa lebih kuat (lebih kaku). Seri itu seperti **menyambung** dua karet gelang: setiap karet menahan tarikan penuh, sehingga totalnya melar lebih banyak (lebih lembek). Untuk dua pegas identik k : paralel $\rightarrow 2k$, seri $\rightarrow k/2$.



Tebak Dulu!

Sebuah pegas dengan konstanta k dipotong menjadi dua bagian yang sama panjang. Berapa konstanta pegas masing-masing potongan?

$k/2$, karena pegasnya tinggal setengah.

Tetap k , karena bahannya sama.

$2k$, jadi lebih kaku.

$4k$, karena panjangnya dikuadratkan.

Jawabannya: $2k$. Pegas utuh sebenarnya adalah dua setengah-pegas yang disusun **seri**. Jika tiap potongan berkonstanta k' , maka $1/k = 1/k' + 1/k'$, sehingga $k' = 2k$. Masuk akal: dengan gaya yang sama, tiap potongan hanya meregang setengah dari pegas utuh. Pegas yang lebih pendek selalu lebih kaku.

Roda belakang motor ditopang dua shock absorber yang dipasang paralel, masing-masing $k = 15.000 \text{ N/m}$. Saat Kak Nara (60 kg) duduk, anggap seluruh beratnya ditahan roda belakang ($g = 10 \text{ m/s}^2$). Berapa sentimeter jok turun?

1 Susunan paralel: $k_p = 15.000 + 15.000 = 30.000 \text{ N/m}$.

2 Gaya: $F = mg = 60 \times 10 = 600 \text{ N}$.

3 $x = F/k_p = 600/30.000 = 0,02 \text{ m} = 2 \text{ cm}$.

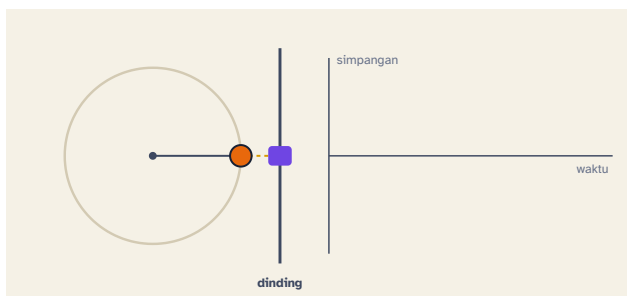
Jok turun $\pm 2 \text{ cm}$. Kalau hanya ada satu shock absorber, turunnya 4 cm. Karena itu motor yang sering membawa beban berat memakai per yang lebih kaku.

12.4 Getaran harmonik sederhana (GHS)

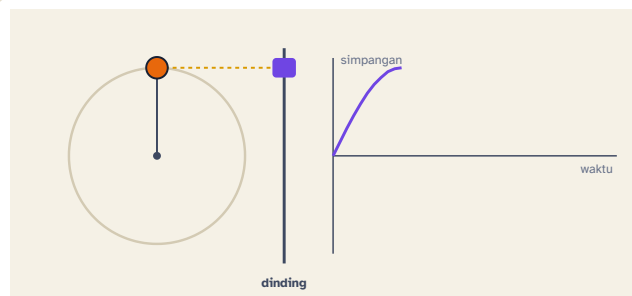
Tarik beban di ujung pegas, lalu lepaskan. Beban bergerak bolak-balik melewati titik setimbang. Gaya pegas $F = -kx$ selalu mengarah ke titik setimbang (tanda minus) dan makin besar jika simpangannya makin jauh. Gerak bolak-balik dengan gaya pemulih yang **sebanding dengan simpangan** ini disebut **getaran harmonik sederhana** (GHS).

- **Simpangan** x : jarak dari titik setimbang (bisa positif atau negatif).
- **Amplitudo** A : simpangan terbesar.
- **Periode** T : waktu satu getaran penuh (s). **Frekuensi** $f = 1/T$: banyak getaran per sekon (hertz, Hz).
- **Frekuensi sudut** $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ (rad/s).

