



Physicspedia

LKPD • EDISI GURU

Physicspedia

Fisika Itu Asyik!

35 lembar kerja inkuiri: satu untuk setiap bab, dengan bahan sederhana dan versi virtual, lengkap dengan kunci, contoh data, dan rubrik penilaian.



dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD

Editor: Abdullah Hanif Hidayat

Didukung oleh Aurumgen Academy

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

Tentang LKPD edisi guru

Setiap LKPD mengikuti alur Pembelajaran Mendalam: memahami fenomena, menyelidiki, menganalisis data, menyimpulkan, lalu merefleksi. Kegiatan dirancang untuk kelompok 3–4 orang dengan bahan murah yang mudah dicari. Bila alat tidak tersedia, gunakan versi virtual (Lab Mini) di aurumgen.my.id/physicspedia.

Edisi guru memuat kunci analisis, contoh data hasil percobaan, rubrik penilaian 4 tingkat, dan catatan pelaksanaan.

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

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

Editor: **Abdullah Hanif Hidayat**

Didukung oleh Aurumgen Academy.

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

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

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

Daftar isi

BAGIAN A • FONDASI

1	Kenapa Fisika? Membaca Aturan Main Alam	5
2	Besaran, Satuan & Pengukuran	10
3	Vektor & Matematika Secukupnya	15

BAGIAN B • GERAK & GAYA

4	Gerak Lurus	20
5	Gerak Parabola & Gerak Relatif 2D	25
6	Hukum Newton tentang Gerak	30
7	Gesekan & Gerak Melingkar	34
8	Usaha, Energi & Daya	39
9	Momentum, Impuls & Tumbukan	44
10	Rotasi & Keseimbangan Benda Tegar	49
11	Gravitasi & Satelit	54
12	Elastisitas & Getaran Harmonik	59

BAGIAN C • FLUIDA & PANAS

13	Fluida Statis	64
14	Fluida Dinamis	69
15	Suhu, Kalor & Perpindahan Kalor	74
16	Teori Kinetik Gas	79
17	Termodinamika	85

BAGIAN D • GELOMBANG & CAHAYA

18	Gelombang Mekanik	90
19	Bunyi	96
20	Cermin, Lensa & Alat Optik	101

21	Cahaya sebagai Gelombang	107
----	--------------------------------	-----

BAGIAN E • LISTRIK & MAGNET

22	Listrik Statis & Kapasitor	112
23	Listrik Dinamis	117
24	Medan Magnet	121
25	Induksi Elektromagnetik	126
26	Arus Bolak-balik	131
27	Gelombang Elektromagnetik	136

BAGIAN F • FISIKA MODERN

28	Kuantum: Foton & Gelombang Materi	141
29	Model Atom & Spektrum	146
30	Relativitas Khusus	151
31	Inti Atom & Radioaktivitas	156
32	Elektronika & Gerbang Logika	162

BAGIAN G • FISIKA UNTUK INDONESIA & SEMESTA

33	Fisika Bumi & Bencana	168
34	Energi Terbarukan & Perubahan Iklim	174
35	Astrofisika & Alam Semesta	180

Detektif Bandul Mur: Apa yang Mengatur Irama Ayunan?

Bab 1 · Kenapa Fisika? Membaca Aturan Main Alam

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 7 dan SMA kelas X

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing berbasis metode ilmiah: amati – tanya – berhipotesis – uji – simpulkan

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat merumuskan pertanyaan penyelidikan dan hipotesis yang dapat diuji tentang faktor yang memengaruhi periode bandul.
- Peserta didik dapat membedakan variabel bebas, terikat, dan kontrol, lalu mengubah hanya satu variabel dalam setiap pengujian.
- Peserta didik dapat mengukur periode bandul dengan teliti (mengukur 10 ayunan dan mengulang 3 kali) serta menyajikan data dalam tabel dan grafik.
- Peserta didik dapat menyimpulkan pola $T \propto \sqrt{L}$ dari data dan menjelaskan sumber galat percobaan.

Fenomena



Sore itu Raka dan adiknya bermain ayunan di taman RT. Raka yakin ayunan yang dinaiki orang yang lebih berat pasti bolak-balik lebih lambat. Sari tidak langsung percaya: "Buktinya mana?" Kak Nara tersenyum dan menantang kelompokmu menjadi detektif alam: dengan benang, beberapa mur, dan stopwatch HP, temukan variabel apa yang benar-benar mengatur irama ayunan. Tarsi sudah siap mencatat setiap angka!

Rumusan masalah

Variabel mana (panjang tali atau massa beban) yang memengaruhi periode ayunan bandul, dan bagaimana bentuk hubungan periode T dengan panjang tali L ?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Panjang tali L (Bagian A) dan massa beban, yaitu 1 mur atau 3 mur (Bagian B)	Periode T , yaitu waktu satu ayunan penuh (bolak-balik)	Simpangan awal kecil ($\pm 10^\circ$), jenis benang, dan titik gantung yang sama; beban tetap 1 mur pada Bagian A dan panjang tali tetap 0,60 m pada Bagian B

Alat dan bahan

- Benang jahit atau benang kasur $\pm 1,2$ m
- 3 buah mur besi yang sama (masing-masing ± 10 –15 g) sebagai beban
- Titik gantung: tepi meja yang ditindih tumpukan buku tebal, atau gagang sapu yang diletakkan melintang di antara dua kursi
- Selotip kertas dan gunting
- Meteran jahit atau penggaris 1 m
- Busur derajat untuk memeriksa simpangan awal $\pm 10^\circ$
- Stopwatch di HP
- Kertas milimeter dan alat tulis

Keselamatan

Ikat mur dengan simpul mati agar tidak lepas dan terlempar saat berayun. Jangan mengayunkan bandul ke arah wajah; pengamat berdiri minimal 1 m dari lintasan mur. Pastikan titik gantung kokoh dan buku penindih tidak mudah jatuh. Jangan naik ke atas kursi atau meja untuk memasang benang.

Langkah kerja

1. Ikat satu mur di ujung benang dengan simpul mati. Rekatkan ujung benang yang lain pada titik gantung dengan selotip, lalu pastikan benang tidak bergeser saat ditarik pelan.
2. Atur panjang tali $L = 0,20$ m, diukur dari titik gantung sampai **tengah** mur.
3. Simpangkan mur sekitar 10° (periksa dengan busur derajat), lalu lepaskan tanpa didorong.
4. Mulai stopwatch saat mur melewati titik terendah sambil menyebut "nol". Hentikan setelah 10 ayunan penuh (bolak-balik). Catat sebagai t_1 , lalu ulangi untuk mendapat t_2 dan t_3 .
5. **Bagian A:** ulangi langkah 3–4 untuk $L = 0,40$; $0,60$; $0,80$; dan $1,00$ m dengan beban tetap 1 mur.
6. **Bagian B:** atur kembali $L = 0,60$ m, lalu ganti beban dengan 3 mur yang diikat menjadi satu. Pastikan jarak titik gantung ke tengah tumpukan mur tetap $0,60$ m, kemudian ukur seperti langkah 3–4.
7. Hitung t rata-rata, periode $T = t_{\text{rata-rata}}/10$, dan T^2 untuk setiap baris.
8. Gambar grafik T terhadap L , lalu grafik T^2 terhadap L untuk data Bagian A di kertas milimeter.

Tabel pengamatan (simpangan awal $\pm 10^\circ$)

Percobaan	L (m)	Jumlah mur	t , 10 ayunan (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	T (s)	T^2 (s ²)
A1								
A2								
A3								
A4								
A5								
B								

Grafik

Grafik 1: periode T (sumbu tegak) terhadap panjang tali L (sumbu mendatar); perhatikan bentuknya. Grafik 2: T^2 (sumbu tegak) terhadap L (sumbu mendatar); tarik satu garis lurus terbaik, lalu hitung kemiringannya.

Analisis

1. Bandingkan periode pada baris A3 (1 mur) dan baris B (3 mur) yang panjang talinya sama. Apakah massa beban mengubah periode? Apakah dugaan Raka terbukti?

Kunci: Periode baris B (3 mur) hampir sama dengan baris A3 (1 mur); pada contoh data 1,561 s dan 1,559 s. Selisihnya jauh lebih kecil daripada galat waktu reaksi, jadi massa beban tidak memengaruhi periode. Dugaan Raka tidak terbukti.

2. Bagaimana periode berubah ketika tali makin panjang? Saat L menjadi 4 kali ($0,20\text{ m} \rightarrow 0,80\text{ m}$), periodenya menjadi berapa kali?

Kunci: Makin panjang tali, makin besar periodenya, tetapi tidak sebanding. Saat L menjadi 4 kali ($0,20 \rightarrow 0,80\text{ m}$), T hanya menjadi sekitar 2 kali (contoh data: $0,902\text{ s} \rightarrow 1,803\text{ s}$), karena $\sqrt{4} = 2$.

3. Grafik $T-L$ melengkung, sedangkan grafik T^2-L lurus. Apa arti garis lurus itu? Tuliskan hubungan T dan L .

Kunci: Garis lurus melalui (hampir) titik asal berarti T^2 sebanding dengan L . Jadi $T \propto \sqrt{L}$: periode sebanding dengan akar panjang tali.

4. Hitung kemiringan grafik T^2-L . Teori meramalkan kemiringan $= 4\pi^2/g$. Berapa nilai g yang kamu peroleh?

Kunci: Contoh data: kemiringan $\approx \frac{4,048 - 0,814}{1,00 - 0,20} \approx 4,04\text{ s}^2/\text{m}$, sehingga $g = \frac{4\pi^2}{4,04} \approx 9,8\text{ m/s}^2$. Hasil antara $9,5$ dan $10,1\text{ m/s}^2$ sudah sangat baik untuk stopwatch tangan.

5. Mengapa kita mengukur waktu 10 ayunan lalu membaginya dengan 10, dan mengulang setiap pengukuran 3 kali?

Kunci: Galat waktu reaksi ($\pm 0,2\text{ s}$) hanya terjadi saat menekan tombol mulai dan berhenti. Jika dibagi 10 ayunan, galat per ayunan menjadi 10 kali lebih kecil. Pengulangan 3 kali mengurangi pengaruh galat acak dan menunjukkan apakah ada bacaan yang menyimpang.

6. Mengapa pada Bagian A massa beban dan simpangan dibuat tetap? Apa masalahnya jika panjang tali dan massa beban diubah sekaligus?

Kunci: Agar perbandingannya adil: hanya panjang tali yang berubah, sehingga perubahan periode pasti disebabkan oleh panjang tali. Jika panjang tali dan massa diubah sekaligus, kita tidak bisa tahu variabel mana yang menyebabkan periode berubah.

7. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara mengurangi masing-masing.

Kunci: Contoh galat: waktu reaksi menekan stopwatch, salah menghitung jumlah ayunan, panjang tali diukur ke ujung mur (bukan ke tengahnya), titik gantung ikut bergoyang, atau ada angin dari kipas. Perbaikan: mulai dan akhiri hitungan saat mur melewati titik terendah, mengukur 20 ayunan, merekam video HP lalu memutarinya pelan, memakai titik gantung yang kaku, dan mematikan kipas angin.

8. Hubungkan dengan kehidupan sehari-hari: jam bandul yang berjalan terlalu cepat diperbaiki dengan memanjangkan bandulnya. Mengapa? Apakah ayunan taman yang dinaiki orang dewasa berayun lebih lambat daripada saat dinaiki anak kecil?

Kunci: Jam yang terlalu cepat berarti periode bandulnya terlalu kecil. Memanjangkan bandul memperbesar T , sehingga jam melambat. Ayunan taman berperilaku seperti bandul: periodenya ditentukan oleh panjang tali (dan g), bukan oleh massa penumpang. Jadi orang dewasa dan anak kecil berayun dengan irama yang hampir sama (asal posisi duduknya sama).

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu dalam dua atau tiga kalimat: variabel mana yang memengaruhi periode bandul, variabel mana yang tidak, dan bagaimana bentuk hubungan periode dengan panjang tali. Sertakan bukti dari tabel atau grafikmu.

Refleksi

- Bagian yang paling seru saat menjadi detektif bandul adalah ...
- Tebakan awalku yang ternyata keliru adalah ..., dan aku menyadarinya karena ...
- Sikap ilmiah yang paling kulatih hari ini (jujur, teliti, skeptis, atau berani salah) adalah ... karena ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Bandul detektif: apa yang memengaruhi periode?" di Bab 1 (subbab 1.3). Atur $\theta_0 = 10^\circ$ dan $m = 0,20$ kg, lalu tekan Jalankan untuk $L = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$; dan $1,0$ m (Bagian A). Untuk Bagian B, kembalikan L ke $0,6$ m dan ubah m menjadi $0,60$ kg. Stopwatch lab mengukur 10 ayunan secara otomatis dan menuliskan T di tabelnya, jadi t_1 , t_2 , dan t_3 boleh diisi angka yang sama. Bonus: bandingkan $\theta_0 = 10^\circ$ dan 70° dengan L tetap.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b1-3

Contoh data (g setempat $\pm 9,78$ m/s², simpangan awal $\pm 10^\circ$)

Percobaan	L (m)	Jumlah mur	t_1 10 ayunan (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	T (s)	T^2 (s ²)
A1	0,20	1	9,08	8,95	9,02	9,02	0,902	0,814
A2	0,40	1	12,67	12,80	12,70	12,72	1,272	1,618
A3	0,60	1	15,64	15,51	15,63	15,59	1,559	2,430
A4	0,80	1	17,96	18,06	18,07	18,03	1,803	3,251
A5	1,00	1	20,19	20,10	20,06	20,12	2,012	4,048
B	0,60	3	15,56	15,65	15,61	15,61	1,561	2,437

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Hipotesis & pengendalian variabel	Hipotesis jelas dan dapat diuji; variabel bebas, terikat, dan kontrol disebut tepat; setiap pengujian hanya mengubah satu variabel.	Hipotesis dan variabel benar, tetapi satu variabel kontrol kurang dijaga.	Hipotesis kurang jelas atau ada pengujian yang mengubah dua variabel sekaligus.	Tidak ada hipotesis dan variabel tidak dikendalikan.
Pengukuran & ketelitian data	Mengukur 10 ayunan, diulang 3 kali untuk setiap baris; tabel lengkap dengan satuan; T dan T^2 dihitung tepat.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Pengukuran tidak diulang atau beberapa data dan satuan hilang.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis pola	Kedua grafik rapi (sumbu, satuan, skala tepat); pola $T \propto \sqrt{L}$ ditemukan; kemiringan T^2-L dihitung dan dipakai untuk menaksir g.	Grafik benar dan pola ditemukan, tetapi kemiringan tidak dihitung atau ditafsirkan.	Grafik salah skala atau pola tidak dikenali.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (massa tidak berpengaruh, $T \propto \sqrt{L}$), didukung data, menyebut sumber galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Bagi kelas menjadi kelompok 3–4 orang: pemegang stopwatch, penghitung ayunan, pencatat, dan pengukur panjang tali. Ingatkan bahwa satu ayunan penuh berarti bolak-balik kembali ke posisi awal; kesalahan paling umum adalah menghitung setengah ayunan. Untuk SMP, cukup sampai pola "tali 4 kali → periode 2 kali"; grafik T^2-L dan nilai g adalah pengayaan SMA. Jika ada waktu, minta kelompok membandingkan simpangan 10° dan 60° untuk melihat bahwa periode sedikit lebih panjang pada sudut besar (kotak Lanjut di subbab 1.3).

Satu Koin, Tiga Alat: Seberapa Teliti Pengukuranmu?

Bab 2 · Besaran, Satuan & Pengukuran

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 7 dan SMA kelas X

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing dengan pola POE (prediksi – observasi – eksplanasi)

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat membaca skala mistar, jangka sorong, dan mikrometer sekrup dengan benar, termasuk memeriksa kesalahan nol.
- Peserta didik dapat menuliskan hasil ukur dalam bentuk $(\bar{x} \pm \Delta x)$ dan menghitung ketidakpastian relatifnya.
- Peserta didik dapat memilih alat ukur yang tepat berdasarkan ukuran benda dan ketelitian yang dibutuhkan.
- Peserta didik dapat menghitung volume dan massa jenis koin beserta perambatan ketidakpastiannya (pengayaan SMA).

Fenomena



Di bengkel bubut dekat sekolah, Pak Darto menolak mengukur cincin mesin dengan penggaris. "Pakai mikrometer, Dik. Salah 0,1 mm saja, mesin bisa macet!" Raka heran: "Kan bedanya cuma sedikit?" Sari penasaran: "Seberapa besar sih bedanya kalau koin yang sama diukur dengan penggaris, jangka sorong, dan mikrometer?" Kak Nara menantang kelompokmu menyelidikinya, lalu menebak dari logam apa koin itu dibuat. Tarsi sudah siap dengan kaca pembesarnya!

? Rumusan masalah

Bagaimana nilai skala terkecil (nst) alat ukur memengaruhi ketidakpastian relatif hasil pengukuran diameter dan tebal sebuah koin, dan alat mana yang paling tepat untuk setiap ukuran?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jenis alat ukur (nst 1 mm, 0,1 mm, dan 0,01 mm) dan cara mengukur (satu koin atau tumpukan 10 koin)	Ketidakpastian absolut Δx dan ketidakpastian relatif (KR) hasil ukur	Koin sejenis yang sama, pengukur yang sama, dan posisi mata tegak lurus terhadap skala

Alat dan bahan

- 10 koin logam sejenis (pecahan dan tahun terbit sama)
- 1 mistar plastik 30 cm (nst 1 mm) dan 2 penghapus berbentuk balok untuk mengapit koin
- 1 jangka sorong (nst 0,1 mm) dari laboratorium IPA sekolah
- 1 mikrometer sekrup (nst 0,01 mm) dari laboratorium IPA sekolah
- Timbangan dapur digital (nst 1 g)
- Kalkulator, tisu atau lap kering, dan kertas tabel

Keselamatan

Putar mikrometer hanya dengan pemutar halus (ratchet) sampai berbunyi "klik"; memutar selubung terlalu kencang dapat merusak alat dan menjepit jari. Ujung rahang jangka sorong runcing: jangan diarahkan ke mata dan jangan dipakai bercanda. Koin kecil jangan dimasukkan ke mulut. Cuci tangan setelah memegang koin.

Langkah kerja

1. Periksa kesalahan nol: rapatkan rahang jangka sorong, lalu putar mikrometer sampai porosnya menyentuh landasan dan berbunyi "klik". Catat bacaannya. Jika tidak nol, kurangkan nilai itu dari setiap bacaan berikutnya.
2. Ukur diameter koin dengan mistar: apit koin di antara dua penghapus di atas mistar agar tepinya jelas, lalu baca dengan mata tegak lurus skala. Ukur 3 kali sambil memutar koin.
3. Ukur diameter koin dengan jangka sorong (rahang luar) 3 kali pada arah yang berbeda. Baca skala utama tepat sebelum nol nonius, lalu cari garis nonius yang berimpit.
4. Ukur diameter koin dengan mikrometer sekrup 3 kali. Jangan lupa memeriksa garis setengah milimeter di bawah garis tengah!
5. Ukur tebal satu koin dengan mistar, jangka sorong, dan mikrometer, masing-masing 3 kali. Untuk mistar, coba juga metode tumpukan: ukur tebal tumpukan 10 koin, lalu bagi 10.
6. Untuk setiap baris, hitung rata-rata $\bar{x}$, ketidakpastian Δx ($\frac{1}{2}$ nst, atau setengah rentang data jika lebih besar; untuk tumpukan: $0,5 \text{ mm} \div 10$), dan $KR = \Delta x / \bar{x} \times 100\%$.
7. Timbang 10 koin sekaligus dengan timbangan dapur digital, lalu bagi 10 untuk mendapat massa satu koin.
8. (Pengayaan SMA) Dari data paling teliti, hitung volume $V = \frac{1}{4}\pi d^2 t$ dan massa jenis $\rho = m/V$ beserta ketidakpastiannya.

Tabel pengamatan diameter (d) dan tebal (t) koin

Besaran · alat	nst (mm)	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	$\bar{x}$ rata-rata (mm)	Δx (mm)	KR (%)
Diameter · mistar							
Diameter · jangka sorong							
Diameter · mikrometer							
Tebal 1 koin · mistar							
Tebal tumpukan 10 koin $\div$ 10 · mistar							
Tebal · jangka sorong							
Tebal · mikrometer							

Grafik

Buat diagram batang ketidakpastian relatif (KR) untuk ketujuh baris tabel, dikelompokkan menjadi diameter dan tebal. Batang mana yang paling panjang, dan mana yang paling pendek?

Analisis

1. Urutkan ketiga alat dari yang paling teliti. Untuk alat yang sama, mengapa KR tebal jauh lebih besar daripada KR diameter?

Kunci: Urutan dari yang paling teliti: mikrometer (nst 0,01 mm), jangka sorong (0,1 mm), lalu mistar (1 mm). Untuk alat yang sama, Δx sama besar, tetapi tebal koin ($\pm 1,6$ mm) jauh lebih kecil daripada diameternya (± 24 mm). Karena $KR = \Delta x/x$, benda yang kecil menghasilkan KR besar (contoh data: tebal dengan mistar 30%, diameter dengan mistar hanya 2,1%).

2. Tuliskan hasil terbaikmu untuk diameter dan tebal dalam bentuk $(x \pm \Delta x)$ mm. Berapa angka penting masing-masing?

Kunci: Contoh: $d = (24,10 \pm 0,01)$ mm, 4 angka penting; $t = (1,583 \pm 0,005)$ mm, 4 angka penting. Nilai terbaik ditulis sampai tempat desimal yang sama dengan ketidakpastiannya.

3. Apakah hasil ketiga alat saling konsisten, yaitu rentang $x \pm \Delta x$ -nya saling bertumpang tindih? Jika ada yang tidak, apa kemungkinan penyebabnya?

Kunci: Pada contoh data semua konsisten: diameter jangka sorong 24,08–24,18 mm memuat 24,10 mm dari mikrometer, dan tebal jangka sorong 1,58–1,68 mm memuat 1,583 mm. Jika tidak bertumpang tindih, penyebabnya bisa kesalahan nol yang tidak dikoreksi, paralaks, koin terjepit miring, atau poros mikrometer diputar terlalu kencang.

4. Bandingkan tebal satu koin yang diukur langsung dengan mistar dan tebal dari metode tumpukan 10 koin. Mengapa metode tumpukan jauh lebih teliti? Apa syaratnya?

Kunci: Pada metode tumpukan, ketidakpastian mistar ($\pm 0,5$ mm) dibagi 10 koin, sehingga Δt per koin hanya $\pm 0,05$ mm dan KR turun dari 30% menjadi $\pm 3\%$. Syaratnya: semua koin sejenis (tebalnya sama) dan tumpukan rapat tanpa celah.

5. Hitung volume koin $V = \frac{1}{4}\pi d^2 t$ dari data terbaikmu beserta KR-nya. Ukuran mana (diameter atau tebal) yang menyumbang ketidakpastian terbesar?

Kunci: Contoh: $V = \frac{1}{4}\pi(24,10)^2(1,583) \approx 722 \text{ mm}^3 = 0,722 \text{ cm}^3$. $KR_V = 2KR_d + KR_t = 2(0,041\%) + 0,32\% \approx 0,40\%$, sehingga $V = (0,722 \pm 0,003) \text{ cm}^3$. Tebal menyumbang ketidakpastian terbesar walaupun diameter dikuadratkan.

6. Hitung massa jenis koin beserta ketidakpastiannya, lalu tebak bahannya. Pembanding: aluminium 2,7 g/cm³; baja 7,8–7,9 g/cm³; kuningan $\pm 8,5$ g/cm³; nikel 8,9 g/cm³. (Contoh: 10 koin = 56 g.)

Kunci: Contoh: $m = 56/10 = (5,6 \pm 0,1) \text{ g}$ (KR 1,8%). $\rho = 5,6/0,722 \approx 7,8 \text{ g/cm}^3$ dengan $KR \approx 1,8\% + 0,4\% = 2,2\%$, jadi $\rho = (7,8 \pm 0,2) \text{ g/cm}^3$. Nilai ini cocok dengan baja (misalnya baja berlapis nikel), bukan aluminium, kuningan, atau nikel murni. Ketidakpastian terbesar kini berasal dari timbangan dapur.

7. Mengapa kesalahan nol harus diperiksa sebelum mengukur? Apakah merata-rata tiga bacaan bisa menghapus kesalahan nol?

Kunci: Kesalahan nol adalah galat sistematis: semua bacaan bergeser ke arah dan besar yang sama. Merata-rata hanya mengurangi galat acak, bukan galat sistematis. Karena itu kesalahan nol harus dikoreksi dengan rumus hasil = bacaan – kesalahan nol.

8. Kaitkan dengan kehidupan: sebutkan satu pekerjaan yang membutuhkan mikrometer dan satu pekerjaan yang cukup memakai meteran. Apa akibatnya jika alat yang dipilih salah?

Kunci: Mikrometer dipakai di bengkel mesin (diameter piston, tebal kampas rem, diameter kabel), di industri kertas, dan di laboratorium. Meteran cukup untuk tukang kayu, penjahit, atau mengukur ruangan. Alat yang terlalu kasar menghasilkan ukuran yang tidak pas (mesin macet, komponen longgar); alat yang terlalu teliti untuk benda besar justru tidak praktis dan membuang waktu.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan nst alat, ketidakpastian relatif, dan ukuran benda yang diukur. Sebutkan alat yang paling tepat untuk mengukur diameter dan tebal koin, lengkap dengan alasannya.

💡 Refleksi

- Alat ukur yang paling menantang untuk kubaca adalah ..., karena ...
- Sebelum kegiatan ini aku mengira ..., sekarang aku tahu bahwa ...
- Kejujuran tentang ketidakpastian penting dalam kehidupan sehari-hari, misalnya saat ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya jangka sorong atau mikrometer? Pakai Lab Mini "Jangka sorong virtual: jepit, baca, periksa!" dan "Mikrometer sekrup virtual" di Bab 2 (subbab 2.6). Di jangka sorong, pilih benda "Koin", tekan Jepit benda, baca diameternya, lalu cek dengan tombol Periksa bacaan; ulangi dengan jenis nst 0,05 mm. Di mikrometer, pilih "Koin (tebal)", tekan Putar sampai menjepit, lalu baca tebalnya. Setiap "Benda baru" memberi ukuran berbeda, jadi isi x_1 - x_3 dengan bacaan berulang pada benda yang sama. Baris mistar dapat diisi dengan penggaris dan koin sungguhan di rumah.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b2-6

📊 Contoh data (koin logam sejenis; kesalahan nol sudah dikoreksi)

Besaran • alat	nst (mm)	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x rata-rata (mm)	Δx (mm)	KR (%)
Diameter • mistar	1	24,0	24,5	24,0	24,2	0,5	2,1
Diameter • jangka sorong	0,1	24,1	24,2	24,1	24,13	0,05	0,21
Diameter • mikrometer	0,01	24,10	24,11	24,09	24,100	0,01	0,041
Tebal 1 koin • mistar	1	1,5	2,0	1,5	1,7	0,5	30
Tebal tumpukan 10 koin ÷ 10 • mistar	1 (tumpukan)	1,60	1,60	1,55	1,58	0,05	3,2
Tebal • jangka sorong	0,1	1,6	1,6	1,7	1,63	0,05	3,1
Tebal • mikrometer	0,01	1,58	1,59	1,58	1,583	0,005	0,32

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Keterampilan membaca alat ukur	Ketiga alat dibaca dengan benar, kesalahan nol diperiksa dan dikoreksi, mata tegak lurus skala, dan mikrometer diputar dengan pemutar halus.	Ketiga alat dibaca benar, tetapi kesalahan nol tidak diperiksa.	Ada kesalahan membaca nonius atau garis setengah milimeter pada mikrometer.	Sebagian besar bacaan salah atau alat tidak digunakan dengan benar.
Pengolahan data & ketidakpastian	Rata-rata, Δx , dan KR dihitung tepat untuk semua baris; hasil ditulis ($x \pm \Delta x$) dengan angka penting yang sesuai.	Perhitungan benar dengan satu atau dua kesalahan kecil penulisan angka penting.	Δx atau KR salah dihitung pada beberapa baris.	Ketidakpastian tidak dihitung.
Analisis & pemilihan alat	Menjelaskan dengan tepat mengapa KR bergantung pada ukuran benda, menilai konsistensi antaratat, dan memilih alat yang tepat dengan alasan kuat.	Analisis benar tetapi alasan pemilihan alat kurang lengkap.	Analisis sebagian benar; konsistensi antaratat tidak dibahas.	Tidak ada analisis.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat, didukung data, menyebut galat sistematis dan acak, serta dikaitkan dengan pekerjaan nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Jika jumlah mikrometer terbatas, gilir antarkelompok: kelompok yang menunggu mengerjakan baris mistar dan metode tumpukan lebih dulu. Pastikan setiap kelompok memakai koin yang sejenis (pecahan dan tahun terbit sama). Buku ini memakai $\frac{1}{2}$ nst sebagai ketidakpastian alat analog; sampaikan bahwa IB umumnya memakai ± 1 nst untuk jangka sorong, jadi yang penting konvensinya ditulis jelas. Untuk SMP, cukup sampai pertanyaan 1–4 dan 7–8; volume dan massa jenis (pertanyaan 5–6) adalah pengayaan SMA.

Physicspedia · LKPD Bab 2 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Jejak Pramuka 3-4: Apakah 3 m + 4 m Selalu 7 m?

Bab 3 · Vektor & Matematika Secukupnya

Eksperimen lapangan kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 8 dan SMA kelas X

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing (discovery learning): ukur – bandingkan – temukan pola

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat membedakan jarak tempuh dan perpindahan melalui pengukuran langsung di lapangan.
- Peserta didik dapat menjumlahkan dua vektor perpindahan secara grafis (gambar berskala) dan analitis ($R = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos \theta}$).
- Peserta didik dapat menyelidiki pengaruh sudut antara dua vektor terhadap besar dan arah resultannya.
- Peserta didik dapat mengevaluasi kecocokan data ukur dengan hasil hitungan serta menjelaskan sumber galatnya.

Fenomena



Dalam kegiatan Pramuka, regu Raka mendapat petunjuk jejak: "Dari tiang bendera, berjalanlah 3 m ke timur, lalu belok dan berjalan 4 m." Besar sudut beloknya tertulis di amplop lain yang belum dibuka. Raka langsung yakin, "Gampang! Harta karunya pasti 7 m dari tiang bendera." Sari menggeleng, "Tergantung beloknya!" Kak Nara menantang regumu menemukan aturan yang menghubungkan sudut belokan dengan jarak lurus dari tiang ke harta karun. Tarsi menunggu di garis finis sambil memegang kompas.

Rumusan masalah

Bagaimana besar dan arah resultan dua perpindahan, $A = 3$ m dan $B = 4$ m, bergantung pada sudut θ di antara keduanya?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Sudut θ antara perpindahan pertama A dan perpindahan kedua B (0° , 60° , 90° , 120° , 180°)	Besar resultan R (jarak lurus dari titik awal ke titik akhir) dan arahnya α terhadap arah timur	Panjang $A = 3,00$ m dan $B = 4,00$ m, titik awal yang sama, dan arah timur sebagai acuan

Alat dan bahan

- Meteran gulung 10 m (atau tali rafia 10 m yang ditandai setiap 10 cm dengan spidol)
- Tali rafia untuk membuat sudut: satu tali dengan tanda 3 m, 4 m, dan 5 m (segitiga siku-siku 3-4-5) serta 3 potong tali masing-masing 1 m (segitiga sama sisi, sudut 60°)
- Kapur tulis atau 6 batu kecil sebagai penanda titik
- Kompas di HP dan busur derajat dari karton (jari-jari ± 20 cm)
- Lapangan sekolah atau halaman datar berukuran ± 10 m x 10 m
- Kertas grafik, penggaris, busur derajat kecil, dan kalkulator

Keselamatan

Lakukan di bagian lapangan yang tidak sedang dipakai olahraga agar tidak terkena bola. Berjalanlah menghadap ke depan, jangan mundur sambil menarik meteran. Gulung kembali pita meteran perlahan karena tepi pita logamnya tajam dan dapat menggores tangan. Saat matahari terik, pakai topi dan minum air yang cukup.

Langkah kerja

1. Tandai titik awal O dengan kapur. Tentukan arah timur dengan kompas HP, tarik meteran 3,00 m ke timur, lalu tandai titik P. Inilah vektor A .
2. Di titik P, buat sudut belokan θ dari arah timur (berbelok ke kiri, ke arah utara). Untuk 90° pakai segitiga tali 3-4-5; untuk 60° pakai segitiga sama sisi dari tali 1 m; untuk 120° , buat 60° terhadap arah balik (barat). Sudut 0° berarti lurus terus, 180° berarti berbalik arah.
3. Dari P, tarik meteran 4,00 m ke arah belokan itu, lalu tandai titik Q. Inilah vektor B .
4. Ukur jarak lurus OQ dengan meteran yang ditarik tegang sebanyak 2 kali oleh anggota yang berbeda. Inilah besar resultan R .
5. Di titik O, ukur sudut α antara arah timur dan garis OQ dengan busur karton atau kompas HP.
6. Ulangi langkah 1–5 untuk $\theta = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$, dan 180° .
7. Hitung R dengan rumus $R = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos \theta}$ dan selisihnya terhadap R ukur dalam persen.
8. Di kelas, buat gambar berskala setiap percobaan (1 cm mewakili 0,5 m) dengan metode kepala ke ekor, lalu bandingkan panjang resultan di gambar dengan hasil pengukuranmu.

Tabel pengamatan ($A = 3,00$ m ke timur, $B = 4,00$ m)

Percobaan	θ ($^\circ$)	R ukur ₁ (m)	R ukur ₂ (m)	R rata-rata (m)	α ukur ($^\circ$)	R hitung (m)	Selisih (%)
1							
2							
3							
4							
5							

Grafik

Grafik besar resultan R (sumbu tegak) terhadap sudut θ (sumbu mendatar, 0° – 180°). Gambar titik-titik R ukur, lalu lengkungan R hitung sebagai pembanding.

Analisis

1. Bagaimana besar resultan berubah ketika sudut θ diperbesar dari 0° sampai 180° ? Pada sudut berapa resultan terbesar dan terkecil? Apakah tebakan Raka benar?

Kunci: Makin besar θ , makin kecil resultannya. Resultan terbesar 7 m pada $\theta = 0^\circ$ (searah) dan terkecil 1 m pada $\theta = 180^\circ$ (berlawanan). Tebakan Raka hanya benar jika ia tidak berbelok sama sekali.

2. Bandingkan R ukur dengan R hitung. Berapa persen selisih terbesarnya? Mengapa selisih relatif pada $\theta = 180^\circ$ paling besar?

Kunci: Pada contoh data, selisih terbesar sekitar 3% (pada 180°); selisih lainnya di bawah 1%. Galat ukur $\pm 2\text{--}4$ cm hampir sama untuk semua percobaan, tetapi pada 180° resultannya hanya 1 m, sehingga selisih relatifnya paling besar.

3. Hasil pada $\theta = 90^\circ$ istimewa. Mengapa? Hubungkan dengan teorema Pythagoras dan segitiga 3-4-5 yang dipakai tukang bangunan.

Kunci: Pada $\theta = 90^\circ$, $\cos 90^\circ = 0$, sehingga rumus menjadi $R = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$ m (teorema Pythagoras). Sebaliknya, tukang bangunan memakai segitiga tali 3-4-5 untuk membuat sudut tepat 90° pada fondasi rumah.

4. Di titik P, sudut di dalam segitiga OPQ tidak sama dengan sudut belokan θ . Berapa sudut dalam itu untuk $\theta = 60^\circ$? Mengapa rumus resultan memakai θ dengan tanda $+2AB \cos \theta$?

Kunci: Sudut dalam di P adalah $180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$. Aturan kosinus segitiga memakai sudut dalam: $R^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos 120^\circ$. Karena $\cos(180^\circ - \theta) = -\cos \theta$, hasilnya sama dengan $R^2 = A^2 + B^2 + 2AB \cos \theta$, dengan θ sudut antara kedua vektor saat ekornya disatukan.

5. Hitung arah resultan untuk $\theta = 90^\circ$ dengan $\tan \alpha = \frac{B \sin \theta}{A + B \cos \theta}$, lalu bandingkan dengan α hasil ukurmu.

Kunci: $\tan \alpha = \frac{4 \sin 90^\circ}{3 + 4 \cos 90^\circ} = \frac{4}{3}$, sehingga $\alpha \approx 53^\circ$ dari timur ke utara. Contoh data mengukur 52° , cocok dalam batas ketelitian busur.

6. Jarak tempuh regumu selalu 7 m. Mengapa besar perpindahannya berbeda-beda? Kapan jarak tempuh sama dengan besar perpindahan?

Kunci: Jarak tempuh adalah panjang lintasan (skalar), sehingga selalu $3 + 4 = 7$ m. Perpindahan adalah vektor dari titik awal ke titik akhir, sehingga besarnya bergantung pada arah kedua langkah. Jarak tempuh sama dengan besar perpindahan hanya jika geraknya lurus tanpa berbelok ($\theta = 0^\circ$).

7. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: sudut belokan kurang tepat, meteran kendur atau melengkung, penanda titik terlalu besar, atau kompas HP terganggu benda logam. Perbaiki: tarik meteran tegang, buat sudut dengan segitiga tali, pakai patok kecil sebagai penanda, jauhkan HP dari logam, dan ulangi pengukuran.

8. Hubungkan dengan kehidupan: nelayan mendayung perahu 4 km/jam tegak lurus arus sungai yang mengalir 3 km/jam. Berapa kelajuan perahu terhadap tepi sungai? Apa hubungannya dengan percobaanmu?

Kunci: Kecepatan perahu terhadap tepi adalah jumlah vektor kecepatan dayung (4 km/jam) dan kecepatan arus (3 km/jam) yang saling tegak lurus: $\sqrt{4^2 + 3^2} = 5$ km/jam, miring ke hilir. Ini persis kasus $\theta = 90^\circ$ pada percobaanmu, hanya saja yang dijumlahkan kecepatan, bukan perpindahan.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang cara menjumlahkan dua vektor dan pengaruh sudut di antara keduanya terhadap besar resultan. Sertakan rumusnya dan satu bukti dari tabel atau grafikmu.

💡 Refleksi

- Saat berjalan di lapangan, aku baru benar-benar paham bahwa ...

- Bagian yang masih membingungkanku tentang vektor adalah ...
- Contoh penjumlahan vektor yang kutemui di sekitarku adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak bisa ke lapangan? Pakai Lab Mini "Lab vektor: seret ujung panahnya!" di Bab 3 (subbab 3.2). Pilih mode $A + B$, matikan "Tempel ke kisi 0,5 satuan", lalu seret ujung A ke titik $(3, 0)$. Seret ujung B sehingga $|B| \approx 4$ dan "Sudut antara A dan B" mendekati $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$, dan 180° (misalnya B di $(4, 0)$, $(2; 3,5)$, $(0, 4)$, $(-2; 3,5)$, dan $(-4, 0)$). Catat $|R|$ dan "arah R" dari panel hitungan sebagai R ukur dan α ukur, lalu bandingkan dengan rumus.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b3-2

Contoh data ($A = 3,00 \text{ m}$ ke timur, $B = 4,00 \text{ m}$)

Percobaan	θ ($^\circ$)	R ukur ₁ (m)	R ukur ₂ (m)	R rata-rata (m)	α ukur ($^\circ$)	R hitung (m)	Selisih (%)
1	0	7,02	7,00	7,01	0	7,00	+0,1
2	60	6,05	6,09	6,07	36	6,08	-0,2
3	90	5,03	5,01	5,02	52	5,00	+0,4
4	120	3,59	3,57	3,58	75	3,61	-0,7
5	180	1,02	1,04	1,03	180	1,00	+3,0

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan pengukuran lapangan	Sudut dibuat dengan cermat (segitiga tali/busur), meteran ditarik tegang, setiap R diukur 2 kali, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Pengukuran benar, tetapi ada satu percobaan yang kurang cermat atau tidak diulang.	Beberapa sudut dibuat asal-asalan sehingga data menyimpang jauh.	Pengukuran tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Perhitungan vektor	R dan α dihitung tepat untuk semua sudut, selisih persen benar, dan gambar berskala rapi.	Perhitungan benar dengan satu atau dua kesalahan kecil.	Rumus kosinus salah dipakai (misalnya memakai sudut dalam dengan tanda +) atau gambar berskala tidak dibuat.	Perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik R- θ lengkap dengan titik ukur dan lengkung hitung; pola dan peran sudut dijelaskan tepat; sumber galat dianalisis.	Grafik benar tetapi analisis kurang lengkap.	Grafik salah skala atau pola tidak dikenali.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (resultan bergantung pada sudut, jarak $\neq$ perpindahan), didukung data, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor $\div$ 16) $\times$ 100.