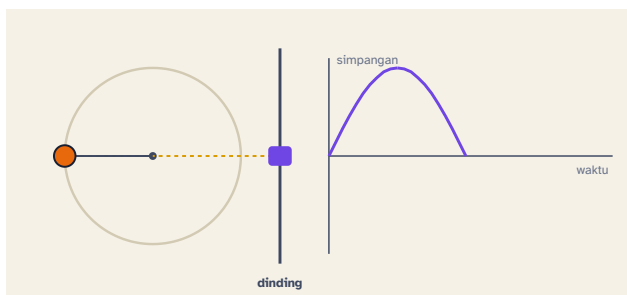
Ada cara cantik melihat GHS: perhatikan **bayangan** sebuah bola yang bergerak melingkar beraturan.



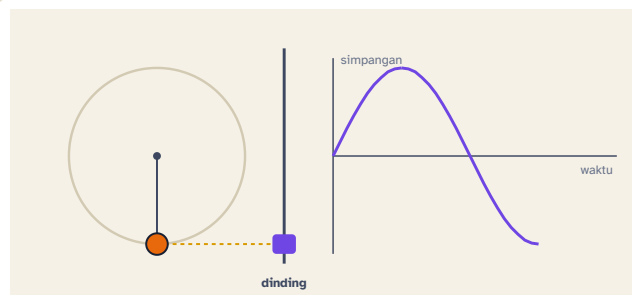
Langkah 1. Sebuah bola (oranye) bergerak melingkar dengan laju tetap. Cahaya dari samping membuat bayangannya (ungu) jatuh di dinding.



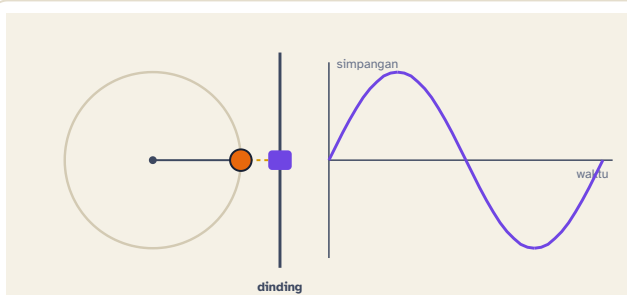
Langkah 2. Bola berputar seperempat lingkaran. Bayangannya naik ke posisi tertinggi, sejauh jari-jari lingkaran: itulah amplitudo A .



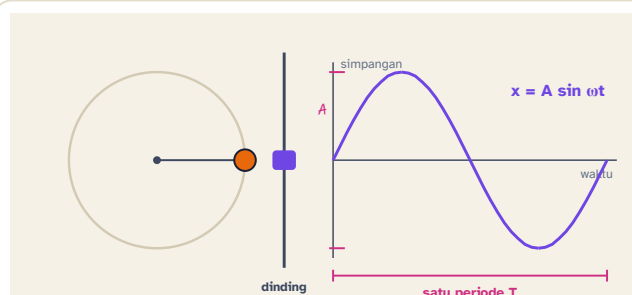
Langkah 3. Setengah putaran: bayangan kembali ke tengah, kini sambil bergerak turun.



Langkah 4. Tiga perempat putaran: bayangan di posisi terendah, $-A$.



Langkah 5. Satu putaran penuh: bayangan kembali ke tengah. Jika posisinya dicatat terhadap waktu, terbentuk kurva sinus.



Langkah 6. Bayangan itu bergerak persis seperti beban di ujung pegas! Simpangannya $x = A \sin \omega t$, dengan ω adalah laju sudut bola. Satu putaran = satu periode getaran.

Posisi	Simpangan	Kecepatan	Percepatan (dan gaya)
Titik setimbang	0	maksimum: $v_{\text{maks}} = \omega A$	nol
Ujung simpangan	$\pm A$	nol (sesaat berhenti)	maksimum: $a_{\text{maks}} = \omega^2 A$, menuju titik setimbang



AWAS JEBAKAN

Di ujung simpangan beban berhenti sesaat, tetapi percepatannya justru **paling besar**, sama seperti bola di puncak lemparan (Bab 4). Di titik setimbang beban paling cepat, tetapi percepatannya **nol**. Kecepatan nol tidak berarti percepatan nol!