Catatan guru

Kegiatan ini paling bermakna jika dilakukan sebelum rumus resultan diajarkan: biarkan siswa menemukan sendiri bahwa $3 + 4$ tidak selalu 7. Bagi tugas dalam regu: dua pemegang meteran, satu pembuat sudut, dan satu pencatat. Siswa SMP cukup mengerjakan $\theta = 0^\circ, 90^\circ$, dan 180° dengan Pythagoras; siswa SMA memakai rumus kosinus dan arah resultan. Hubungkan pertanyaan 4 dengan kotak "Awat jebakan" tentang sudut antara dua vektor di subbab 3.1.

Physicspedia · LKPD Bab 3 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Talang Galileo: Menguji GLBB dengan Kelereng di Bidang Miring

Bab 4 • Gerak Lurus

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 8 dan SMA kelas X

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE), mengulang percobaan Galileo

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengukur waktu tempuh kelereng pada beberapa jarak di bidang miring dengan pengulangan yang teliti.
- Peserta didik dapat menyajikan data dalam grafik $s-t$ dan $s-t^2$, serta menafsirkan kemiringan grafik $s-t^2$ sebagai $a/2$.
- Peserta didik dapat menyimpulkan bahwa gerak kelereng adalah GLBB yang memenuhi $s = \frac{1}{2}at^2$.
- Peserta didik dapat menjelaskan sumber galat dan mengapa percepatan kelereng lebih kecil daripada $g \sin \theta$.

Fenomena



Di pasar, Raka melihat kuli menurunkan karung beras melalui papan miring dari bak truk. Karung itu melaju makin lama makin cepat. Raka menebak, "Kalau jaraknya dua kali, waktunya juga dua kali, kan?" Sari ragu. Kak Nara bercerita bahwa sekitar 400 tahun lalu Galileo menjawab pertanyaan yang sama dengan bola dan papan miring, karena benda yang jatuh bebas terlalu cepat untuk diukur dengan jam air. Kelompokmu akan mengulang percobaan Galileo memakai talang dan kelereng. Tarsi siap mengamati!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara jarak tempuh s dan waktu tempuh t sebuah kelereng yang menggelinding dari keadaan diam pada bidang miring?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jarak tempuh s dari garis start	Waktu tempuh t	Tinggi penyangga (sudut kemiringan), kelereng yang sama, talang yang sama, dan kelereng selalu dilepas dari diam tanpa didorong

Alat dan bahan

- Talang air plastik $\pm 1,5$ m (atau dua bilah kayu/penggaris panjang yang disusun membentuk alur lurus)
- 1 kelereng kaca (atau bola besi dari bantalan roda bekas)
- Tumpukan buku setinggi ± 10 cm sebagai penyangga
- Meteran gulung dan selotip kertas untuk menandai jarak 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; dan 1,25 m
- Stopwatch di HP (lebih baik lagi: kamera HP dalam mode video atau gerak lambat)
- Penggaris sebagai "gerbang" start, kardus atau handuk untuk menangkap kelereng di ujung bawah talang

- Kertas milimeter dan kalkulator

Keselamatan

Pasang kardus atau handuk di ujung bawah talang agar kelereng tidak jatuh dan pecah, atau menggelinding ke lantai lalu terinjak. Pastikan tumpukan buku penyangga stabil agar talang tidak jatuh. Jangan melempar kelereng, dan kumpulkan semua kelereng setelah selesai.

Langkah kerja

1. Letakkan talang di atas meja panjang atau lantai, lalu ganjal satu ujungnya dengan tumpukan buku. Ukur beda tinggi kedua ujung h ($\pm 0,10$ m) dan panjang talang L ($\pm 1,50$ m).
2. Tandai garis start dekat ujung atas. Dengan selotip, tandai jarak $s = 0,25; 0,50; 0,75; 1,00$; dan $1,25$ m dari garis start.
3. Tahan kelereng di garis start dengan penggaris tegak. Angkat penggaris dengan cepat (jangan mendorong kelereng) bersamaan dengan menekan stopwatch.
4. Hentikan stopwatch tepat saat kelereng melewati tanda $s = 0,25$ m. Ulangi 3 kali (t_1, t_2, t_3). Jika memakai video, putar rekamannya pelan dan baca waktunya dari rekaman.
5. Ulangi langkah 3–4 untuk tanda $0,50; 0,75; 1,00$; dan $1,25$ m. Jangan mengubah tinggi penyangga selama percobaan.
6. Hitung t rata-rata, t^2 , dan percepatan $a = 2s/t^2$ untuk setiap jarak.
7. Gambar grafik s terhadap t , lalu grafik s terhadap t^2 . Tarik garis lurus terbaik pada grafik kedua dan hitung kemiringannya.

Tabel pengamatan (kelereng dilepas dari diam)

Percobaan	s (m)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	t^2 (s ²)	$a = 2s/t^2$ (m/s ²)
1							
2							
3							
4							
5							

Grafik

Grafik 1: jarak s (sumbu tegak) terhadap waktu t (sumbu mendatar); perhatikan bentuknya. Grafik 2: s terhadap t^2 ; tarik satu garis lurus terbaik yang melalui titik asal, lalu hitung kemiringannya.

Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik $s-t$ dan grafik $s-t^2$? Apakah tebakan Raka (jarak 2 kali $\rightarrow$ waktu 2 kali) terbukti?

Kunci: Grafik $s-t$ melengkung ke atas (setengah parabola), sedangkan grafik $s-t^2$ berupa garis lurus melalui titik asal, jadi $s \propto t^2$. Tebakan Raka keliru: pada contoh data, jarak 4 kali ($0,25 \rightarrow 1,00$ m) baru membuat waktu 2 kali ($1,09 \rightarrow 2,20$ s).

2. Hitung kemiringan grafik $s-t^2$. Apa arti fisisnya? Tentukan percepatan kelereng.

Kunci: Dari $s = \frac{1}{2}at^2$, kemiringan grafik $s-t^2$ adalah $a/2$. Contoh data: kemiringan $\approx 0,21 \text{ m/s}^2$, sehingga $a \approx 0,42 \text{ m/s}^2$.

3. Apakah nilai $a = 2s/t^2$ di kolom terakhir kira-kira sama untuk semua jarak? Apa artinya bagi jenis gerak kelereng?

Kunci: Ya, nilainya $0,41-0,42 \text{ m/s}^2$ untuk semua jarak (berbeda sedikit karena galat waktu). Percepatan yang tetap berarti kelereng melakukan gerak lurus berubah beraturan (GLBB).

4. Hitung kecepatan kelereng saat melewati tanda $1,00 \text{ m}$ dengan $v = at$ atau $v = 2s/t$. Mengapa $v = s/t$ tidak tepat di sini?

Kunci: $v = 2s/t = 2(1,00)/2,20 \approx 0,91 \text{ m/s}$ (atau $v = at = 0,42 \times 2,20 \approx 0,92 \text{ m/s}$). Rumus s/t hanya memberi kecepatan rata-rata ($\approx 0,45 \text{ m/s}$). Pada GLBB dari diam, kecepatan rata-rata hanya setengah kecepatan akhir.

5. Galileo menemukan bahwa jarak yang ditempuh dalam selang-selang waktu berurutan yang sama berbanding $1 : 3 : 5 : 7$. Tunjukkan bahwa pola ini sesuai dengan $s \propto t^2$.

Kunci: Jika $s \propto t^2$, jarak total setelah 1, 2, 3, dan 4 selang waktu berbanding $1 : 4 : 9 : 16$. Jarak yang ditempuh pada setiap selang adalah selisihnya: $1, 4 - 1 = 3, 9 - 4 = 5$, dan $16 - 9 = 7$. Jadi $1 : 3 : 5 : 7$.

6. Bandingkan percepatan hasil percobaan dengan $g \sin \theta = g h/L$. Mengapa hasil percobaan lebih kecil?

Kunci: Contoh: $g \sin \theta = 9,8 \times 0,10/1,50 \approx 0,65 \text{ m/s}^2$, sedangkan hasil percobaan $0,42 \text{ m/s}^2$. Kelereng menggelinding, jadi sebagian energinya dipakai untuk berputar; untuk bola pejal di bidang datar percepatannya hanya $\frac{5}{7}g \sin \theta \approx 0,47 \text{ m/s}^2$, dan di dalam alur talang lebih kecil lagi. Gesekan dan hambatan udara juga sedikit memperlambat (Bab 10 membahas gerak menggelinding).

7. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: waktu reaksi saat menekan stopwatch (berpengaruh besar karena waktunya hanya 1–2,5 s), kelereng terdorong saat penggaris diangkat, talang melengkung, atau kelereng memantul di sambungan. Perbaiki: merekam video dengan HP, mengulang lebih banyak, memakai talang yang lurus dan tanpa sambungan, serta membagi tugas pengamat untuk tiap tanda.

8. Kaitkan dengan keselamatan jalan: mengapa truk yang remnya blong di turunan panjang sangat berbahaya, dan apa guna jalur penyelamat di jalan menurun?

Kunci: Di turunan panjang tanpa rem, truk terus dipercepat: kecepatannya bertambah sebanding waktu dan jarak tempuhnya sebanding kuadrat waktu, sehingga truk makin lama makin sulit dikendalikan. Jalur penyelamat (lajur berpasir atau menanjak) memberi perlambatan besar sehingga truk dapat berhenti dengan aman.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan jarak dan waktu pada gerak kelereng dari keadaan diam, lengkap dengan persamaannya dan nilai percepatan yang kamu peroleh.

💡 Refleksi

- Saat mengulang percobaan Galileo, aku merasa ...
- Hal yang paling sulit dalam mengukur waktu adalah ..., dan cara kelompokku mengatasinya adalah ...

- Contoh GLBB yang kulihat di jalan atau di rumah adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya talang? Pakai Lab Mini "Bola besi, kertas, dan bulu: siapa duluan?" di Bab 4 (subbab 4.7). Pilih "Bumi, di dalam tabung hampa udara", lalu atur tinggi jatuh 2, 5, 10, 20, dan 40 m. Setelah dijalankan, catat waktu mendarat bola besi (angka di bawahnya) sebagai t dan tinggi jatuh sebagai s . Isi tabel yang sama, buat grafik $s-t^2$, dan bandingkan kemiringannya dengan $g/2 = 4,9 \text{ m/s}^2$. Bonus: nyalakan foto stroboskop untuk melihat pola 1 : 3 : 5 : 7.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b4-5

Contoh data (talang 1,50 m, beda tinggi ujung 0,10 m)

Percobaan	s (m)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t rata-rata (s)	t ² (s ²)	a = 2s/t ² (m/s ²)
1	0,25	1,13	1,04	1,11	1,09	1,19	0,42
2	0,50	1,48	1,57	1,59	1,55	2,40	0,42
3	0,75	1,94	1,87	1,83	1,88	3,53	0,42
4	1,00	2,15	2,24	2,20	2,20	4,84	0,41
5	1,25	2,48	2,38	2,45	2,44	5,95	0,42

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, kelereng selalu dilepas dari diam di titik yang sama, setiap jarak diukur 3 kali, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu jarak yang tidak diulang atau kurang rapi.	Tinggi penyangga berubah di tengah percobaan atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap dengan satuan; t rata-rata, t^2 , dan a dihitung tepat untuk semua jarak.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau rumus $a = 2s/t^2$ salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Kedua grafik rapi; pola $s \propto t^2$ ditemukan; kemiringan $s-t^2$ dihitung dan ditafsirkan sebagai $a/2$; perbedaan dengan $g \sin \theta$ dijelaskan.	Grafik benar tetapi penafsiran kemiringan atau perbandingan dengan $g \sin \theta$ kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (GLBB, $s = \frac{1}{2}at^2$), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Kemiringan yang landai (beda tinggi 5–10 cm untuk talang 1,5 m) membuat waktu tempuh cukup panjang untuk diukur dengan stopwatch tangan. Rekaman video HP jauh lebih teliti: pada 30 bingkai per sekon, setiap bingkai berselang $\pm 0,033$ s. Untuk SMP, berhenti pada pola "jarak 4 kali $\rightarrow$ waktu 2 kali"; untuk SMA, minta kemiringan grafik $s-t^2$ dan pembahasan mengapa a lebih kecil daripada $g \sin \theta$. Ceritakan juga bahwa Galileo mengukur waktu dengan menimbang air yang mengalir dari sebuah wadah.

Physicspedia · LKPD Bab 4 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Selang Ajaib: Mencari Sudut Semprot Terjauh dan Sudut Kembar

Bab 5 • Gerak Parabola & Gerak Relatif 2D

Eksperimen lapangan kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas X-XI (pengayaan SMP kelas 9)

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing dengan pola POE (prediksi – observasi – eksplanasi)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menentukan kelajuan awal pancaran air dari percobaan pancaran mendatar dengan $v_0 = x / \sqrt{2h/g}$.
- Peserta didik dapat menyelidiki pengaruh sudut semprot terhadap jangkauan, lalu menemukan sudut jangkauan terjauh dan pasangan sudut kembar.
- Peserta didik dapat membandingkan hasil ukur dengan ramalan $R = v_0^2 \sin 2\theta / g$ dan menjelaskan pengaruh hambatan udara.
- Peserta didik dapat menerapkan konsep gerak parabola pada kegiatan sehari-hari, misalnya menyiram tanaman.

Fenomena



Sore hari, Raka disuruh Ibu menyiram tanaman di ujung kebun dengan selang. Airnya tidak sampai. Ia mengangkat ujung selang makin tinggi, tetapi pancarannya malah makin pendek! Sari berkata, "Pasti ada sudut terbaik." Kak Nara menambahkan teka-teki: "Ada juga dua sudut berbeda yang sama-sama mengenai pot yang sama." Tarsi sudah memakai jas hujan. Kelompokmu akan menyelidikinya di halaman sekolah.

Rumusan masalah

Bagaimana jangkauan pancaran air bergantung pada sudut semprot θ jika kelajuan awalnya tetap, dan sudut berapa yang memberi jangkauan terjauh?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Sudut semprot θ (15°, 30°, 45°, 60°, 75°)	Jangkauan R , yaitu jarak mendatar dari ujung selang ke pusat titik jatuh air	Bukaan keran (kelajuan awal air), cara memegang ujung selang, tinggi ujung selang di dekat permukaan tanah, dan lokasi percobaan

Alat dan bahan

- Selang air ± 5 m yang tersambung ke keran (ujungnya boleh dipencet sedikit agar pancaran lebih rapi)
- Busur derajat dari karton (jari-jari ± 20 cm) dengan benang dan mur kecil sebagai unting-unting penunjuk arah tegak
- Kursi atau tumpukan kardus untuk menahan ujung selang mendatar setinggi 1,00 m

- Meteran gulung 10 m dan 6 patok atau batu kecil untuk menandai titik jatuh air
- Pot bunga atau ember bekas sebagai sasaran
- Kantong plastik untuk HP, kertas tabel, dan kalkulator

Keselamatan

Lakukan di halaman berumput atau tanah, jauh dari stopkontak, kabel listrik, dan peralatan elektronik; simpan HP di dalam kantong plastik. Lantai atau paving yang basah licin: berjalanlah pelan dan jangan berlarian. Jangan menyemprotkan air ke wajah teman. Matikan keran setelah selesai dan gunakan sisa air untuk menyiram tanaman agar tidak terbuang.

Langkah kerja

1. Buka keran kira-kira setengah, lalu tandai posisi pegangan keran dengan selotip. Bukaan keran tidak boleh berubah selama seluruh percobaan.
2. **Kalibrasi:** tahan ujung selang mendatar (0° menurut busur) setinggi $h = 1,00$ m. Ukur jarak mendatar x dari titik tepat di bawah ujung selang ke pusat titik jatuh air, 3 kali. Hitung $v_0 = x/\sqrt{2h/g}$.
3. Letakkan ujung selang sedekat mungkin dengan permukaan tanah, ditopang busur karton. Arahkan pancaran pada sudut 15° .
4. Tandai pusat titik jatuh air dengan patok, lalu ukur jangkauan R dengan meteran. Ulangi 3 kali.
5. Ulangi langkah 3–4 untuk sudut 30° , 45° , 60° , dan 75° .
6. Hitung R rata-rata, $\sin 2\theta$, dan R ramalan $= v_0^2 \sin 2\theta / g$ untuk setiap sudut.
7. Gambar grafik R terhadap θ dan grafik R terhadap $\sin 2\theta$.
8. **Tantangan pot:** letakkan pot 2,5 m dari ujung selang. Hitung dua sudut yang akan mengenai pot dari $\sin 2\theta = gR/v_0^2$, lalu buktikan!

Tabel pengamatan (bukaan keran tetap)

Percobaan	θ ($^\circ$)	$\sin 2\theta$	R_1 (m)	R_2 (m)	R_3 (m)	R rata-rata (m)	R ramalan (m)
Kalibrasi							
1							
2							
3							
4							
5							

Grafik

Grafik 1: jangkauan R (sumbu tegak) terhadap sudut θ (sumbu mendatar); tandai puncaknya. Grafik 2: R terhadap $\sin 2\theta$; tarik garis lurus terbaik melalui titik asal dan hitung kemiringannya.

Analisis

1. Pada sudut berapa jangkauan terjauh? Apakah sesuai dengan hipotesismu?

Kunci: Jangkauan terjauh terjadi di sekitar 45° (contoh data: 3,53 m). Dari 15° jangkauan naik sampai 45° , lalu turun lagi sampai 75° .

2. Bandingkan jangkauan pasangan 15° dan 75° , serta 30° dan 60° . Apa yang kamu temukan? Jelaskan dengan rumus jangkauan.

Kunci: Pasangan 15° dan 75° (1,81 m dan 1,76 m) serta 30° dan 60° (3,10 m dan 3,05 m) memberi jangkauan hampir sama. Sebabnya $\sin 2\theta = \sin(180^\circ - 2\theta)$, misalnya $\sin 30^\circ = \sin 150^\circ$. Jadi sudut θ dan $90^\circ - \theta$ memberi jangkauan yang sama.

3. Hitung v_0 dari data kalibrasi, lalu bandingkan R ramalan dengan R ukur. Berapa persen selisih terbesarnya?

Kunci: $v_0 = 2,66 / \sqrt{2(1,00)/9,8} \approx 5,89$ m/s, sehingga R ramalan $\approx 3,54 \sin 2\theta$ m. Selisih terbesar pada contoh data sekitar 2% (sudut 15° : 1,81 m terhadap 1,77 m); sudut lainnya di bawah 1,5%. Model parabola cukup tepat.

4. Grafik R terhadap $\sin 2\theta$ hampir lurus. Apa arti kemiringannya? Hitung v_0 dari kemiringan itu dan bandingkan dengan hasil kalibrasi.

Kunci: Dari $R = (v_0^2/g) \sin 2\theta$, grafik R - $\sin 2\theta$ lurus melalui titik asal dengan kemiringan v_0^2/g . Contoh data: kemiringan $\approx 3,55$ m, sehingga $v_0 = \sqrt{3,55 \times 9,8} \approx 5,9$ m/s, cocok dengan hasil kalibrasi.

5. Mengapa jangkauan pada sudut curam (60° , 75°) sedikit lebih pendek daripada pasangannya yang landai (30° , 15°)?

Kunci: Pada sudut curam, air lebih lama di udara (waktu terbang $T = 2v_0 \sin \theta/g$ lebih besar), sehingga hambatan udara bekerja lebih lama dan pancaran sempit pecah menjadi butiran yang mudah diperlambat. Karena itu jangkauannya sedikit lebih pendek daripada pasangannya. Di Lab Mini yang tanpa udara, pasangan sudut memberi jangkauan yang persis sama.

6. Kaitkan dengan menyiram tanaman: sudut berapa yang dipakai untuk menjangkau pot terjauh? Untuk pot yang lebih dekat ada dua pilihan sudut; kapan sudut curam lebih berguna? Berapa dua sudut untuk tantangan pot 2,5 m?

Kunci: Untuk pot terjauh, arahkan selang sekitar 45° (sedikit di bawahnya, karena hambatan udara dan karena ujung selang biasanya berada di atas tanah). Untuk pot dekat, sudut landai membuat air cepat sampai dengan pancaran rendah, sedangkan sudut curam membuat air melengkung tinggi dan jatuh hampir tegak, berguna untuk melewati pagar atau tanaman lain di depan pot. Tantangan pot 2,5 m: $\sin 2\theta = 9,8 \times 2,5 / 5,89^2 \approx 0,71$, sehingga $\theta \approx 22,5^\circ$ atau $67,5^\circ$.

7. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: tekanan air keran naik-turun, sudut selang tidak tepat atau bergeser saat air keluar, titik jatuh menyebar sehingga pusatnya sulit ditentukan, serta tiupan angin. Perbaiki: menandai bukaan keran dan mengulang kalibrasi di akhir percobaan, menjepit ujung selang pada busur, mengukur ke pusat percikan, dan memilih waktu tanpa angin.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang pengaruh sudut semprot terhadap jangkauan, sudut jangkauan terjauh, dan pasangan sudut yang memberi jangkauan sama. Sertakan rumusnya dan bukti dari data.

💡 Refleksi

- Bagian yang paling menggembarakan dari percobaan ini adalah ...
- Ramalanku yang paling meleset adalah ..., kemungkinan karena ...
- Setelah ini, saat menyiram tanaman atau melihat air mancur, aku akan memperhatikan ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak bisa basah-basahan? Pakai Lab Mini "Penyiram taman: cari dua sudut yang mengenai pot" di Bab 5 (subbab 5.3). Atur kecepatan air 6 m/s, lalu ubah sudut θ menjadi 15° , 30° , 45° , 60° , dan 75° . Catat angka "Jangkauan θ " sebagai R (ketiga kolom R boleh diisi angka yang sama). Lewati baris kalibrasi karena v_0 sudah diketahui dari slider. Nyalakan "Pasangan $90^\circ - \theta$ " dan "Lintasan 45° " untuk memeriksa sudut kembar, lalu tekan Pindahkan pot dan cari dua sudut yang mengenainya. Bandingkan: mengapa di Lab Mini pasangan sudut memberi jangkauan yang persis sama?

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b5-3

Contoh data (bukaan keran tetap, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

Percobaan	θ ($^\circ$)	$\sin 2\theta$	R_1 (m)	R_2 (m)	R_3 (m)	R rata-rata (m)	R ramalan (m)
Kalibrasi	0 (mendatar, $h = 1,00 \text{ m}$)	—	2,69	2,62	2,68	2,66	—
1	15	0,500	1,84	1,77	1,83	1,81	1,77
2	30	0,866	3,05	3,14	3,12	3,10	3,06
3	45	1,000	3,59	3,52	3,49	3,53	3,54
4	60	0,866	3,10	3,03	3,01	3,05	3,06
5	75	0,500	1,72	1,79	1,77	1,76	1,77

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Bukaan keran dijaga tetap, sudut diatur dengan busur, setiap sudut diukur 3 kali, kalibrasi dilakukan, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu sudut yang tidak diulang atau kalibrasi kurang cermat.	Bukaan keran berubah di tengah percobaan atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap dengan satuan; v_0 , $\sin 2\theta$, R rata-rata, dan R ramalan dihitung tepat.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau v_0 salah dihitung.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Kedua grafik rapi; sudut terjauh dan sudut kembar ditemukan; kemiringan R-sin 2θ ditafsirkan sebagai v_0^2/g ; pengaruh hambatan udara dijelaskan.	Grafik benar tetapi penafsiran kemiringan atau hambatan udara kurang lengkap.	Grafik salah skala atau pola tidak dikenali.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (45° terjauh, θ dan $90^\circ - \theta$ kembar), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Pilih pagi hari yang tidak berangin agar halaman cepat kering. Tekanan air keran bisa naik-turun; minta siswa mengulang kalibrasi di akhir percobaan untuk memeriksa apakah v_0 berubah. Pancaran yang terlalu deras cepat pecah menjadi butiran dan sangat dipengaruhi udara, jadi pilih bukaan keran sedang (jangkauan 45° sekitar 3–4 m). Untuk siswa SMP, cukup pertanyaan 1, 2, dan 6; pertanyaan 3–5 untuk SMA. Kegiatan ini juga bisa memakai botol semprot tanaman bertekanan atau pistol air mainan.

Physicspedia · LKPD Bab 5 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Mobil-Mobilan Ditarik Baut: Membuktikan Hukum II Newton

Bab 6 • Hukum Newton tentang Gerak

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 8–9 dan SMA kelas X–XI

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara gaya tarik dan percepatan sebuah troli bermassa tetap.
- Peserta didik dapat menghitung percepatan dari data jarak dan waktu memakai $a = 2s/t^2$.
- Peserta didik dapat menafsirkan kemiringan grafik $a-F$ sebagai kebalikan massa total sistem.
- Peserta didik dapat menjelaskan peran variabel kontrol dan sumber galat dalam percobaan.

Fenomena



Raka membantu Pak Udin mendorong gerobak bakso di kompleks. Saat gerobak masih kosong, gerobak cepat sekali melaju. Setelah penuh mangkuk dan kuah, dorongan yang sama terasa "tidak berasa". Sari penasaran: "Kalau massanya dibuat tetap, apakah percepatan naik sebanding dengan gaya dorong?" Kak Nara menantang kelompokmu membuktikannya dengan mobil-mobilan, benang, dan beberapa baut. Tarsi siap mencatat setiap angka!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara gaya tarik F dan percepatan a sebuah troli jika massa total sistem dibuat tetap?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Gaya tarik F (berat beban yang tergantung)	Percepatan troli a	Massa total sistem (troli + semua baut + gelas), jarak tempuh 1,00 m, permukaan meja yang sama

Alat dan bahan

- 1 mobil-mobilan atau troli mainan beroda yang bisa meluncur lurus (± 200 – 400 g)
- Benang kasur $\pm 1,5$ m dan 1 gelas plastik kecil (gelas air mineral) sebagai wadah beban
- 5 baut/mur yang masing-masing ± 10 g (timbang dengan timbangan dapur digital)
- Meja datar $\pm 1,5$ m, penggaris atau meteran, dan selotip untuk menandai garis start dan finis
- Pensil/sedotan yang dipasang di tepi meja sebagai "katrol" (atau katrol kecil bila ada)
- Stopwatch di HP dan timbangan dapur digital

Keselamatan

Pastikan gelas beban tidak jatuh menimpa kaki: beri bantalan (kardus/handuk) di lantai di bawah gelas. Tangkap mobil-mobilan sebelum jatuh dari meja. Jangan berdiri di atas kursi. Kembalikan baut ke wadahnya agar tidak berserakan.

Langkah kerja

1. Timbang troli, gelas, dan setiap baut. Catat massanya. Tandai garis start dan garis finis berjarak $s = 1,00$ m di atas meja.
2. Ikat benang ke ujung depan troli, lewatkan di atas pensil/katrol di tepi meja, lalu ikat gelas di ujung lainnya sehingga gelas tergantung bebas.
3. Letakkan ke-5 baut di atas troli. Inilah kunci percobaan: massa total sistem tidak boleh berubah.
4. Percobaan 1: pindahkan 1 baut dari troli ke dalam gelas. Tahan troli di garis start, lepaskan bersamaan dengan menekan stopwatch, dan hentikan stopwatch saat ujung troli melewati garis finis.
5. Ulangi pengukuran waktu 3 kali (t_1, t_2, t_3), lalu hitung rata-ratanya.
6. Percobaan 2–5: pindahkan baut berikutnya dari troli ke gelas satu per satu (2, 3, 4, lalu 5 baut di gelas). Ulangi langkah 4–5 untuk setiap percobaan.
7. Hitung gaya tarik $F = m_{\text{gantung}} g$ (dengan $m_{\text{gantung}} = \text{gelas} + \text{baut di dalamnya}$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$) dan percepatan $a = 2s/t^2$ untuk setiap percobaan.
8. Gambar grafik a (sumbu tegak) terhadap F (sumbu mendatar) di kertas milimeter, lalu tarik garis lurus terbaik.

Tabel pengamatan ($s = 1,00$ m)

Percobaan	m gantung (kg)	$F = mg$ (N)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$a = 2s/t^2$ (m/s ²)
1							
2							
3							
4							
5							

Grafik

Grafik percepatan a (sumbu tegak) terhadap gaya tarik F (sumbu mendatar). Tarik satu garis lurus terbaik yang melewati sebanyak mungkin titik.

Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik a – F yang kamu peroleh? Apakah tebakan (hipotesis) kelompokmu terbukti?

Kunci: Grafik berupa garis lurus naik: percepatan sebanding dengan gaya tarik bila massa total tetap ($a \propto F$). Hipotesis "makin besar gaya, makin besar percepatan, secara sebanding" terbukti.

2. Hitung kemiringan (gradien) garis grafikmu. Besaran apa yang ditunjukkan oleh kebalikan kemiringan itu? Bandingkan dengan hasil penimbangan massa total sistem.

Kunci: Kemiringan grafik = $\Delta a / \Delta F = 1/M$. Contoh: kemiringan $\pm 2,8 \text{ kg}^{-1}$ memberi $M \approx 0,36 \text{ kg}$, hampir sama dengan massa troli + 5 baut + gelas yang ditimbang. Selisih kecil berasal dari galat waktu dan gesekan.

3. Grafikmu kemungkinan memotong sumbu F sedikit di kanan titik nol. Apa artinya secara fisika?

Kunci: Perpotongan di $F \approx 0,05\text{--}0,07 \text{ N}$ menunjukkan gaya gesek. Gaya tarik harus melebihi gesekan dulu sebelum troli dipercepat, sehingga $a = (F - f)/M$.

4. Mengapa baut dipindahkan dari troli ke gelas, bukan ditambahkan dari luar? Apa yang terjadi pada grafik jika baut ditambahkan dari luar?

Kunci: Agar massa total yang dipercepat tetap (variabel kontrol). Jika baut ditambahkan dari luar, massa total ikut bertambah sehingga titik-titik grafik melengkung (makin landai), dan kita tidak bisa menguji $a \propto F$ secara adil.

5. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: waktu reaksi saat menekan stopwatch ($\pm 0,1\text{--}0,2 \text{ s}$), lintasan troli tidak lurus, gesekan pensil sebagai katrol. Perbaikan: rekam video dengan HP lalu baca waktunya dari rekaman, pakai lintasan lebih panjang, atau ganti pensil dengan katrol beroda.

6. Hubungkan hasil percobaanmu dengan gerobak bakso Pak Udin dan ojek yang membonceng dua penumpang.

Kunci: Gerobak penuh (massa besar) dipercepat lebih lambat untuk dorongan yang sama; ojek yang membonceng dua orang lebih lambat menambah kecepatan. Keduanya mengikuti $a = \Sigma F/m$.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan gaya total, massa, dan percepatan dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaannya.

💡 Refleksi

- Bagian percobaan yang paling seru bagiku adalah ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang gaya dan percepatan adalah ...
- Satu contoh Hukum II Newton yang kutemui di perjalanan ke sekolah adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Lab katrol" di Bab 6 (subbab 6.6): pilih susunan meja + beban gantung, buat $\mu = 0$, lalu ubah massa B sambil menjaga jumlah massa A + B tetap (misalnya selalu 5 kg). Catat percepatan yang ditampilkan dan isi tabel yang sama.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b6-3

 Contoh data (gelas 10 g, tiap baut 10 g; M total = 0,36 kg; gesekan $\pm 0,06$ N)

Percobaan	m gantung (kg)	F = mg (N)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t rata-rata (s)	a = 2s/t ² (m/s ²)
1	0,02	0,196	2,34	2,35	2,30	2,33	0,37
2	0,03	0,294	1,73	1,70	1,77	1,73	0,67
3	0,04	0,392	1,47	1,50	1,46	1,48	0,92
4	0,05	0,490	1,31	1,28	1,32	1,30	1,18
5	0,06	0,588	1,18	1,16	1,17	1,17	1,46

 Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, massa total dijaga tetap, pengukuran diulang 3 kali, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang tidak diulang atau kurang rapi.	Massa total tidak dijaga tetap atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, F dan a dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau rumus $a = 2s/t^2$ salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi (sumbu, satuan, skala tepat), garis terbaik ditarik, kemiringan dihitung dan ditafsirkan sebagai $1/M$.	Grafik benar tetapi penafsiran kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($a = \Sigma F/m$), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

 Catatan guru

Mobil-mobilan dengan roda yang berputar bebas memberi hasil terbaik. Bila waktu tempuh terlalu singkat (< 1 s), kurangi jumlah baut di gelas atau perpanjang lintasan. Diskusikan mengapa grafik tidak tepat melalui (0, 0): ini pintu masuk yang bagus ke Bab 7 (gesekan).

Papan Miring Penguji Sandal: Mengukur Koefisien Gesek Statis

Bab 7 • Gesekan & Gerak Melingkar

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas X-XI (Bagian A dapat disederhanakan untuk SMP kelas 8)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Prediksi – Observasi – Eksplanasi (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menentukan sudut kritis θ_c sebuah benda di bidang miring dan menghitung koefisien gesek statis $\mu_s = \tan \theta_c$.
- Peserta didik dapat menguji apakah sudut kritis bergantung pada massa benda dengan mengendalikan variabel lain.
- Peserta didik dapat membandingkan koefisien gesek statis berbagai pasangan permukaan dan mengaitkannya dengan keselamatan sehari-hari.
- Peserta didik dapat mengidentifikasi sumber galat dan mengusulkan perbaikan prosedur percobaan.

Fenomena



Selepas hujan, Raka berjalan di turunan jalan menuju sekolah dengan sandal jepit yang solnya sudah halus. Ia hampir terpeleset, sementara Sari yang memakai sepatu bersol karet berjalan santai. "Kalau badanku lebih berat, pasti lebih mantap menapak," kata Raka. Sari ragu. Kak Nara menantang kelompokmu: "Seberapa curam sebuah lereng sebelum benda mulai tergelincir, dan apakah benda yang lebih berat lebih tahan?" Tarsi sudah menyiapkan papan, kotak, dan potongan sandal bekas untuk menyelidikinya!

Rumusan masalah

Bagaimana pengaruh massa benda dan jenis permukaan terhadap sudut kritis θ_c (sudut saat benda tepat mulai meluncur), dan berapa koefisien gesek statis μ_s setiap pasangan permukaan?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Bagian A: massa kotak. Bagian B: jenis permukaan alas kotak (karton, karet sandal, kertas amplas, selotip bening).	Tinggi h titik ukur papan saat kotak mulai meluncur, sehingga diperoleh sudut kritis θ_c dan μ_s	Papan yang sama, titik ukur $L = 50,0$ cm dari ujung bawah papan, posisi awal kotak, dan cara menaikkan papan (pelan dan rata). Pada Bagian A jenis alas tetap; pada Bagian B massa kotak hampir tetap.

Alat dan bahan

- 1 papan triplek atau papan kayu ± 60 cm $\times$ 15 cm yang rata (atau map plastik tebal yang kaku)
- 1 kotak kecil bekas kemasan (misalnya kotak pasta gigi) atau balok kayu kecil ± 5 $\times$ 8 $\times$ 3 cm

- Koin atau baut sebagai beban tambahan, total ± 200 g, dan timbangan dapur digital
- Bahan pelapis alas kotak seukuran alasnya: potongan karet sandal jepit bekas, kertas amplas halus, dan selotip bening
- Penggaris 30 cm atau meteran, spidol, selotip kertas, dan tumpukan buku sebagai penahan
- Kalkulator HP (fungsi $\sin^{-1}$ dan $\tan$) atau aplikasi pengukur sudut (inklinometer) di HP

⚠ Keselamatan

Amplas atau bungkus tepi papan triplek dengan selotip agar tidak bertatal, karena serpihan kayu dapat menusuk jari. Potong karet sandal dengan gunting di bawah pengawasan guru; jangan memakai cutter sendiri. Pasang buku atau handuk di ujung bawah papan agar kotak berisi koin tidak meluncur jatuh ke kaki. Angkat papan dengan dua tangan dan jangan sampai papan terlepas.

📋 Langkah kerja

1. Tandai papan dengan selotip kertas: ujung bawah (engsel) dan titik ukur $L = 50,0$ cm dari ujung bawah. Bersihkan papan dari debu, lalu timbang kotak kosong.
2. Letakkan papan mendatar di meja dan tahan ujung bawahnya dengan tumpukan buku agar tidak bergeser saat ujung atas diangkat. Letakkan kotak (alas karton polos) di dekat ujung atas, selalu di posisi yang sama.
3. Bagian A: angkat ujung atas papan perlahan dan rata (± 1 cm per detik) sampai kotak tepat mulai meluncur. Tahan papan, lalu ukur tinggi sisi bawah papan di titik ukur dari permukaan meja. Itulah h .
4. Ulangi 3 kali (h_1, h_2, h_3), lalu hitung rata-ratanya.
5. Masukkan koin atau baut ± 100 g ke dalam kotak (rekatkan agar tidak bergeser), timbang, lalu ulangi langkah 3–4. Lakukan lagi dengan beban ± 200 g.
6. Bagian B: kosongkan kotak, lapisi alasnya dengan karet sandal, lalu ulangi langkah 3–4. Ganti lapisan dengan kertas amplas, lalu dengan selotip bening.
7. Pengamatan bonus: begitu kotak mulai meluncur, turunkan papan sedikit. Apakah kotak tetap meluncur pada sudut yang lebih kecil daripada θ_c ?
8. Hitung sudut kritis $\theta_c = \sin^{-1}(h/L)$ dan koefisien gesek statis $\mu_s = \tan \theta_c$ dengan kalkulator HP. Jika memakai aplikasi inklinometer, baca θ_c langsung dan bandingkan hasilnya.

📋 Tabel pengamatan ($L = 50,0$ cm)

Percobaan	Massa kotak (g)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h rata-rata (cm)	θ_c (°)	$\mu_s = \tan \theta_c$
A1 • alas karton, kotak kosong							
A2 • alas karton, +100 g							
A3 • alas karton, +200 g							
B1 • alas karet sandal							
B2 • alas kertas amplas							
B3 • alas selotip bening							

Grafik

Bagian A: grafik μ_s (sumbu tegak, mulai dari 0) terhadap massa kotak (sumbu mendatar). Bagian B: diagram batang μ_s untuk keempat jenis alas (karton dari A1, karet sandal, kertas amplas, selotip bening).

Analisis

1. Bandingkan nilai μ_s pada percobaan A1–A3. Apakah sudut kritis bergantung pada massa kotak? Apakah hipotesis kelompokmu (dan dugaan Raka) terbukti?

Kunci: Nilai μ_s pada A1–A3 hampir sama (contoh: 0,42; 0,43; 0,41). Perbedaannya kecil dan acak, tidak naik seiring massa. Jadi sudut kritis tidak bergantung pada massa, dan dugaan Raka tidak terbukti. Benda berat memang ditarik lereng lebih kuat, tetapi juga menekan permukaan lebih kuat, sehingga gesekan maksimumnya ikut membesar dengan perbandingan yang sama.

2. Gambarlah diagram benda bebas kotak saat tepat akan meluncur. Tunjukkan dengan persamaan bahwa $\tan \theta_c = \mu_s$ dan bahwa massa kotak saling meniadakan.

Kunci: Gaya pada kotak: berat mg (ke bawah), gaya normal N (tegak lurus papan), dan gesekan statis f_s (sejajar papan, ke atas lereng). Tegak lurus papan: $N = mg \cos \theta$. Sejajar papan saat tepat akan meluncur: $mg \sin \theta_c = f_{s,\text{maks}} = \mu_s mg \cos \theta_c$. Bagi kedua ruas dengan $mg \cos \theta_c$: $\tan \theta_c = \mu_s$. Massa m (dan g) saling meniadakan.

3. Urutkan keempat permukaan dari μ_s terbesar ke terkecil. Mengapa karet sandal paling "mencengkeram", dan mengapa sandal bersol halus berbahaya di turunan yang basah?

Kunci: Contoh urutan: karet sandal ($\pm 0,79$) > kertas amplas ($\pm 0,62$) > karton ($\pm 0,42$) > selotip bening ($\pm 0,30$). Karet bersifat lentur sehingga mengisi lekuk-lekuk kecil permukaan dan bidang sentuh mikroskopisnya luas; cengkeramannya kuat. Sol yang sudah halus ditambah lapisan air membuat μ_s kecil, sehingga sudut kritisnya kecil: turunan yang landai pun cukup untuk membuat kaki tergelincir.