12.5 Periode pegas dan bandul

Dari Hukum II Newton, $ma = -kx$, sehingga $a = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x$. Jadi $\omega = \sqrt{k/m}$, dan periodenya:

RUMUS HIDUP Periode sistem pegas-beban

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Beban berat bergetar lambat, pegas kaku bergetar cepat. Amplitudo sama sekali tidak berpengaruh!

m Massa beban kg

k Konstanta pegas N/m

T Periode s

PERIODE

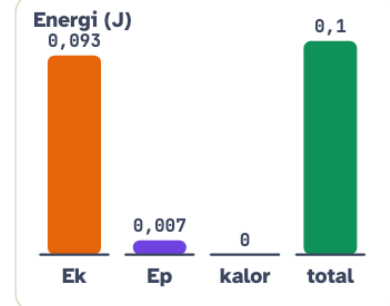
0,993

s

Beban **0,5** kg pada pegas **20** N/m bergetar dengan periode **0,993** s. Coba jadikan massanya 4 kali: periodenya menjadi berapa kali?

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

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



k pengganti
20 N/m

T rumus
0,993 s

T terukur
—

Simpangan
2,6 cm

Jenis redaman
tanpa redaman

Seret balok ke kanan atau kiri untuk memberi simpangan, lalu lepaskan. Bandingkan periode terukur dengan rumus. Ubah susunan pegas menjadi seri atau paralel. Lalu naikkan **redaman** sedikit demi sedikit sampai balok tidak lagi bolak-balik. Itulah cara kerja shock absorber!



Tebak Dulu!

Balok di ujung pegas ditarik 5 cm lalu dilepas, periodenya 1 s. Jika balok ditarik 10 cm lalu dilepas, periodenya menjadi...

2 s, karena jaraknya dua kali lebih jauh.

Tetap 1 s.

0,5 s, karena gayanya dua kali lebih besar.

1,41 s.

Tetap 1 s. Jaraknya memang dua kali, tetapi gaya pegas juga dua kali, sehingga balok bergerak dua kali lebih cepat. Waktunya sama! Sifat ini disebut *isokron* ("waktu sama"), dan inilah alasan pegas dan bandul dipakai sebagai pengatur waktu jam. Uji sendiri di lab pegas di atas.

Bandul sederhana

Bandul adalah beban kecil di ujung tali ringan. Untuk simpangan kecil (di bawah $\pm 15^\circ$), gaya pemulihnya $-mg \sin \theta \approx -mg x/L$, sebanding dengan simpangan. Jadi bandul juga bergetar harmonik, dengan "konstanta pegas" mg/L . Massa saling coret, dan

RUMUS HIDUP Periode bandul sederhana

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

Tali makin panjang, ayunan makin lambat. Di Bulan yang gravitasinya lemah, ayunan jauh lebih lambat. Massa beban tidak berpengaruh.

L

Panjang tali m

g

Percepatan gravitasi m/s^2

T

Periode s

PERIODE

2,007

s

Bandul sepanjang **1 m** di tempat dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ berayun dengan periode **2,007 s**.

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

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



TRIK KAK NARA: BANDUL SATU METER

Hafalkan satu fakta ini: bandul sepanjang **1 meter** di Bumi berayun dengan periode hampir tepat **2 sekon** (sekali ke kiri 1 s, sekali ke kanan 1 s). Dari sini kamu bisa menebak cepat: tali 4 m $\rightarrow$ periode 2 kali $\rightarrow$ 4 s; tali 25 cm $\rightarrow$ periode setengah $\rightarrow$ 1 s.



TAMU DARI MASA LALU

Konon, sekitar tahun 1583 Galileo muda yang bosan di Katedral Pisa memperhatikan lampu gantung yang berayun. Ia mengukur waktunya dengan denyut nadinya sendiri dan heran: ayunan besar maupun kecil memakan waktu sama! Tahun 1656, Christiaan Huygens memakai sifat ini untuk membuat jam bandul pertama, yang ketepatannya jauh melampaui jam-jam sebelumnya.

CONTOH Frekuensi ayunan

Sari menghitung ayunan bandul: 20 ayunan penuh dalam 30 s. Berapa periode dan frekuensinya?

1 Periode: $T = \frac{\text{waktu}}{\text{jumlah ayunan}} = \frac{30}{20} = 1,5 \text{ s.}$

2 Frekuensi: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,5} \approx 0,67 \text{ Hz.}$

$T = 1,5 \text{ s}$ dan $f \approx 0,67 \text{ Hz}$. Mengukur 20 ayunan sekaligus (bukan satu) membuat galat reaksi stopwatch terbagi 20, sehingga hasilnya jauh lebih teliti.