4. Pada pengamatan bonus (langkah 7), kotak yang sudah meluncur tetap meluncur walaupun papan sedikit diturunkan. Apa artinya tentang μ_k dibandingkan μ_s ?

Kunci: Kotak yang sudah bergeser mengalami gesekan kinetis, yang lebih kecil daripada gesekan statis maksimum: $\mu_k < \mu_s$. Karena itu kotak tetap meluncur pada sudut yang lebih kecil daripada θ_c . Sudut tempat kotak meluncur dengan kecepatan tetap memenuhi $\tan \theta = \mu_k$.

5. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh galat: papan dinaikkan dengan sentakan sehingga kotak meluncur terlalu awal; h dibaca saat papan bergoyang; permukaan papan berdebu atau tidak rata; kotak tidak selalu diletakkan di posisi yang sama. Perbaikan: naikan papan sangat pelan (misalnya dengan menyisipkan buku tipis satu per satu), ulangi lebih banyak, bersihkan papan, atau ukur sudut dengan aplikasi inklinometer.

6. Tumpukan pasir kering di toko bangunan selalu membentuk kerucut dengan kemiringan 30–35°. Perkirakan koefisien gesek statis antarbutir pasir, lalu jelaskan mengapa lereng yang basah oleh hujan lebih mudah longsor.

Kunci: $\mu_s = \tan 30^\circ$ sampai $\tan 35^\circ$, yaitu $\pm 0,58$ – $0,70$. Air hujan yang meresap membuat butiran lebih mudah tergelincir satu sama lain (μ efektif turun) dan menambah berat tanah, sehingga sudut kritis lereng mengecil. Lereng yang tadinya aman bisa melampaui sudut kritisnya dan longsor.

7. Sari menduga μ_s bergantung pada luas bidang sentuh. Rancang percobaan singkat dengan alat yang sama untuk menguji dugaan itu, lengkap dengan variabelnya.

Kunci: Contoh rancangan: lapis sisi lebar (8×5 cm) dan sisi sempit (5×3 cm) kotak dengan bahan yang sama (misalnya selotip bening), lalu ukur θ_c saat kotak diletakkan rebah dan saat diletakkan miring di atas sisi sempitnya. Variabel bebas: luas bidang sentuh; terikat: θ_c (atau μ_s); kontrol: massa kotak, bahan alas, papan, dan cara menaikkan papan. Model gesekan sederhana meramalkan θ_c hampir sama, karena gesekan bergantung pada μ_s dan gaya normal, bukan pada luas.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang pengaruh massa dan jenis permukaan terhadap sudut kritis, lengkap dengan persamaan $\tan \theta_c = \mu_s$ serta nilai μ_s terbesar dan terkecil yang kamu peroleh.

💡 Refleksi

- Momen paling menegangkan saat menunggu kotak meluncur adalah ...
- Sekarang aku tahu bahwa dugaan "benda berat lebih tahan tergelincir" itu ...
- Satu kebiasaan baruku agar tidak terpeleset di jalan licin adalah ...

🖨️ Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Bidang miring: kapan balok mulai meluncur?" di Bab 7 (subbab 7.2). Geser sudut kemiringan ke 0° , pilih pasangan permukaan, lalu tekan **Naikkan sudut perlahan** dan catat sudut saat balok mulai meluncur. Bagian A: ulangi untuk massa balok 1 kg, 5 kg, dan 10 kg dengan permukaan kayu. Bagian B: ulangi untuk keempat pasangan permukaan. Isi kolom θ_c dan μ_s ; kolom h dapat dihitung balik dengan $h = L \sin \theta_c$.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b7-2

📊 Contoh data (L = 50,0 cm; papan triplek)

Percobaan	Massa kotak (g)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h rata-rata (cm)	θ_c (°)	$\mu_s = \tan \theta_c$
A1 • alas karton, kotak kosong	58	19,1	19,6	19,5	19,4	22,8	0,42
A2 • alas karton, +100 g	158	20,0	19,6	20,1	19,9	23,5	0,43
A3 • alas karton, +200 g	258	19,1	19,3	18,7	19,0	22,3	0,41
B1 • alas karet sandal	66	31,1	30,6	31,0	30,9	38,2	0,79
B2 • alas kertas amplas	61	26,1	26,6	26,4	26,4	31,9	0,62
B3 • alas selotip bening	59	14,6	14,3	14,2	14,4	16,7	0,30

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Papan dinaikkan pelan dan rata, posisi awal kotak selalu sama, setiap pengukuran diulang 3 kali, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang tidak diulang atau papan sesekali disentak.	Variabel kontrol tidak dijaga (posisi kotak atau titik ukur berubah-ubah) atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, θ_c dan μ_s dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang, atau fungsi $\sin^{-1}$ dan $\tan$ tertukar sehingga μ_s salah.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik dan diagram batang rapi, kesimpulan "tidak bergantung massa" didukung data, dan $\tan \theta_c = \mu_s$ diturunkan dari diagram benda bebas.	Grafik benar, tetapi penurunan rumus kurang lengkap.	Grafik salah skala atau analisis hanya menyalin angka.	Grafik dan analisis tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat, menyebut nilai μ_s , galat, dan kaitannya dengan keselamatan sehari-hari.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Hasil terbaik diperoleh bila papan dinaikkan sangat pelan, misalnya dengan menyisipkan buku tipis satu per satu di bawah ujung atas papan. Kotak yang terlalu ringan kadang "melompat"; isi dengan sedikit pasir agar alasnya menapak rata. Perbedaan μ_s antarkelompok sampai $\pm 10\%$ wajar dan bagus untuk diskusi galat acak. Pertanyaan 7 dapat dijadikan tugas lanjutan. Jembatani hasilnya ke subbab 7.2 (longsor) dan 7.3 (sol bergerigi, rem ABS).

Kelereng Meluncur dari Selang: Ke Mana Perginya Energi Potensial?

Bab 8 • Usaha, Energi & Daya

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas X-XI

2 x 45 menit

Model: Discovery learning: amati – ukur – temukan pola – ramalkan – uji

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengukur kelajuan kelereng di ujung lintasan dari jarak jatuhnya dengan $v = x\sqrt{g/(2H)}$.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan kuadrat kelajuan v^2 dengan tinggi pelepasan h dan menafsirkan kemiringan grafiknya.
- Peserta didik dapat membandingkan hasil ukur dengan ramalan kekekalan energi mekanik $v = \sqrt{2gh}$ dan menjelaskan ke mana selisih energinya pergi.
- Peserta didik dapat memakai grafik untuk meramalkan hasil percobaan baru, lalu mengujinya.

Fenomena



Di taman bermain, Raka meluncur dari perosotan setinggi 2 m dan menghitung dengan rumus Bab 8: seharusnya ia tiba di bawah dengan kelajuan $\sqrt{2gh} \approx 6,3$ m/s. "Kok rasanya tidak secepat itu?" protesnya. Sari curiga ada energi yang "bocor". Kak Nara mengusulkan percobaan yang lebih mudah diukur: kelereng meluncur di dalam selang, lalu terbang dari tepi meja. Dari jarak jatuhnya, kelajuan kelereng bisa dihitung. Tarsi siap dengan kertas karbon untuk menangkap jejak setiap pendaratan!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara tinggi pelepasan h dan kelajuan kelereng v di ujung lintasan, dan berapa bagian energi potensial yang benar-benar berubah menjadi energi kinetik gerak lurus kelereng?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Tinggi pelepasan h di atas ujung lintasan	Jarak jatuh mendatar x , sehingga diperoleh kelajuan v di ujung lintasan	Kelereng yang sama, bentuk lintasan, tinggi ujung lintasan dari lantai H , ujung lintasan yang mendatar, dan kelereng dilepas tanpa didorong

Alat dan bahan

- 1 kelereng kaca (diameter $\pm 1,6$ cm)
- Selang air bening $\frac{3}{4}$ inci (diameter dalam ± 19 mm) sepanjang $\pm 1,2$ m, atau talang plastik kecil
- Meja setinggi ± 80 cm, tumpukan buku sebagai penyangga, dan lakban
- Meteran 2 m dan penggaris 30 cm
- 2 lembar kertas HVS dan kertas karbon (atau tepung yang ditabur tipis) untuk menandai titik jatuh
- Unting-unting: benang ± 1 m yang diberi mur di ujungnya
- Spidol dan kalkulator HP

⚠ Keselamatan

Kelereng yang menggelinding di lantai bisa membuat orang terpeleset: pasang kardus sebagai pagar di sekitar tempat jatuh dan segera ambil kelereng setelah setiap percobaan. Jangan berdiri di atas kursi atau meja untuk memasang lintasan. Potong selang dengan gunting di bawah pengawasan guru. Pastikan tidak ada teman yang berdiri di jalur jatuhnya kelereng.

📋 Langkah kerja

1. Rekatkan selang ke tumpukan buku sehingga membentuk lintasan yang melengkung mulus. Bagian akhir selang (± 10 cm) harus mendatar dan ujungnya tepat di tepi meja. Cek kedataran dengan menaruh kelereng diam di bagian itu: kelereng tidak boleh menggelinding sendiri.
2. Ukur tinggi ujung lintasan dari lantai H (sampai dasar kelereng di ujung selang). Gantungkan unting-unting dari ujung selang dan tandai titik O di lantai tepat di bawahnya.
3. Tandai lima titik pelepasan pada selang dengan spidol, yaitu titik yang tingginya $h = 0,10; 0,20; 0,30; 0,40;$ dan $0,50$ m di atas ujung lintasan (ukur tegak dengan meteran).
4. Lepaskan kelereng dari tanda $h = 0,10$ m tanpa didorong dan amati kira-kira di mana kelereng jatuh. Rekatkan kertas HVS di tempat itu, lalu letakkan kertas karbon di atasnya.
5. Lepaskan lagi kelereng dari tanda yang sama sebanyak 3 kali. Ukur jarak mendatar x dari titik O ke setiap bekas jatuh, lalu hitung rata-ratanya.
6. Ulangi langkah 4–5 untuk keempat tinggi pelepasan lainnya.
7. Hitung kelajuan di ujung lintasan $v = x\sqrt{g/(2H)}$ dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, lalu hitung v^2 dan kelajuan ramalan $\sqrt{2gh}$.
8. Buat grafik v^2 terhadap h . Setelah itu, kerjakan pertanyaan 5: ramalkan tinggi pelepasan untuk jarak jatuh $1,20$ m, lalu uji ramalanmu.

📋 Tabel pengamatan ($H = \dots$ m)

Percobaan	h (m)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x rata-rata (m)	$v = x\sqrt{g/(2H)}$ (m/s)	v^2 (m^2/s^2)	$\sqrt{2gh}$ (m/s)
1								
2								
3								
4								
5								

📊 Grafik

Grafik v^2 (sumbu tegak) terhadap h (sumbu mendatar). Tarik garis lurus terbaik, lalu gambar juga garis ramalan $v^2 = 2gh$ (kemiringan $19,6 \text{ m/s}^2$) pada grafik yang sama sebagai pembanding.

🧠 Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik v^2 terhadap h ? Apa arti fisisnya dalam bahasa energi?

Kunci: Grafiknya berupa garis lurus yang melalui titik asal: $v^2 \propto h$. Artinya energi kinetik di ujung lintasan ($\frac{1}{2}mv^2$) sebanding dengan energi potensial yang dilepaskan (mgh). Menggandakan tinggi menggandakan energi kinetik, bukan menggandakan kelajuan.

2. Hitung kemiringan grafismu dan bandingkan dengan $2g = 19,6 \text{ m/s}^2$. Berapa persen energi potensial kelereng yang berubah menjadi energi kinetik gerak lurus (translasi)?

Kunci: Contoh: kemiringan $\approx 13,3 \text{ m/s}^2$, jauh di bawah $2g = 19,6 \text{ m/s}^2$. Persentasenya $13,3/19,6 \approx 68\%$: hanya $\pm 68\%$ energi potensial yang menjadi energi kinetik translasi.

3. Ke mana perginya sisa energi potensial itu? Apakah hukum kekekalan energi dilanggar? (Petunjuk: kelereng menggelinding sambil berputar.)

Kunci: Energi tidak hilang, jadi hukum kekekalan energi tidak dilanggar. Kelereng menggelinding, sehingga sebagian energi menjadi energi kinetik **rotasi**. Untuk bola pejal yang menggelinding tanpa selip, bagian rotasinya $\frac{2}{7} \approx 29\%$ (dibahas di Bab 10), sehingga bagian translasinya paling banyak $\pm 71\%$. Sisa $\pm 3\%$ berubah menjadi kalor dan bunyi akibat gesekan dengan dinding selang, benturan kecil, dan hambatan udara.

4. Mengapa jarak jatuh x dapat dipakai untuk menghitung v , dan mengapa ujung lintasan harus benar-benar mendatar?

Kunci: Setelah meninggalkan ujung yang mendatar, kelereng bergerak parabola (Bab 5). Waktu jatuhnya hanya bergantung pada H : $t = \sqrt{2H/g}$, sama untuk semua percobaan. Jarak mendatar $x = vt$, sehingga $v = x/t = x\sqrt{g/(2H)}$. Jika ujung lintasan miring, kecepatan awal punya komponen tegak sehingga waktu jatuhnya berubah dan rumus ini tidak berlaku.

5. Pakai kemiringan grafismu untuk meramalkan dari tinggi berapa kelereng harus dilepas agar jatuh sejauh 1,20 m dari titik O. Uji ramalanmu! Berapa selisihnya?

Kunci: Dari $x = v\sqrt{2H/g}$ dan $v^2 = sh$ (s = kemiringan grafik) diperoleh $h = \frac{x^2 g}{2Hs}$. Contoh: $h = \frac{1,20^2 \times 9,8}{2 \times 0,80 \times 13,3} \approx 0,66 \text{ m}$. Ramalan dari grafik biasanya meleset hanya beberapa sentimeter. Ramalan dengan $2g$ (tanpa memperhitungkan rotasi dan gesekan) meleset jauh, yaitu $h \approx 0,45 \text{ m}$.

6. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh galat: kelereng tidak selalu dilepas tepat di tanda atau tanpa sengaja terdorong; ujung lintasan tidak benar-benar mendatar; titik O kurang tepat; selang bergeser antarpercobaan; bekas karbon melebar. Perbaikan: tahan kelereng dengan penggaris lalu tarik penggarisnya, rekatkan lintasan lebih kuat, ulangi lebih banyak, dan cek kedataran ujung lintasan dengan waterpas atau aplikasi HP.

7. Kaitkan hasilmu dengan perosotan Raka dan roller coaster: mengapa bukit kedua roller coaster selalu dibuat lebih rendah daripada titik awalnya?

Kunci: Pada perosotan, sebagian energi potensial Raka berubah menjadi kalor karena gesekan, sehingga kelajuannya kurang dari $\sqrt{2gh}$. Kereta roller coaster juga kehilangan sebagian energi mekanik karena gesekan roda dan hambatan udara. Energi mekanik di puncak bukit kedua tidak mungkin melebihi energi yang tersisa, jadi bukit kedua harus lebih rendah daripada titik awal agar kereta masih bisa melewatinya.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan v^2 dan h , persentase energi potensial yang menjadi energi kinetik translasi, dan ke mana sisanya pergi. Sertakan persamaan kekekalan energi yang kamu pakai.

💡 Refleksi

- Saat kelereng mendarat tepat di tempat yang kuramalkan, aku merasa ...

- Bagian yang paling sulit kupahami tentang energi yang "hilang" adalah ...
- Contoh perubahan energi potensial menjadi energi kinetik yang kulihat minggu ini adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Taman skate energi: seret Raka, lalu lepaskan!" di Bab 8 (subbab 8.4). Pilih lintasan *Sisi curam vs sisi landai* (titik terendahnya 0,5 m) dan buat $\mu = 0$. Ketuk lintasan untuk memilih lima titik awal dengan tinggi berbeda, catat tinggi awalnya, lalu jalankan dan tekan **Jeda** saat Raka melewati titik terendah untuk membaca kelajuannya. Hitung h = tinggi awal – 0,5 m, lalu isi kolom h , v , v^2 , dan $\sqrt{2gh}$ (kolom x dikosongkan). Ulangi dengan $\mu = 0,05$: apa bedanya dengan kelereng sungguhan?

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b8-4

Contoh data ($H = 0,80$ m; kelereng kaca 1,6 cm; selang $\frac{3}{4}$ inci)

Percobaan	h (m)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x rata-rata (m)	$v = x\sqrt{g/2H}$ (m/s)	v^2 (m ² /s ²)	$\sqrt{2gh}$ (m/s)
1	0,10	0,470	0,460	0,469	0,466	1,15	1,33	1,40
2	0,20	0,655	0,667	0,658	0,660	1,63	2,67	1,98
3	0,30	0,814	0,804	0,810	0,809	2,00	4,01	2,42
4	0,40	0,930	0,941	0,927	0,933	2,31	5,33	2,80
5	0,50	1,048	1,036	1,047	1,044	2,58	6,68	3,13

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Perakitan lintasan & keselamatan	Lintasan mulus, ujungnya mendatar dan dicek dengan kelereng diam, titik O ditandai dengan unting-unting, setiap tinggi diulang 3 kali, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Lintasan dan pengukuran baik, tetapi ada satu tinggi yang tidak diulang atau titik O kurang tepat.	Ujung lintasan tidak mendatar atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, v , v^2 , dan $\sqrt{2gh}$ dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau rumus $v = x\sqrt{g/(2H)}$ salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & ramalan	Grafik rapi dengan garis terbaik dan garis ramalan $2gh$, kemiringan dihitung, dan ramalan jarak 1,20 m diuji serta dibahas selisihnya.	Grafik dan kemiringan benar, tetapi ramalan tidak diuji.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Penjelasan energi & komunikasi	Menjelaskan dengan tepat bahwa energi total kekal, menyebut energi rotasi dan kalor sebagai tujuan sisa energi, serta mengaitkannya dengan contoh nyata.	Penjelasan tepat tetapi hanya menyebut gesekan.	Penjelasan menyiratkan energi "hilang" begitu saja.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Selang bening memudahkan siswa melihat kelereng; talang plastik juga bisa dipakai asalkan kelereng tidak melompat keluar. Bagian ujung yang mendarat adalah kunci keberhasilan, jadi periksa dengan kelereng yang diam. Bila waktu terbatas, bagi tinggi pelepasan antarkelompok lalu gabungkan data kelas dalam satu grafik. Hasil $\pm 70\%$ adalah pintu masuk yang menarik ke energi kinetik rotasi di Bab 10 (subbab 10.6).

Physicspedia · LKPD Bab 8 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Tantangan Pelindung Telur: Menaklukkan Impuls

Bab 9 • Momentum, Impuls & Tumbukan

Proyek mini kelompok (tantangan rekayasa)

SMA kelas X-XI (dapat diadaptasi untuk SMP kelas 9)

2 × 45 menit (pembuatan pelindung dapat dimulai di rumah)

Model: Project-based learning (PjBL) singkat: tantangan – rancang – uji – perbaiki

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menghitung kelajuan telur saat menyentuh lantai $v = \sqrt{2gh}$ dan perubahan momentumnya $\Delta p = mv$.
- Peserta didik dapat mengukur lama benturan Δt dari video gerak lambat dan menghitung gaya rata-rata pada telur $F = \Delta p / \Delta t$.
- Peserta didik dapat menjelaskan dengan teorema impuls-momentum mengapa pelindung yang baik memperpanjang waktu benturan.
- Peserta didik dapat merancang, menguji, dan memperbaiki pelindung telur berdasarkan data.

Fenomena



Setiap hari, jasa ekspedisi di dekat rumah Sari mengirim paket telur asin dari Brebes ke berbagai kota. Paket itu sering terbanting saat dibongkar dari truk, tetapi telurnya tetap utuh. Raka heran: "Telur kan rapuh, kok bisa selamat?" Kak Nara menjawab dengan tantangan: rancanglah pelindung dari barang bekas agar sebutir telur mentah selamat dijatuhkan dari ketinggian 2 m, tanpa parasut! Tarsi siap merekam setiap benturan dengan video gerak lambat untuk mengukur berapa lama telur "dihentikan".

Rumusan masalah

Bagaimana rancangan pelindung memengaruhi lama benturan Δt dan gaya rata-rata pada telur, jika telur dijatuhkan dari ketinggian yang sama sehingga perubahan momentumnya sama?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Rancangan pelindung (pada uji lanjutan: tinggi jatuh h)	Lama benturan Δt , gaya rata-rata F , dan keadaan telur (utuh, retak, atau pecah)	Massa telur, jenis lantai, cara menjatuhkan (dilepas tanpa didorong), posisi dan kecepatan kamera, dan tanpa parasut

Alat dan bahan

- 2–3 butir telur ayam mentah per kelompok (± 60 g; timbang salah satunya)
- Bahan pelindung dari barang bekas: kardus, koran, spons cuci piring, kapas, sedotan, karet gelang, kantong plastik
- Aturan tantangan: pelindung paling besar $20 \times 20 \times 20$ cm, tanpa parasut atau baling-baling, dan telur dapat dikeluarkan untuk diperiksa
- Selotip, lakban, dan gunting
- Meteran 2 m yang ditempel tegak di dinding

- HP dengan mode video gerak lambat (*slow motion*) 120 atau 240 fps
- Alas plastik atau terpal untuk lantai, lap, dan sabun cuci tangan

⚠ Keselamatan

Telur mentah dapat mengandung bakteri *Salmonella*: jangan dimakan, segera bersihkan pecahan dengan lap, dan cuci tangan dengan sabun setelah praktik. Pasang alas plastik agar lantai tidak licin. Jatuhkan pelindung dari ketinggian paling tinggi 2 m sambil berdiri di lantai, atau dari tangga lipat yang dipegangi teman dan diawasi guru; jangan memanjat kursi atau meja. Pastikan tidak ada orang di bawah titik jatuh, dan gunakan gunting dengan hati-hati.

📋 Langkah kerja

1. Timbang satu telur (m). Tempel meteran tegak di dinding, lalu pasang alas plastik di lantai di depannya.
2. Rancang pelindung sesuai aturan tantangan. Gambar sketsanya dan tuliskan alasan pemilihan setiap bahan: bagian mana yang akan memperpanjang waktu benturan?
3. Uji kontrol (diperagakan guru): telur tanpa pelindung, di dalam kantong plastik, dijatuhkan dari 0,30 m ke lantai.
4. Letakkan HP pada posisi tetap setinggi lantai, ± 1 m dari titik jatuh, dengan meteran terlihat di layar. Mulai merekam dalam mode gerak lambat dan catat kecepatan kameranya (fps).
5. Uji 1: jatuhkan pelindung berisi telur dari $h = 1,0$ m (diukur dari dasar pelindung ke lantai) tanpa didorong. Buka pelindung dan periksa telurnya.
6. Putar ulang video frame demi frame. Hitung jumlah frame sejak pelindung pertama kali menyentuh lantai sampai berhenti tertekan. Lama benturan $\Delta t = \text{jumlah frame} \div \text{fps}$.
7. Jika telur utuh, ulangi dengan telur yang sama dari 1,5 m (uji 2), lalu dari 2,0 m (uji 3).
8. Hitung $v = \sqrt{2gh}$, $\Delta p = mv$, dan $F = \Delta p / \Delta t$. Diskusikan kelemahan desainmu, perbaiki, lalu uji lagi dari 2,0 m.

📊 Tabel pengamatan (m telur = ... kg; kecepatan kamera = ... fps)

Uji	h (m)	$v = \sqrt{2gh}$ (m/s)	$\Delta p = mv$ (N·s)	Jumlah frame benturan	Δt (s)	F rata-rata = $\Delta p / \Delta t$ (N)	Keadaan telur
Kontrol (tanpa pelindung)							
Desain awal · uji 1							
Desain awal · uji 2							
Desain awal · uji 3							
Desain perbaikan							

📈 Grafik

Diagram batang gaya rata-rata F untuk setiap uji. Tarik garis mendatar di sekitar 22 N sebagai perkiraan batas aman gaya rata-rata: pada benturan, gaya puncak kira-kira 1,5 kali gaya rata-rata, dan cangkang mulai retak pada gaya puncak ± 35 N (lihat Lab Mini subbab 9.2).

Analisis

1. Bandingkan Δp pada uji 3 dan desain perbaikan. Apakah Δp bergantung pada rancangan pelindung? Besaran apa saja yang menentukan Δp ?

Kunci: Δp pada uji 3 dan desain perbaikan sama, yaitu $\pm 0,376 \text{ N}\cdot\text{s}$, karena keduanya dijatuhkan dari 2,0 m. $\Delta p = m\sqrt{2gh}$ hanya bergantung pada massa telur dan tinggi jatuh, bukan pada rancangan pelindung. Yang diubah pelindung hanyalah **waktu** penghentiannya.

2. Telur kontrol pecah padahal Δp -nya paling kecil. Jelaskan dengan teorema impuls-momentum.

Kunci: Di lantai keras, telur berhenti dalam waktu kurang dari satu frame ($\Delta t < 0,0042 \text{ s}$). Dari $F = \Delta p / \Delta t$, waktu yang sangat singkat menghasilkan gaya rata-rata lebih dari 35 N (gaya puncaknya lebih besar lagi), melampaui kekuatan cangkang. Desain perbaikan menerima $\Delta p \pm 2,6$ kali lebih besar, tetapi Δt -nya lebih dari 6 kali lebih lama, sehingga gayanya hanya $\pm 15 \text{ N}$.

3. Pada uji 3, jumlah frame benturan turun drastis dan telur pecah. Apa yang terjadi pada bantalan? Perkirakan jarak pengereman telur $d \approx \frac{1}{2}v \Delta t$ pada desain perbaikan dan bandingkan dengan tebal bantalannya.

Kunci: Bantalan koran sudah tertekan habis (mentok) sebelum telur berhenti, sehingga sisa kecepatannya dihentikan mendadak oleh dasar kotak: Δt hanya $\pm 0,008 \text{ s}$ dan $F \approx 45 \text{ N}$. Pada desain perbaikan, $d \approx \frac{1}{2} \times 6,26 \times 0,025 \approx 0,08 \text{ m} = 8 \text{ cm}$, sesuai dengan tebal dua spons dan koran ($\pm 8\text{--}10 \text{ cm}$). Bantalan harus cukup tebal dan cukup lunak agar telur berhenti sepanjang jarak itu tanpa mentok.

4. Mengapa aturan tantangan melarang parasut? Besaran apa yang akan ikut berubah?

Kunci: Parasut memperlambat telur dengan hambatan udara, sehingga kelajuan saat menyentuh lantai tidak lagi $\sqrt{2gh}$ dan Δp ikut berubah. Tantangan ini ingin menguji satu hal saja, yaitu memperpanjang Δt dengan Δp yang sama (variabel kontrol).

5. Teman sekelompokmu mengusulkan bantalan dari bola karet yang sangat membal. Mengapa usul ini justru kurang baik?

Kunci: Benda yang memantul berbalik arah, sehingga perubahan momentumnya lebih besar, sampai $2mv$ untuk pantulan sempurna (ingat Awas Jebakan di subbab 9.2). Impuls dan gaya pada telur justru membesar. Bahan yang baik remuk perlahan dan tidak membal, sehingga menyerap energi.

6. Sebutkan dua sumber galat dalam pengukuran Δt dan F , dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh galat: resolusi kamera ($\pm 1 \text{ frame} = \pm 0,004 \text{ s}$ pada 240 fps, sangat besar jika Δt hanya 2–6 frame); frame awal dan akhir benturan sulit ditentukan; gerak telur di dalam pelindung tidak persis sama dengan gerak kotak; hambatan udara membuat v sedikit lebih kecil daripada $\sqrt{2gh}$; tinggi jatuh kurang tepat. Perbaikan: pakai fps tertinggi, letakkan kamera sejajar lantai dengan latar yang kontras, ulangi uji, dan minta dua orang menghitung frame secara terpisah.

7. Sebutkan tiga benda di sekitarmu yang bekerja dengan prinsip yang sama dengan pelindung telurmu, lalu jelaskan salah satunya.

Kunci: Contoh: helm berbusa, airbag dan zona remuk mobil, matras lompat tinggi, plastik gelembung (*bubble wrap*) pada paket, sarung tinju, dan lutut yang ditekuk saat mendarat. Semuanya memperpanjang waktu benturan sehingga gaya rata-rata $F = \Delta p / \Delta t$ mengecil.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan Δp , Δt , dan gaya rata-rata pada telur, lengkap dengan persamaannya dan ciri pelindung yang paling berhasil.

💡 Refleksi

- Saat membuka pelindung dan melihat telurnya, perasaanku ...
- Perbaikan desain yang paling berpengaruh menurut data kami adalah ...
- Mulai sekarang, aku akan selalu memakai helm dengan benar karena ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Lab jatuhkan telur: keramik, karpet, busa, atau kasur?" di Bab 9 (subbab 9.2). Anggap keempat permukaan sebagai empat rancangan pelindung. Untuk setiap permukaan, jatuhkan telur dari 0,5 m, 1,0 m, dan 2,0 m, lalu catat Δp , lama benturan, gaya rata-rata, gaya puncak, dan keadaan telur pada tabel yang sama (kolom jumlah frame diganti dengan lama benturan yang tertera). Permukaan "paling tipis" mana yang masih menyelamatkan telur dari 2,0 m?

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b9-2

📊 Contoh data (m telur = 0,060 kg; kamera 240 fps; desain awal: kotak kardus berisi koran remas; perbaikan: ditambah 2 spons cuci piring)

Uji	h (m)	$v = \sqrt{2gh}$ (m/s)	$\Delta p = mv$ (N·s)	Jumlah frame benturan	Δt (s)	F rata-rata = $\Delta p / \Delta t$ (N)	Keadaan telur
Kontrol (tanpa pelindung)	0,30	2,42	0,145	< 1	< 0,0042	> 35	pecah
Desain awal · uji 1	1,00	4,43	0,266	5	0,0208	12,8	utuh
Desain awal · uji 2	1,50	5,42	0,325	4	0,0167	19,5	utuh
Desain awal · uji 3	2,00	6,26	0,376	2	0,0083	45,1	pecah
Desain perbaikan	2,00	6,26	0,376	6	0,0250	15,0	utuh

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Rancangan & kreativitas	Rancangan memenuhi semua aturan, setiap bahan dipilih dengan alasan fisika (memperpanjang waktu benturan), dan sketsanya jelas.	Rancangan memenuhi aturan, tetapi alasan pemilihan bahan kurang lengkap.	Rancangan melanggar satu aturan atau tanpa sketsa dan alasan.	Rancangan tidak dibuat.
Pelaksanaan uji & keselamatan	Tinggi jatuh diukur tepat, video direkam dari posisi tetap, alas plastik dipasang, dan kebersihan serta keselamatan dijaga.	Uji berjalan baik, tetapi ada satu uji yang tidak terekam dengan jelas.	Tinggi jatuh atau posisi kamera berubah-ubah sehingga data sulit dibandingkan.	Uji tidak selesai atau keselamatan dan kebersihan diabaikan.
Data & perhitungan	Tabel lengkap, v , Δp , Δt , dan F dihitung tepat dengan satuan yang benar.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau jumlah frame tidak diubah menjadi detik.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Analisis, perbaikan desain & komunikasi	Perbaikan desain didasarkan pada data, hasilnya dijelaskan dengan $F = \Delta p / \Delta t$, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Analisis tepat tetapi perbaikan desain kurang didukung data.	Analisis sebagian tepat atau desain tidak diperbaiki.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Siapkan telur cadangan dan lap. Uji kontrol cukup diperagakan guru sekali. Jika HP siswa hanya punya mode 120 fps, satu frame setara 0,0083 s; tekankan bahwa galat relatifnya lebih besar, tetapi data kelas tetap bisa dibandingkan. Adakan "pameran desain" singkat: kelompok yang telurnya utuh dari 2,0 m menjelaskan rancangannya dengan bahasa impuls. Hubungkan hasilnya dengan Awes Jebakan di subbab 9.2 (benda yang memantul) dan kartu Fisika di Sekitarmu (helm, zona remuk).

Dacin Penggaris: Membuat Timbangan Pasar dengan Prinsip Momen

Bab 10 • Rotasi & Keseimbangan Benda Tegar

Eksperimen kelompok + rancang-bangun alat

SMP kelas 8–9 dan SMA kelas XI

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing berbasis STEM: rancang – kalibrasi – uji – perbaiki

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menerapkan syarat keseimbangan rotasi $\Sigma \tau = 0$ (prinsip momen) untuk membuat dan mengkalibrasi dacin sederhana.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan posisi anak timbangan x dengan massa beban M dan menafsirkan kemiringan grafiknya.
- Peserta didik dapat menilai ketelitian dacin buatan sendiri dengan membandingkannya terhadap timbangan digital.
- Peserta didik dapat merancang ulang dacin untuk rentang massa yang berbeda dengan mempertimbangkan untung-ruginya.

Fenomena



Di pasar tradisional, Bu Siti menimbang cabai dengan dacin: sebatang kayu yang digantung, satu kait untuk barang, dan satu anak timbangan kecil yang digeser-geser. Raka heran: "Kok anak timbangan sekecil itu bisa mengimbangi sekantong cabai?" Sari teringat jungkat-jungkit di Bab 10. Kak Nara menantang kelompokmu membuat dacin dari penggaris kayu, lalu membuktikan bahwa dacin buatanmu sejajar timbangan digital. Tarsi sudah menyiapkan sekantong beras untuk diuji!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara massa beban M dan posisi anak timbangan x pada dacin yang setimbang, dan seberapa teliti dacin buatan sendiri dibandingkan timbangan digital?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Massa beban di dalam wadah M	Jarak anak timbangan dari titik gantung x saat dacin setimbang mendatar	Massa anak timbangan $m_0 = 100$ g, jarak wadah dari titik gantung $a = 10,0$ cm, letak titik gantung, dan wadah yang sama

Alat dan bahan

- 1 penggaris kayu 100 cm (mistar papan tulis) atau bilah bambu lurus ± 1 m yang diberi skala cm
- Benang kasur $\pm 1,5$ m untuk menggantung penggaris, wadah, dan anak timbangan
- Wadah beban: kantong plastik kecil dengan pengait dari klip kertas (± 5 g)
- Anak timbangan: botol plastik kecil berisi pasir, tepat 100 g

- Beban kalibrasi: kantong berisi beras 100 g, 200 g, 300 g, dan 400 g
- Benda uji di bawah 450 g, misalnya telur ayam dan botol air minum penuh
- Timbangan dapur digital, gagang sapu yang diletakkan di antara dua kursi (atau statif), selotip, dan spidol

⚠ Keselamatan

Pastikan gagang sapu dan kursi kokoh agar dacin tidak jatuh menimpa kaki, dan beri alas kardus di lantai di bawah wadah beban. Jangan mengayun-ayunkan penggaris panjang di dekat wajah teman. Gunakan beban paling berat 500 g agar benang tidak putus. Jika memakai bilah bambu, amplas atau bungkus bagian yang bertatal.

📋 Langkah kerja

1. Cari titik berat penggaris dengan trik dua jari (subbab 10.3). Ikatkan benang tepat di titik itu, kunci dengan selotip, lalu gantungkan penggaris pada gagang sapu. Tanpa beban, penggaris harus mendatar sendiri.
2. Timbang wadah beban (m_w) dan anak timbangan (m_0) dengan timbangan dapur. Gantungkan wadah tepat $a = 10,0$ cm di kiri titik gantung dan kunci simpulnya dengan selotip.
3. Gantungkan anak timbangan di sisi kanan dengan simpul benang yang bisa digeser.
4. Dengan wadah kosong, geser anak timbangan sampai penggaris tepat mendatar dan diam. Ukur jarak x dari titik gantung ke benang anak timbangan.
5. Goyangkan sedikit penggaris, seimbangkan lagi, lalu ukur ulang. Lakukan 3 kali (x_1, x_2, x_3) dan hitung rata-ratanya.
6. Kalibrasi: masukkan beban 100 g, 200 g, 300 g, dan 400 g satu per satu ke dalam wadah, lalu ulangi langkah 4–5 untuk setiap beban.
7. Uji: timbang setiap benda uji dengan timbangan dapur, lalu dengan dacinmu (langkah 4–5).
8. Hitung massa menurut dacin $M_{\text{dacin}} = \frac{m_0 x}{a} - m_w$ dan selisihnya terhadap timbangan dapur dalam persen. Buat grafik x terhadap M dari data kalibrasi.

📄 Tabel pengamatan ($a = 10,0$ cm; $m_0 = \dots$ g; $m_w = \dots$ g)

Beban atau benda	M timbangan dapur (g)	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	x rata-rata (cm)	M dacin (g)	Selisih (%)
Wadah kosong							
Kalibrasi 100 g							
Kalibrasi 200 g							
Kalibrasi 300 g							
Kalibrasi 400 g							
Benda uji 1							
Benda uji 2							

📊 Grafik

Grafik posisi anak timbangan x (sumbu tegak) terhadap massa beban M (sumbu mendatar) dari data wadah kosong dan empat beban kalibrasi. Tarik garis lurus terbaik: garis inilah "skala" dacinmu.

Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik x - M ? Hitung kemiringannya dan bandingkan dengan a/m_0 .

Kunci: Grafiknya berupa garis lurus naik: x sebanding dengan M , ditambah tetapan kecil. Contoh kemiringan $\approx 0,100$ cm/g, sama dengan $a/m_0 = 10,0/100 = 0,10$ cm/g. Artinya setiap tambahan 10 g menggeser anak timbangan 1 cm.

2. Tuliskan persamaan kesetimbangan momen terhadap titik gantung. Mengapa berat penggaris tidak muncul dalam persamaan itu?

Kunci: Terhadap titik gantung: $(M + m_w) g a = m_0 g x$, sehingga $x = \frac{a}{m_0} (M + m_w)$. Penggaris digantung tepat di titik beratnya, jadi garis kerja beratnya melalui titik gantung: lengan momennya nol sehingga torsinya nol. Tegangan benang penggantung juga bekerja di titik gantung sehingga tidak menghasilkan torsi.

3. Garis grafikmu memotong sumbu tegak (saat $M = 0$) sedikit di atas nol. Apa penyebabnya?

Kunci: Wadah kosong pun bermassa m_w , sehingga anak timbangan sudah harus digeser sejauh $x_0 = a m_w / m_0$ (contoh: $10,0 \times 6/100 = 0,6$ cm). Perpotongan juga dapat bergeser jika titik gantung tidak tepat di titik berat penggaris.

4. Bandingkan hasil dacin dengan timbangan dapur untuk benda uji. Mengapa persentase selisihnya paling besar pada benda yang ringan?

Kunci: Contoh: telur 58 g terbaca ± 57 g (selisih $\pm 1,7\%$), sedangkan botol 345 g terbaca ± 346 g ($\pm 0,4\%$). Galat pembacaan posisi kira-kira tetap ($\pm 0,1$ – $0,2$ cm, setara ± 1 – 2 g), sehingga untuk benda ringan galat itu menjadi persentase yang lebih besar.

5. Bu Siti ingin menimbang beras sampai 2 kg dengan penggaris yang sama (anak timbangan paling jauh 48 cm dari titik gantung). Usulkan dua cara mengubah dacinmu, hitung ukurannya, dan sebutkan kerugiannya.

Kunci: Batas timbang $M_{\text{maks}} \approx \frac{m_0 x_{\text{maks}}}{a}$. Cara 1: perpendek jarak wadah menjadi $a \approx \frac{100 \times 48}{2000} \approx 2,4$ cm. Cara 2: perberat anak timbangan menjadi $m_0 \approx \frac{2000 \times 10}{48} \approx 420$ g. Kerugiannya sama: pergeseran 1 cm kini setara ± 42 g, sehingga ketelitian turun sekitar empat kali. Banyak dacin di pasar memiliki dua titik gantung untuk dua rentang timbangan.

6. Seorang pedagang curang memakai anak timbangan 90 g, padahal skala dacinnya dibuat untuk 100 g. Siapa yang dirugikan, kira-kira berapa persen, dan bagaimana pembeli dapat mengeceknya?