COBA SENDIRI Jam bandul kakek dibawa ke Bulan

Jam bandul kakek berdetak tepat di Bumi ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$) dengan periode bandul 2,00 s. Jam itu dibawa ke Bulan ($g = 1,62 \text{ m/s}^2$). (a) Berapa periode bandulnya di Bulan? (b) Setelah 1 jam waktu sebenarnya, jam itu menunjukkan berapa menit?

1 $T \propto 1/\sqrt{g}$, jadi $T_{\text{Bulan}} = 2,00 \sqrt{\frac{9,8}{1,62}} = 2,00 \times 2,46 \approx 4,92 \text{ s.}$

2 Dalam 3.600 s sebenarnya, bandul hanya berayun $3600/4,92 \approx 732$ kali.

3 Jam "mengira" setiap ayunan bernilai 2 s, jadi ia menunjukkan $732 \times 2 = 1464 \text{ s} \approx 24,4$ menit.

Periode di Bulan $\pm 4,9 \text{ s}$, dan jam itu sangat terlambat: hanya maju ± 24 menit setiap jam. Jam bandul hanya tepat di tempat yang nilai g -nya sama dengan tempat jam itu disetel.



LANJUT · IB & OLIMPIADE

JAWABAN TEKA-TEKI TEROWONGAN BUMI (DARI BAB 11)

Di dalam Bumi homogen, gaya gravitasi pada bola bermassa m adalah $F = -\frac{mg}{R}r$: bentuknya persis $F = -kx$ dengan $k = mg/R$. Maka bola bergetar harmonik dengan $T = 2\pi\sqrt{R/g} = 2\pi\sqrt{6,37 \times 10^6/9,8} \approx 5,066 \text{ s} \approx 84$ menit. Sekali jalan dari Pontianak ke Amazon butuh setengahnya: **± 42 menit**, dan hasilnya sama untuk terowongan lurus mana pun, bahkan yang tidak melewati pusat! Perhatikan juga: 84 menit adalah periode satelit yang mengorbit tepat di permukaan Bumi. Kebetulan? Tidak: gerak bola di terowongan adalah "bayangan" gerak satelit itu. Contoh GHS lain: **bandul fisis** $T = 2\pi\sqrt{I/(mgd)}$, air dalam pipa U $T = 2\pi\sqrt{L/(2g)}$, dan benda terapung yang ditekan lalu dilepas.

12.6 Energi dalam getaran: bolak-balik antara gerak dan simpanan

Saat pegas teregang maksimum, beban diam sesaat: semua energinya tersimpan sebagai **energi potensial pegas** $\frac{1}{2}kx^2$. Saat melewati titik setimbang, pegas tidak teregang, dan semua energi menjadi **energi kinetik** $\frac{1}{2}mv^2$. Di antaranya, energi terbagi dua, tetapi jumlahnya selalu tetap (tanpa gesekan):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

Bahasa sederhana • Gampangnya: getaran itu seperti menuang air bolak-balik antara dua gelas. Gelas "gerak" dan gelas "simpanan" bergantian penuh, tetapi jumlah airnya tidak berubah.

RUMUS HIDUP Energi total getaran pegas

$$E = \frac{1}{2} k A^2$$

Energi getaran sebanding dengan kuadrat amplitudo. Simpangan dua kali lebih besar berarti energi empat kali!

k Konstanta pegas N/m

A Amplitudo cm

E Energi total J

ENERGI TOTAL

0,5
J

Pegas **100** N/m yang bergetar dengan amplitudo **10** cm menyimpan energi total **0,5** J, yang terus berpindah antara energi kinetik dan potensial.

Cek satuan: $\text{N/m} \times \text{m}^2 = \text{N m} = \text{J}$

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

Pistol mainan memakai pegas $k = 200 \text{ N/m}$ yang ditekan 10 cm untuk melontarkan bola 50 g secara mendatar. Gesekan diabaikan. Berapa kelajuan bola saat lepas?