Kunci: Dengan anak timbangan lebih ringan, anak timbangan harus digeser lebih jauh untuk beban yang sama, sehingga skala menunjukkan massa yang lebih besar: $M_{\text{terbaca}} \approx \frac{100}{90} M \approx 1,11M$. Pembeli dirugikan $\pm 11\%$: membayar 1 kg tetapi hanya menerima $\pm 0,9$ kg. Pembeli dapat mengecek dengan menimbang barang yang massanya sudah diketahui, misalnya gula kemasan 1 kg. Karena itu timbangan pasar ditera ulang secara berkala oleh petugas metrologi legal.

7. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh galat: titik gantung tidak tepat di titik berat; sulit menentukan saat penggaris tepat mendarat; gesekan simpul benang di titik gantung; posisi wadah atau simpul bergeser; benang anak timbangan tidak tegak. Perbaiki: pakai paku kecil atau kawat sebagai poros, buat garis acuan mendarat di dinding di belakang penggaris, kunci simpul dengan selotip, dan ulangi pengukuran.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan x dan M pada dacin yang setimbang, lengkap dengan persamaan prinsip momen dan ketelitian dacinmu dibandingkan timbangan digital.

💡 Refleksi

- Hal paling seru saat membuat dacin sendiri adalah ...
- Setelah praktik ini, caraku memandang timbangan di pasar menjadi ...
- Satu hal tentang torsi dan kesetimbangan yang ingin kupelajari lebih dalam adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Jungkat-jungkit: seret, timbang, seimbangkan!" di Bab 10 (subbab 10.2). Biarkan titik tumpu di tengah papan (0 m), sehingga berat papan tidak menghasilkan torsi. Anggap karung beras (25 kg) sebagai anak timbangan. Letakkan benda yang "ditimbang" (Raka, Sari, Kak Nara, atau gabungan dua tokoh) 0,5 m di kiri titik tumpu, lalu geser karung beras di sisi kanan sampai muncul tulisan SEIMBANG. Catat jaraknya x , hitung massa benda dengan $M = m_{\text{beras}} x/a$ ($a = 0,5$ m), lalu bandingkan dengan massa yang tertera.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b10-2

📊 Contoh data ($a = 10,0$ cm; $m_0 = 100$ g; $m_w = 6$ g)

Beban atau benda	M timbangan dapur (g)	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	x rata-rata (cm)	M dacin (g)	Selisih (%)
Wadah kosong	0	0,5	0,8	0,6	0,63	0,3	–
Kalibrasi 100 g	100	10,8	10,5	10,9	10,73	101,3	+1,3
Kalibrasi 200 g	200	20,3	20,7	20,5	20,50	199,0	–0,5
Kalibrasi 300 g	300	30,9	30,4	30,8	30,70	301,0	+0,3
Kalibrasi 400 g	400	40,4	40,9	40,2	40,50	399,0	–0,2
Benda uji 1	58 (telur)	6,1	6,5	6,3	6,30	57,0	–1,7
Benda uji 2	345 (botol air)	35,4	35,0	35,3	35,23	346,3	+0,4

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pembuatan & kalibrasi dacin	Penggaris digantung tepat di titik beratnya, jarak wadah dikunci tepat 10,0 cm, setiap posisi diukur 3 kali, dan keselamatan dijaga.	Dacin berfungsi baik, tetapi ada satu pengukuran yang tidak diulang.	Titik gantung atau jarak wadah berubah-ubah selama percobaan.	Dacin tidak selesai dibuat atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, massa menurut dacin dan persentase selisih dihitung tepat.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau massa wadah m_w lupa diperhitungkan.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis prinsip momen	Grafik rapi dengan garis terbaik, kemiringan dibandingkan dengan a/m_0 , dan persamaan momen ditulis serta dijelaskan.	Grafik benar tetapi penjelasan persamaan momen kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Rancang ulang, kesimpulan & komunikasi	Rancang ulang untuk 2 kg dihitung benar beserta untung-ruginya, kesimpulan didukung data, dan dikaitkan dengan kejujuran di pasar.	Kesimpulan tepat, tetapi rancang ulang kurang lengkap.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Mistar kayu 100 cm memberi hasil terbaik; penggaris plastik 50 cm juga bisa dipakai dengan $a = 5,0$ cm dan anak timbangan 50 g. Ikat benang penggantung melingkari penggaris dan kunci dengan selotip agar tidak bergeser; titik gantung di sisi atas penggaris membuat dacin lebih stabil. Jika tidak ada timbangan dapur, pakai kemasan yang mencantumkan massa bersih (gula, tepung) sebagai beban kalibrasi. Pertanyaan 6 adalah pintu masuk diskusi tentang kejujuran dan tera ulang timbangan.

Satelit Tali-Sedotan: Seberapa Cepat Harus Berputar agar Tidak Jatuh?

Bab 11 • Gravitasi & Satelit

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas X-XI (versi kualitatif untuk SMP kelas 9)

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara gaya tarik ke pusat dan frekuensi putaran benda yang bergerak melingkar dengan jari-jari tetap.
- Peserta didik dapat menghitung frekuensi putaran dari data waktu 10 putaran dan menyajikannya dalam grafik $f^2 - F$.
- Peserta didik dapat menafsirkan kemiringan grafik $f^2 - F$ sebagai $1/(4\pi^2 mL)$ dan menggunakannya untuk menghitung massa benda yang diputar.
- Peserta didik dapat menghubungkan model tali-sedotan dengan gerak satelit, yaitu gaya gravitasi yang berperan sebagai gaya sentripetal.

Fenomena



Malam itu Raka membaca bahwa ISS mengitari Bumi dengan laju $\pm 7,7$ km/s, sedangkan Bulan hanya ± 1 km/s. "Kenapa yang dekat harus ngebut?" tanyanya. Kak Nara menjawab, "Makin dekat, makin kuat tarikan Bumi. Tarikan ke pusat yang lebih kuat menuntut putaran yang lebih cepat agar benda tidak jatuh." Sari tidak langsung percaya: "Bisakah kita mengujinya di Bumi?" Kak Nara memberi kelompokmu sebatang pulpen bekas, benang, tutup botol, dan beberapa baut. Baut yang tergantung berperan sebagai "gravitasi", dan tutup botol sebagai "satelit". Tarsi siap menghitung putarannya!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara gaya tarik ke pusat F dan frekuensi putaran f sebuah benda yang bergerak melingkar jika jari-jari lintasannya dibuat tetap?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Gaya tarik ke pusat F (berat baut dan kantong yang tergantung)	Frekuensi putaran f (dihitung dari waktu 10 putaran)	Massa "satelit" (tutup botol + plastisin), panjang benang $L = 0,60$ m dari ujung atas pulpen ke pusat satelit, putaran mendatar di atas kepala

Alat dan bahan

- 1 badan pulpen bekas atau sedotan keras (± 12 cm) yang ujung-ujungnya halus, dibungkus selotip agar mantap digenggam
- Benang nilon atau benang kasur $\pm 1,5$ m
- 1 tutup botol plastik yang diisi plastisin sebagai "satelit" (± 15 g), diikat erat di ujung benang

- 7 baut/mur yang masing-masing ± 10 g dan 1 kantong plastik kecil (± 2 g) sebagai wadah beban
- 1 klip kertas sebagai penanda panjang benang, serta meteran atau penggaris 1 m
- Stopwatch di HP (atau kamera HP untuk merekam) dan timbangan dapur digital

⚠ Keselamatan

Lakukan di lapangan atau halaman terbuka. Pemutar berdiri minimal 2 m dari teman lain, dan tidak boleh ada orang di bidang putaran. Periksa ikatan tutup botol dan benang sebelum setiap percobaan; ganti benang yang mulai aus. Putar di atas kepala, jauh dari wajah, dan jangan memakai benda keras atau tajam (batu, logam) sebagai "satelit". Bila ada, pakai kacamata pelindung atau kacamata renang. Hentikan putaran perlahan, jangan dilepas tiba-tiba.

📋 Langkah kerja

1. Timbang tutup botol berisi plastisin ("satelit"), kantong plastik, dan setiap baut. Catat massanya.
2. Masukkan benang melewati badan pulpen. Ikat satelit erat-erat di ujung atas benang dan kantong plastik di ujung bawahnya.
3. Ukur $L = 0,60$ m dari ujung atas pulpen sampai pusat satelit. Jepitkan klip kertas pada benang ± 1 cm di bawah ujung bawah pulpen sebagai penanda.
4. Percobaan 1: masukkan 3 baut ke kantong. Pegang pulpen tegak di atas kepala, lalu putar satelit dalam lingkaran mendatar. Atur kecepatan putaran sampai klip penanda diam ± 1 cm di bawah pulpen (tidak naik, tidak turun). Dengan begitu L tetap.
5. Saat putaran sudah stabil, teman mengukur waktu 10 putaran penuh (t_1). Ulangi sampai mendapat t_2 dan t_3 , lalu hitung rata-ratanya.
6. Percobaan 2–5: tambahkan baut satu per satu (4, 5, 6, lalu 7 baut di kantong). Ulangi langkah 4–5 untuk setiap percobaan.
7. Hitung gaya tarik $F = m_{\text{gantung}} g$ ($m_{\text{gantung}} = \text{kantong} + \text{baut}$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$), frekuensi $f = 10/t_{\text{rata-rata}}$, dan f^2 .
8. Gambar grafik f^2 (sumbu tegak) terhadap F (sumbu mendatar) di kertas milimeter, lalu tarik garis lurus terbaik.

📋 Tabel pengamatan ($L = 0,60$ m, massa satelit = ... g)

Percobaan	m gantung (kg)	$F = mg$ (N)	t_1 10 putaran (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$f = 10/t$ (putaran/s)	f^2 (s^{-2})
1								
2								
3								
4								
5								

📊 Grafik

Grafik f^2 (sumbu tegak) terhadap gaya tarik F (sumbu mendatar). Tarik satu garis lurus terbaik yang melewati sebanyak mungkin titik, lalu hitung kemiringannya.

1. Bagaimana bentuk grafik $f^2 - F$ yang kamu peroleh? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti?

Kunci: Grafik berupa garis lurus naik yang hampir melalui titik asal: $f^2 \propto F$. Gaya tarik ke pusat yang dua kali lebih besar membuat f^2 dua kali lebih besar (frekuensinya $\sqrt{2}$ kali). Hipotesis "makin besar gaya tarik, makin cepat putaran" terbukti, dengan bentuk hubungan yang tepat $f^2 \propto F$.

2. Tunjukkan bahwa untuk satelit bermassa m pada benang sepanjang L berlaku $F = 4\pi^2 mLf^2$, walaupun benangnya sedikit miring. Hitung kemiringan grafikmu, lalu gunakan untuk menghitung massa satelit. Bandingkan dengan hasil penimbangan.

Kunci: Jika benang miring dengan sudut θ terhadap bidang datar, komponen mendatar tegangan $F \cos \theta$ memberi gaya sentripetal pada lingkaran berjari-jari $L \cos \theta$: $F \cos \theta = m\omega^2 L \cos \theta$, sehingga $F = m\omega^2 L = 4\pi^2 mLf^2$. Kemiringan grafik $f^2 - F = 1/(4\pi^2 mL)$. Contoh: kemiringan $\pm 2,78 \text{ s}^{-2}/\text{N}$ memberi $m = 1/(4\pi^2 \times 0,60 \times 2,78) \approx 0,015 \text{ kg} = 15 \text{ g}$, cocok dengan hasil penimbangan.

3. Mengapa klip penanda harus diam di tempatnya selama pengukuran? Apa akibatnya jika satelit diputar terlalu cepat sehingga klip naik menempel ke pulpen?

Kunci: Klip yang diam berarti L tetap (variabel kontrol) dan beban gantung diam, sehingga tegangan benang sama dengan berat beban ($F = m_{\text{gantungan}} g$). Jika diputar terlalu cepat, satelit menarik benang keluar: L bertambah dan beban terangkat sambil dipercepat ke atas, sehingga tegangan benang lebih besar daripada berat beban. Titik datanya menyimpang dari garis.

4. Dalam model ini, gaya tarik ditentukan oleh baut, bukan oleh satelit. Pada satelit sungguhan, gaya gravitasi sebanding dengan massa satelit itu sendiri. Apa akibatnya bagi pengaruh massa satelit terhadap kecepatan orbit?

Kunci: Pada model, $f^2 = F/(4\pi^2 mL)$: untuk gaya tarik yang sama, satelit yang lebih berat berputar lebih lambat. Pada satelit sungguhan, $F = GMm/r^2$ ikut sebanding dengan m , sehingga m saling coret: $f^2 = GM/(4\pi^2 r^3)$ dan $v = \sqrt{GM/r}$. Massa satelit tidak berpengaruh, jadi satelit raksasa dan baut kecil di orbit yang sama melaju sama cepat.

5. Pakai pola hasilmu untuk meramalkan: sebuah satelit mengorbit planet bermassa 4 kali massa Bumi pada jari-jari orbit yang sama dengan satelit Bumi. Berapa kali frekuensi dan kecepatan orbitnya?

Kunci: Pada jari-jari yang sama, gaya gravitasi per kilogram satelit menjadi 4 kali, sehingga f^2 menjadi 4 kali. Frekuensi orbit menjadi 2 kali, dan kecepatan orbit $v = 2\pi r f$ juga 2 kali, sesuai $v = \sqrt{GM/r}$.

6. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh galat: waktu reaksi saat menekan stopwatch, gesekan benang di ujung pulpen, bidang putaran tidak benar-benar mendatar, klip sedikit bergeser, massa benang diabaikan. Perbaikan: ukur 20 putaran atau rekam video lalu hitung putaran dari rekaman, bungkus ujung pulpen dengan selotip licin, berlatih dulu, dan tugaskan satu teman khusus mengawasi klip.

7. Kembali ke pertanyaan Raka: mengapa ISS harus melaju jauh lebih cepat daripada Bulan?

Kunci: ISS jauh lebih dekat ke Bumi ($r \approx 6.800 \text{ km}$) daripada Bulan ($r \approx 384.000 \text{ km}$), sehingga tarikan Bumi per kilogram di ISS jauh lebih besar ($\pm 8,7 \text{ N/kg}$ dibanding $\pm 0,0027 \text{ N/kg}$). Seperti satelit tali-sedotan dengan beban gantung lebih banyak, ISS harus berputar lebih cepat agar tarikan itu tepat menjadi gaya sentripetal: $v = \sqrt{GM/r}$ besar untuk r kecil.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan gaya tarik ke pusat, jari-jari, dan frekuensi putaran dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaannya. Tambahkan satu kalimat yang menghubungkannya dengan gerak satelit.

💡 Refleksi

- Saat "satelitku" berputar stabil di atas kepala, aku merasa ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang satelit yang "jatuh terus tetapi tidak pernah sampai" adalah ...
- Satu benda di sekitarku yang bergerak melingkar karena ditarik ke pusat adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat atau lapangan? Pakai Lab Mini "Meriam Newton: jatuh, mengorbit, atau lepas?" di Bab 11 (subbab 11.4). Atur tinggi gunung 200, 600, 1.000, 2.000, dan 3.000 km. Untuk setiap tinggi, catat "v orbit lingkaran" pada panel, setel kecepatan tembak ke nilai terdekat, tekan Jalankan, lalu catat periode T yang muncul setelah satu putaran. Hitung $r = 6.371 + h$ (km) dan buat grafik v^2 terhadap $1/r$. Kemiringannya adalah GM Bumi ($\pm 3,99 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$). Di sini gaya ke pusat (gravitasi) melemah saat r membesar, sehingga satelit makin lambat, sejalan dengan percobaan tali-sedotan.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b11-4

📊 Contoh data (massa satelit 15 g, L = 0,60 m, kantong 2 g, tiap baut 10 g)

Percobaan	m gantung (kg)	F = mg (N)	t ₁ 10 putaran (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t rata-rata (s)	f = 10/t (putaran/s)	f ² (s ⁻²)
1	0,032	0,314	10,74	10,84	10,83	10,80	0,926	0,857
2	0,042	0,412	9,33	9,34	9,33	9,33	1,072	1,149
3	0,052	0,510	8,46	8,41	8,48	8,45	1,183	1,401
4	0,062	0,608	7,56	7,84	7,70	7,70	1,299	1,687
5	0,072	0,706	7,21	7,14	7,12	7,16	1,397	1,951

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, klip dijaga diam, waktu 10 putaran diulang 3 kali, dan aturan keselamatan (jarak aman, ikatan kuat) dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang tidak diulang atau klip sesekali bergeser.	Panjang benang tidak dijaga tetap atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, F , f , dan f^2 dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau f tertukar dengan periode.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi (sumbu, satuan, skala tepat), garis terbaik ditarik, kemiringan dihitung dan dipakai untuk menghitung massa satelit.	Grafik benar tetapi penafsiran kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & kaitan dengan satelit	Kesimpulan tepat ($F = 4\pi^2 mLf^2$, $f^2 \propto F$), didukung data, menyebut galat, dan dihubungkan dengan orbit satelit serta perbedaan model dan gravitasi.	Kesimpulan tepat tetapi kaitan dengan satelit kurang jelas.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Pilih badan pulpen yang tepinya halus atau sedotan keras; tepi yang tajam membuat gesekan besar dan benang cepat putus. Bagi peran: pemutar, pencatat waktu, dan pengawas klip. Beri waktu latihan ± 5 menit sebelum mengambil data. Jika putaran terlalu cepat untuk dihitung, perpanjang L menjadi 0,80 m. Pertanyaan 4 adalah pintu masuk yang bagus untuk pernyataan "massa satelit tidak berpengaruh" di subbab 11.4.

Bandul Benang dan Mur: Menimbang Gravitasi Bumi dari Sebuah Ayunan

Bab 12 • Elastisitas & Getaran Harmonik

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 8 (versi kualitatif) dan SMA kelas X-XI

2 × 45 menit

Model: Discovery learning: stimulasi – identifikasi masalah – pengumpulan data – pengolahan data – pembuktian – generalisasi

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki pengaruh panjang tali terhadap periode bandul sederhana dengan simpangan kecil.
- Peserta didik dapat menunjukkan bahwa periode bandul tidak bergantung pada massa beban.
- Peserta didik dapat melinearkan data dengan grafik T^2-L dan menentukan percepatan gravitasi g dari kemiringannya.
- Peserta didik dapat menganalisis galat acak dan galat sistematis dalam pengukuran periode.

Fenomena



Sabtu sore, Raka dan adiknya bermain ayunan di taman kompleks. Raka heran: ayunan adiknya yang ringan dan ayunannya sendiri ternyata bolak-balik dengan irama yang sama. Sari menambahkan, "Ayunan di sebelah yang talinya lebih panjang kok lebih lambat, ya?" Kak Nara tersenyum, "Dengan seutas benang dan sebuah mur, kalian bahkan bisa mengukur kuatnya gravitasi Bumi." Tarsi sudah menyiapkan stopwatch di HP!

? Rumusan masalah

Bagaimana pengaruh panjang tali L dan massa beban terhadap periode T bandul sederhana, dan berapa nilai g yang dapat ditentukan dari data itu?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Panjang tali L (dari titik gantung sampai pusat mur); pada percobaan 6, massa beban	Periode ayunan T	Massa beban (1 mur, kecuali percobaan 6), simpangan awal kecil ($\pm 10^\circ$), jenis benang, cara melepas bandul

Alat dan bahan

- Benang jahit atau benang nilon (tidak mulur) $\pm 1,2$ m
- 3 mur sejenis (masing-masing ± 15 g) sebagai beban bandul
- 2 penggaris kayu atau plastik dan selotip untuk menjepit benang di tepi meja (titik gantung), serta beberapa buku tebal sebagai pemberat
- Meteran atau penggaris 1 m dan busur derajat
- Stopwatch di HP (atau kamera HP untuk merekam)
- Meja yang kokoh dan cukup tinggi

Keselamatan

Pastikan penggaris penjepit ditindih buku tebal sehingga tidak mudah jatuh. Jangan naik ke kursi atau meja untuk menggantung bandul; pakai tepi meja yang cukup tinggi. Ayunkan bandul dengan simpangan kecil, jangan diputar-putar, dan jauhkan wajah dari lintasan beban. Rapikan benang setelah selesai agar tidak membuat orang tersandung.