- 1 Energi pegas: $E = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 200 \times (0,10)^2 = 1,0 \text{ J}$.
- 2 Semuanya menjadi energi kinetik: $\frac{1}{2}mv^2 = 1,0 \rightarrow v^2 = \frac{2 \times 1,0}{0,050} = 40$.
- 3 $v = \sqrt{40} \approx 6,3 \text{ m/s}$.

Bola melesat $\pm 6,3 \text{ m/s}$ ($\pm 23 \text{ km/jam}$). Ini sama dengan $v_{\text{maks}} = \omega A = \sqrt{k/m} A$. Prinsip yang sama bekerja pada ketapel: energi karet yang diregangkan berubah menjadi energi gerak kerikil.



Shock absorber motor

Per menyerap guncangan polisi tidur, lalu peredam oli mencegah motor terus berayun naik-turun.



Kasur per

Ratusan pegas kecil tersusun paralel dan menyebar beban tubuh sehingga tekanan pada punggung merata.



Timbangan gantung pedagang

Pedagang ikan di pasar memakai timbangan pegas: pertambahan panjang pegas sebanding dengan berat ikan (hukum Hooke).



Jam dinding bandul

Ayunan bandul yang isokron menjadi "detak" jam. Sekrup di bawah bandul menggeser beban untuk menyetel kecepatan jam.



Ketapel

Karet yang diregangkan menyimpan energi potensial elastis, lalu mengubahnya menjadi energi kinetik kerikil.

12.7 Redaman dan resonansi

Ayunan di taman yang tidak didorong lama-lama berhenti. Energinya terkikis gesekan udara dan gesekan di engsel. Getaran yang amplitudonya makin kecil disebut **getaran teredam**. Ada tiga jenisnya:

- **Kurang teredam:** masih bolak-balik beberapa kali sambil mengecil (ayunan, senar gitar).

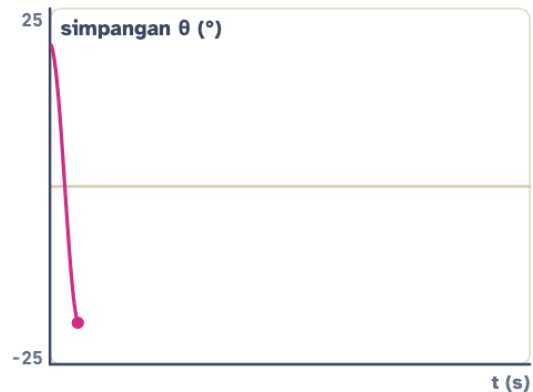
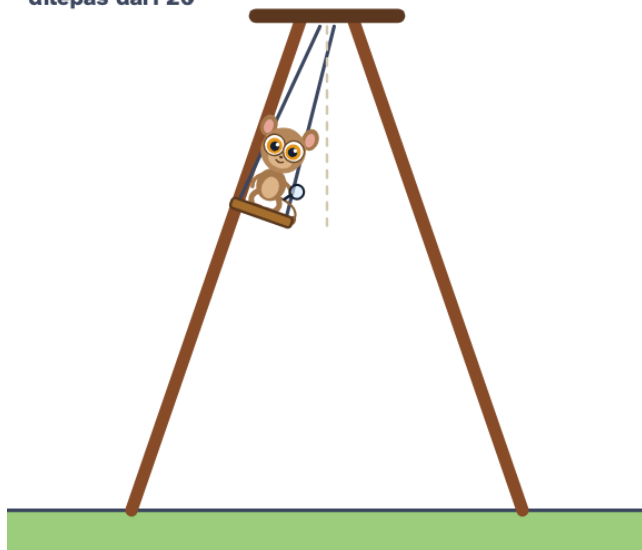
- **Teredam kritis:** kembali ke titik setimbang **secepat mungkin tanpa bolak-balik**. Inilah yang diinginkan pada shock absorber dan penutup pintu otomatis.
- **Terlalu teredam:** kembali sangat pelan, seperti sendok yang ditarik dari madu kental.

Sekarang kebalikannya. Setiap benda yang bisa bergetar punya **frekuensi alami**. Jika benda itu didorong berulang-ulang dengan frekuensi **yang sama** dengan frekuensi alaminya, setiap dorongan datang tepat waktu dan menambah energi. Amplitudonya membesar terus. Peristiwa ini disebut **resonansi**. Kamu memakainya setiap kali mendorong adikmu di ayunan: dorongan kecil, tetapi tepat irama.

LAB MINI Ayunan taman: redaman dan resonansi

LAB MINI INTERAKTIF • COBA SENDIRI DI AURUMGEN.MY.ID/PHYSICSPEDIA#BAB-12

dilepas dari 20°



$$T_{\text{alami}} = 2\pi\sqrt{L/g} = 2,46 \text{ s}$$

$T_{\text{terukur}} = \dots$

Teredam: amplitudo mengecil

T_{alami} (rumus)

2,46 s

T_{terukur}

—

Simpangan

-19,4 °

Amplitudo

20 °

Kadaan

Teredam: amplitudo mengecil

Mode **Ayun bebas**: atur sudut awal dan redaman, lalu bandingkan periode terukur dengan rumus. Mode **Didorong berirama**: Raka mendorong dengan periode tertentu. Samakan periode dorongan dengan periode alami ayunan dan saksikan amplitudonya membesar. Lalu coba periode dorongan yang meleset jauh.



FISIKA INDONESIA

Indonesia berada di Cincin Api, jadi gempa adalah tamu yang pasti datang. Setiap gedung punya frekuensi alami. Sebagai perkiraan kasar, periode alami gedung bertingkat N sekitar $0,1N$ sekon. Jika getaran tanah saat gempa berirama mirip, gedung bisa beresonansi. Insinyur Indonesia memakai berbagai cara: fondasi peredam (*base isolator*) dari karet berlapis baja, dinding geser, dan peredam getaran. Kearifan lokal juga mengenal prinsip ini: rumah adat Nias berdiri di atas tiang-tiang kayu besar dengan tiang silang, dan banyak dilaporkan tetap berdiri saat gempa Nias 2005. Jembatan gantung desa pun dirancang dengan memperhitungkan beban pejalan kaki agar tidak mudah berayun.

MITOS

"Pasukan yang berbaris seirama menyeberang jembatan itu gagah dan aman."

MITOS

"Ayunan yang disimpangkan lebih jauh pasti butuh waktu lebih lama untuk satu ayunan."

FAKTA

Langkah serempak bisa memicu resonansi. Tahun 1831, sebuah jembatan gantung di Inggris runtuh saat dilewati pasukan yang berbaris seirama. Sejak itu, pasukan diperintahkan memecah langkah saat menyeberang jembatan.

FAKTA

Untuk simpangan kecil, waktunya sama (isokron). Jaraknya lebih jauh, tetapi bebannya juga bergerak lebih cepat. Baru pada simpangan sangat besar (di atas $\pm 20^\circ$) periodenya sedikit memanjang.



LANJUT • OLIMPIADE

TACOMA NARROWS: BUKAN RESONANSI BIASA

Jembatan Tacoma Narrows di Amerika Serikat runtuh tahun 1940 diterpa angin yang **tidak berirama** (± 64 km/jam, cukup tetap). Buku lama menyebutnya resonansi, tetapi penjelasan modern adalah **flutter aeroelastik**: gerak puntir jembatan mengubah aliran udara di sekitarnya, dan aliran itu justru mendorong puntiran makin besar. Ini getaran yang "memberi makan dirinya sendiri" (redaman efektifnya negatif). Pelajarannya: jembatan modern diuji dalam terowongan angin. Untuk getaran paksa biasa, persamaannya $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t$; amplitudo tunak $A = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (b\omega/m)^2}}$, yang puncaknya makin tinggi dan tajam jika redaman b makin kecil.

Cek Cepat

Pegas bertambah panjang 2 cm saat ditarik 4 N. Berapa gaya untuk menariknya 6 cm (masih elastis)?

8 N

12 N

24 N

6 N

Panjang tali bandul dijadikan 4 kali semula. Periodenya menjadi...

4 kali semula

setengah kali semula

tetap

2 kali semula

Saat beban pegas melewati titik setimbangnya...

kecepatannya maksimum dan percepatannya nol

kecepatannya nol dan percepatannya maksimum

kecepatan dan percepatannya sama-sama nol

energi potensial pegasnya maksimum

Kunci Cek Cepat: 1. B • 2. D • 3. A



Tantangan Rumah: hukum Hooke dengan karet gelang dan air

Bahan: 1 karet gelang, kantong plastik kecil berpegangan, gelas takar (atau botol air mineral 600 mL dan spidol), penggaris, paku atau gantungan

1. Gantungkan karet gelang pada paku, lalu kaitkan kantong plastik di ujung bawahnya. Ukur panjang karet.
2. Tuang 100 mL air ke kantong (massanya 100 g, beratnya ± 1 N). Ukur pertambahan panjangnya. Ulangi sampai 500 mL.
3. Buat tabel dan grafik gaya (N) terhadap pertambahan panjang (cm). Apakah garisnya lurus seperti pegas logam?
4. Kosongkan kantong. Apakah karet kembali tepat ke panjang awal?

Pertanyaan: Pada beban berapa grafikmu mulai melengkung? Berapa konstanta "pegas" karet gelangmu di daerah yang paling lurus? Mengapa karet gelang tidak sebaik pegas logam untuk timbangan?



RINGKASAN KILAT

Bab 12 dalam 3 menit

✓ Kamu sekarang bisa...

- memakai **hukum Hooke** $F = kx$ dan menghitung konstanta pegas, termasuk susunan **seri** dan **paralel**
- membedakan **tegangan**, **regangan**, dan **modulus Young**, serta membaca kurva tegangan-regangan sampai bahan patah
- mengenali **getaran harmonik sederhana** dan menghitung periode pegas-beban serta bandul
- menjelaskan perpindahan energi kinetik dan potensial selama benda bergetar
- menjelaskan **redaman** dan **resonansi** pada shock absorber, ayunan, jembatan, dan gedung

🔑 Istilah kunci

elastis

plastis

Tegangan

Regangan

Modulus Young

getaran harmonik sederhana

getaran teredam

frekuensi alami

resonansi

📊 Rumus penting

$$F = kx$$

Hukum Hooke. Gaya pegas = konstanta pegas × pertambahan panjang. Tarik dua kali lebih jauh, pegas melawan dua kali lebih kuat.

$$\Delta L = \frac{FL_0}{\frac{\pi}{4}d^2E}$$

Pertambahan panjang kawat atau batang.

Kawat makin panjang dan gaya makin besar → makin melar. Kawat makin tebal dan bahan makin kaku → makin sedikit melar.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Periode sistem pegas-beban. Beban berat bergetar lambat, pegas kaku bergetar cepat. Amplitudo sama sekali tidak berpengaruh!

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

Periode bandul sederhana. Tali makin panjang, ayunan makin lambat. Di Bulan yang gravitasinya lemah, ayunan jauh lebih lambat. Massa beban tidak berpengaruh.

$$E = \frac{1}{2}kA^2$$

Energi total getaran pegas. Energi getaran sebanding dengan kuadrat amplitudo. Simpangan dua kali lebih besar berarti energi empat kali!

⚠ Jangan sampai terjebak

- Dalam $F = kx$, x adalah pertambahan panjang, bukan panjang pegas.
- Di ujung simpangan beban berhenti sesaat, tetapi percepatannya justru paling besar, sama seperti bola di puncak lemparan (Bab 4).

📄 **Tangga Latihan:** 24 soal bab ini (Lv 1 Pemula sampai Lv 6 Olimpiade) ada di PDF Bank Soal dan di aurumgen.my.id/physicspedia#soal?bab=12

Teka-teki untuk Bab 13

Tekan bebek karet di kolam lalu lepaskan: ia naik-turun beberapa kali, seperti beban di ujung pegas. Lalu lihat kapal tanker raksasa dari baja. Baja hampir 8 kali lebih rapat daripada air, tetapi kapal itu mengapung tenang. Gaya apa yang mendorong bebek dan kapal ke atas, dan mengapa gaya itu bisa berperan seperti "pegas" air?

▼ Intip petunjuk

Makin dalam benda tercelup, makin banyak air yang disingkirkannya, dan makin besar dorongan air ke atas. Sebanding dengan kedalaman tambahan, mirip $F = kx$! Gaya ini ditemukan Archimedes lebih dari 2.200 tahun lalu. Kita bongkar di Bab 13: Fluida Statis.