Langkah kerja

1. Jepit ujung benang di antara dua penggaris di tepi meja, lalu tindih penggaris dengan buku tebal. Titik jepit inilah titik gantung bandul.
2. Ikat 1 mur di ujung bawah benang. Atur panjang $L = 0,20$ m, diukur dari titik gantung sampai pusat mur.
3. Simpangkan mur $\pm 10^\circ$ (gunakan busur derajat), lalu lepaskan tanpa didorong. Biarkan berayun 2–3 kali dulu.
4. Ukur waktu 10 ayunan penuh (t_1). Mulai dan hentikan stopwatch saat mur melewati titik terendah. Ulangi sampai mendapat t_2 dan t_3 .
5. Ulangi langkah 2–4 untuk $L = 0,40$; $0,60$; $0,80$; dan $1,00$ m.
6. Percobaan 6: kembalikan $L = 0,60$ m, tetapi pakai 3 mur sekaligus (ikat rapat menjadi satu). Ukur lagi waktu 10 ayunan.
7. Hitung t rata-rata, periode $T = t/10$, dan T^2 untuk setiap percobaan.
8. Gambar grafik T^2 (sumbu tegak) terhadap L (sumbu mendatar) untuk percobaan 1–5, lalu tarik garis lurus terbaik dan hitung kemiringannya.

Tabel pengamatan (simpangan awal $\pm 10^\circ$)

Percobaan	L (m)	t , 10 ayunan (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$T = t/10$ (s)	T^2 (s ²)
1							
2							
3							
4							
5							
6 (3 mur)							

Grafik

Grafik T^2 (sumbu tegak) terhadap L (sumbu mendatar) untuk percobaan 1–5. Bila sempat, buat juga grafik T terhadap L dan bandingkan bentuknya.

Analisis

1. Bandingkan grafik $T-L$ dan grafik T^2-L . Mana yang berupa garis lurus? Mengapa?

Kunci: Grafik $T-L$ melengkung (makin landai), sedangkan grafik T^2-L berupa garis lurus. Sebabnya $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, jadi $T \propto \sqrt{L}$ dan $T^2 = (4\pi^2/g) L$. Mengkuadratkan T mengubah hubungan akar menjadi hubungan lurus yang mudah dianalisis.

2. Hitung kemiringan grafik T^2-L , lalu tentukan $g = 4\pi^2/\text{kemiringan}$. Bandingkan dengan nilai acuan di Indonesia ($\pm 9,78 \text{ m/s}^2$) dan hitung persentase selisihnya.

Kunci: Contoh: kemiringan $\approx (4,048 - 0,846)/(1,00 - 0,20) \approx 4,00 \text{ s}^2/\text{m}$, sehingga $g = 4\pi^2/4,00 \approx 9,86 \text{ m/s}^2$. Garis terbaik dari kelima titik memberi kemiringan $\pm 4,01 \text{ s}^2/\text{m}$ dan $g \approx 9,84 \text{ m/s}^2$, hanya $\pm 0,6\%$ di atas $9,78 \text{ m/s}^2$.

3. Bandingkan periode percobaan 3 (1 mur) dan percobaan 6 (3 mur). Apa kesimpulanmu tentang pengaruh massa beban? Jelaskan dengan konsep massa dan berat.

Kunci: Periode percobaan 6 (1,574 s) hampir sama dengan percobaan 3 (1,563 s); selisih $\pm 0,7\%$ masih dalam batas galat pengukuran. Jadi periode tidak bergantung pada massa beban. Beban yang lebih besar memang lebih sulit digerakkan (massanya besar), tetapi juga ditarik gravitasi lebih kuat (beratnya besar), sehingga kedua pengaruh saling menghapus.

4. Mengapa kamu mengukur waktu 10 ayunan, bukan 1 ayunan? Mengapa simpangan awal harus kecil?

Kunci: Waktu reaksi saat menekan stopwatch ($\pm 0,1-0,2 \text{ s}$) terjadi di awal dan akhir pengukuran. Jika waktu 10 ayunan dibagi 10, galat pada T menjadi 10 kali lebih kecil. Simpangan harus kecil (di bawah $\pm 15^\circ$) karena rumus $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ memakai pendekatan $\sin \theta \approx \theta$; simpangan besar membuat periode sedikit lebih panjang.

5. Grafik T^2-L milikmu kemungkinan memotong sumbu T^2 sedikit di atas nol. Apa kemungkinan penyebabnya? Apakah nilai g dari kemiringan ikut salah?

Kunci: Kemungkinan panjang yang diukur sedikit lebih pendek daripada panjang sebenarnya, misalnya titik gantung sebenarnya sedikit di atas tepi penggaris atau pusat mur salah ditaksir. Jika setiap L kurang sebesar ΔL yang sama, $T^2 = \frac{4\pi^2}{g}(L + \Delta L)$: garis bergeser ke atas (contoh data: perpotongan $\pm 0,05 \text{ s}^2$, setara $\Delta L \approx 1 \text{ cm}$), tetapi kemiringannya tidak berubah. Jadi g dari kemiringan tetap benar. Inilah kelebihan metode grafik.

6. Sebutkan dua sumber galat lain dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: bandul berayun membentuk elips (tidak dalam satu bidang), titik gantung ikut bergoyang, salah menghitung jumlah ayunan, hambatan udara. Perbaikan: rekam video HP lalu hitung ayunan dari rekaman, jepit titik gantung lebih kuat, beri tanda posisi terendah dengan selotip sebagai acuan, atau ukur 20 ayunan.

7. Berapa panjang tali yang diperlukan agar periode ayunan tepat 2 s? Kaitkan dengan jam bandul kakek dan ayunan di taman.

Kunci: $L = gT^2/(4\pi^2) = 9,78 \times 4/39,48 \approx 0,99 \text{ m}$, hampir tepat 1 m ("bandul detik"). Jam bandul kakek memakai bandul $\pm 1 \text{ m}$ agar setiap ayunan satu arah memakan waktu 1 s. Ayunan taman bertali $\pm 2 \text{ m}$ berayun dengan periode $\pm 2,8 \text{ s}$, berapa pun berat anak yang duduk di atasnya.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang faktor yang memengaruhi dan yang tidak memengaruhi periode bandul, lengkap dengan persamaannya, nilai g yang kamu peroleh, dan persentase selisihnya dari nilai acuan.

🗨 Refleksi

- Hal yang paling mengejutkanku dari percobaan bandul ini adalah ...
- Cara kelompokku mengurangi galat pengukuran adalah ...

- Satu ayunan atau getaran di sekitarku yang ingin kuukur periodenya adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Ayunan taman: redaman dan resonansi" di Bab 12 (subbab 12.7). Pilih mode Ayun bebas, buat redaman 0 dan sudut awal 10° , lalu ubah panjang tali L menjadi 0,50; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; dan 3,00 m. Catat "T terukur" untuk setiap panjang (kolom t_1 – t_3 boleh diganti satu nilai T), lalu buat grafik T^2 – L dan hitung g . Ulangi $L = 1,50$ m dengan sudut awal 10° , 30° , dan 60° untuk menguji pengaruh simpangan. Lab ini tidak punya pengatur massa. Mengapa tidak perlu?

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b12-5

Contoh data (g setempat $\pm 9,78 \text{ m/s}^2$, 1 mur $\pm 15 \text{ g}$, simpangan awal $\pm 10^\circ$)

Percobaan	L (m)	t_1 10 ayunan (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	T = t/10 (s)	T^2 (s ²)
1	0,20	9,16	9,23	9,21	9,20	0,920	0,846
2	0,40	12,88	12,93	12,76	12,86	1,286	1,654
3	0,60	15,63	15,59	15,66	15,63	1,563	2,443
4	0,80	18,12	18,06	18,09	18,09	1,809	3,272
5	1,00	20,06	20,18	20,12	20,12	2,012	4,048
6 (3 mur)	0,60	15,77	15,72	15,72	15,74	1,574	2,477

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, simpangan dijaga kecil, waktu 10 ayunan diulang 3 kali, percobaan massa dilakukan, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang tidak diulang atau simpangan kurang terjaga.	Panjang tali salah diukur (tidak sampai pusat mur) atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, T dan T^2 dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang, atau waktu 10 ayunan tidak dibagi 10.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik T^2 – L rapi, garis terbaik ditarik, g dihitung dari kemiringan beserta persentase selisihnya, dan perpotongan ditafsirkan.	Grafik dan nilai g benar tetapi analisis galat kurang lengkap.	Grafik salah skala, tanpa garis terbaik, atau g dihitung dari satu titik saja.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($T \propto \sqrt{L}$, tidak bergantung massa), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat, misalnya hanya membahas panjang tali.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor $\div$ 16) $\times$ 100.

Catatan guru

Benang nilon atau benang jahit yang tidak mulur memberi hasil terbaik; hindari tali rafia atau karet yang melar. Titik gantung harus benar-benar diam, karena penggaris yang bergoyang membuat periode tampak lebih panjang. Untuk SMP, cukup bandingkan periode untuk dua panjang dan dua massa secara kualitatif. Untuk SMA, minta siswa menaksir ketidakpastian g dari sebaran t_1 – t_3 . Data ini juga cocok untuk membahas soal Lv 5 tentang eksperimen bandul Sari di bank soal Bab 12.

Physicspedia • LKPD Bab 12 • © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD • Editor: Abdullah Hanif Hidayat • Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Botol Pasir di Atas Timbangan Dapur: Mengukur Dorongan Air ala Archimedes

Bab 13 • Fluida Statis

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 8 dan SMA kelas XI

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing model 5E (Engage – Explore – Explain – Elaborate – Evaluate)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara volume bagian benda yang tercelup dan gaya apung yang dialaminya.
- Peserta didik dapat mengukur gaya apung dengan timbangan dapur dan menjelaskannya dengan Hukum III Newton.
- Peserta didik dapat menentukan massa jenis zat cair dari kemiringan grafik $\Delta m - V$.
- Peserta didik dapat menjelaskan mengapa kapal tercelup makin dalam saat dimuati, memakai hukum Archimedes.

Fenomena



Di Pelabuhan Paotere, Makassar, Raka memperhatikan sebuah pinisi yang sedang dimuati karung beras. Setiap karung yang naik ke kapal membuat lambungnya sedikit lebih dalam tercelup. Garis cat di lambung yang tadinya jauh di atas air kini hampir menyentuh permukaan. "Apakah dorongan air bertambah sebanding dengan bagian kapal yang tercelup?" tanya Sari. Kak Nara mengajak kelompokmu membuktikannya hanya dengan botol berisi pasir, ember, dan timbangan dapur. Tarsi penasaran: mengapa angka timbangan ikut naik padahal botolnya tidak menyentuh timbangan?

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara volume bagian benda yang tercelup V dan gaya apung F_A , dan bagaimana pengaruh jenis zat cair terhadap gaya apung itu?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Volume tercelup V (diatur lewat kedalaman celup h) dan jenis zat cair (air keran atau air garam)	Gaya apung F_A (dari tambahan angka timbangan Δm)	Botol yang sama, wadah dan banyaknya zat cair yang sama, botol tidak menyentuh dasar maupun dinding wadah

Alat dan bahan

- 1 botol plastik bekas 600 mL berbentuk silinder, diisi pasir sampai penuh lalu ditutup rapat (botol ini tenggelam di air)
- Spidol permanen dan penggaris untuk memberi tanda garis setiap 2 cm dari dasar botol (sampai 10 cm), serta pita kain atau benang untuk mengukur keliling botol

- Tali rafia atau benang kasur ± 60 cm yang diikat kuat di leher botol, dan sebatang tongkat (gagang sapu) yang ditopang dua kursi sebagai gantungan
- 1 wadah plastik (ember kecil atau baskom) berisi ± 2 L air, cukup lebar dan dalam sehingga botol tidak menyentuh dasar dan dinding
- Timbangan dapur digital (ketelitian 1 g, kapasitas 5 kg) yang diberi alas nampan plastik
- Garam dapur ± 300 g (± 20 sendok makan) dan sendok pengaduk

Keselamatan

Letakkan timbangan di atas nampan plastik agar tidak terkena tumpahan air, dan jauhkan dari stopkontak. Segera lap air yang tumpah agar lantai tidak licin. Pastikan tutup botol pasir rapat dan ikatan tali kuat agar botol tidak jatuh menimpa timbangan atau kaki. Jangan memakai wadah kaca. Air garam jangan sampai terkena mata; cuci tangan setelah percobaan.

Langkah kerja

1. Ukur keliling botol k dengan pita atau benang, lalu hitung diameternya $d = k/\pi$ dan luas alasnya $A = \pi d^2/4$. Beri tanda garis setiap 2 cm dari dasar botol.
2. Letakkan wadah berisi ± 2 L air keran di atas timbangan, lalu tekan tombol TARE (nol) sehingga timbangan menunjukkan 0 g.
3. Ikat tali botol pada tongkat di atas wadah. Turunkan botol perlahan dengan memutar tongkat sampai garis 2 cm tepat di permukaan air. Pastikan botol tidak menyentuh dasar maupun dinding wadah.
4. Tunggu sampai air tenang, lalu baca angka timbangan. Angka ini adalah Δm , tambahan massa yang "dirasakan" timbangan.
5. Ulangi untuk kedalaman 4, 6, 8, dan 10 cm. Hitung volume tercelup $V = A \times h$.
6. Angkat botol. Larutkan ± 300 g garam ke dalam air di wadah (aduk sampai larut), tekan TARE lagi, lalu celupkan botol sedalam 8 cm dan baca Δm (percobaan 6).
7. Hitung gaya apung $F_A = \Delta m \cdot g$ (ubah gram ke kilogram dulu, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$) dan perbandingan $\Delta m/V$ untuk setiap percobaan.
8. Gambar grafik Δm (sumbu tegak) terhadap V (sumbu mendatar) untuk percobaan 1–5, lalu tarik garis lurus terbaik.

Tabel pengamatan (keliling botol $k = \dots$ cm, luas alas $A = \dots \text{ cm}^2$)

Percobaan	h (cm)	$V = A \cdot h$ (cm ³)	Δm (g)	$F_A = \Delta m \cdot g$ (N)	$\Delta m/V$ (g/cm ³)
1 (air keran)					
2 (air keran)					
3 (air keran)					
4 (air keran)					
5 (air keran)					
6 (air garam)					

Grafik

Grafik Δm (sumbu tegak) terhadap volume tercelup V (sumbu mendatar) untuk percobaan 1–5. Tandai titik percobaan 6 (air garam) dengan warna lain.

Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik Δm - V ? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti?

Kunci: Grafik berupa garis lurus naik melalui titik asal: $\Delta m \propto V$, sehingga $F_A \propto V$. Makin besar bagian benda yang tercelup, makin besar gaya apung, secara sebanding. Hipotesis terbukti.

2. Hitung kemiringan grafismu (dalam g/cm³). Besaran apa yang ditunjukkan oleh kemiringan itu? Bandingkan dengan massa jenis air (1,00 g/cm³).

Kunci: Contoh: kemiringan $\approx 320 \text{ g}/322 \text{ cm}^3 \approx 0,99 \text{ g/cm}^3$, hampir sama dengan massa jenis air. Artinya $\Delta m = \rho_{\text{air}} V$: tambahan massa yang dirasakan timbangan sama dengan massa air yang dipindahkan botol. Maka $F_A = \rho_f V g$, inilah hukum Archimedes.

3. Botol tidak menyentuh timbangan, tetapi angka timbangan naik. Jelaskan dengan Hukum III Newton mengapa $\Delta m g$ sama dengan gaya apung.

Kunci: Air mendorong botol ke atas dengan gaya F_A . Menurut Hukum III Newton, botol mendorong air ke bawah dengan gaya yang sama besar. Dorongan ini diteruskan air ke dasar wadah dan ke timbangan, sehingga angka timbangan bertambah sebesar F_A/g . Pada saat yang sama, tegangan tali yang menahan botol berkurang sebesar F_A .

4. Bandingkan percobaan 4 dan 6 (kedalaman sama, zat cair berbeda). Hitung massa jenis air garam dari datamu. Apa kesimpulanmu tentang pengaruh jenis zat cair?

Kunci: Pada kedalaman 8 cm, Δm air garam 282 g, sedangkan air keran 256 g. Massa jenis air garam $\approx 282/257,6 \approx 1,09 \text{ g/cm}^3$. Zat cair yang lebih rapat memberi gaya apung lebih besar untuk volume tercelup yang sama: $F_A \propto \rho_f$.

5. Ramalkan angka timbangan jika botol dicelupkan sedalam 8 cm ke minyak goreng ($\rho \approx 0,92 \text{ g/cm}^3$). Lalu, jika botol diturunkan sampai tenggelam seluruhnya kemudian diturunkan 3 cm lagi (tanpa menyentuh dasar), apakah angka timbangan masih bertambah?

Kunci: Minyak goreng: $\Delta m \approx 0,92 \times 257,6 \approx 237 \text{ g}$ ($F_A \approx 2,3 \text{ N}$). Setelah botol tercelup seluruhnya, angka timbangan tidak bertambah lagi walaupun botol diturunkan lebih dalam, karena volume zat cair yang dipindahkan sudah tetap.

6. Sebutkan dua sumber galat dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh galat: garis tanda dibaca dari sudut miring (paralaks), meniskus di sekitar botol menyulitkan pembacaan, botol bergoyang sehingga angka timbangan naik-turun, ketelitian timbangan 1 g, dan botol tidak benar-benar silinder. Perbaikan: baca garis sejajar mata, tunggu air tenang, ukur keliling di beberapa tempat lalu rata-ratakan, dan ulangi setiap pengukuran.

7. Kaitkan hasilmu dengan pinisi yang dimuati karung beras. Mengapa kapal yang sama tercelup lebih dangkal di laut daripada di sungai?

Kunci: Setiap karung beras menambah berat kapal, sehingga kapal harus memindahkan lebih banyak air agar gaya apung kembali sama dengan beratnya: bagian yang tercelup bertambah sebanding dengan tambahan muatan. Air laut ($\pm 1,025 \text{ g/cm}^3$) lebih rapat daripada air sungai ($\pm 1,000 \text{ g/cm}^3$), sehingga volume tercelup yang dibutuhkan untuk berat yang sama lebih kecil: kapal tercelup lebih dangkal di laut. Karena itu lambung kapal diberi garis muat untuk air tawar dan air laut.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang besaran-besaran yang menentukan gaya apung dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaannya.

💬 Refleksi

- Momen paling seru dalam percobaan ini adalah saat ...
- Dulu aku mengira benda berat pasti tenggelam, sekarang aku tahu bahwa ...
- Satu contoh hukum Archimedes yang kulihat di sekitar rumah atau sekolah adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Neraca Archimedes: timbang, celupkan, tumpung!" di Bab 13 (subbab 13.5). Pilih bahan Besi dan fluida Air tawar. Balok di lab ini luas alasnya 25 cm^2 dan tingginya 8 cm, dan mulai menyentuh air saat slider "Turunkan balok" berada di 3 cm. Atur slider ke 4, 5, 7, 9, dan 11 cm (kedalaman celup 1, 2, 4, 6, dan 8 cm), lalu catat gaya apung dan massa fluida yang tumpah. Hitung $V = 25 \times h \text{ cm}^3$. Ulangi kedalaman 8 cm dengan Air laut dan Minyak goreng, lalu isi tabel yang sama (kolom Δm diisi massa fluida yang tumpah).

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b13-5

📊 Contoh data (keliling botol 20,1 cm, jadi $A \approx 32,2 \text{ cm}^2$; air garam: $\pm 300 \text{ g}$ garam dalam 2 L air)

Percobaan	h (cm)	$V = A \cdot h \text{ (cm}^3\text{)}$	$\Delta m \text{ (g)}$	$F_A = \Delta m \cdot g \text{ (N)}$	$\Delta m/V \text{ (g/cm}^3\text{)}$
1 (air keran)	2	64,4	64	0,627	0,99
2 (air keran)	4	128,8	129	1,264	1,00
3 (air keran)	6	193,2	192	1,882	0,99
4 (air keran)	8	257,6	256	2,509	0,99
5 (air keran)	10	322,0	320	3,136	0,99
6 (air garam)	8	257,6	282	2,764	1,09

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, timbangan di-TARE dengan benar, botol tidak menyentuh wadah, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang kurang rapi (misalnya dibaca sebelum air tenang).	Botol menyentuh dasar atau dinding wadah, atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, V , F_A , dan $\Delta m/V$ dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau gram tidak diubah ke kilogram saat menghitung F_A .	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi, garis terbaik ditarik, kemiringan ditafsirkan sebagai massa jenis zat cair, dan data air garam dibahas.	Grafik benar tetapi penafsiran kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($F_A = \rho_f V g$), didukung data, menjelaskan peran Hukum III Newton, dan dikaitkan dengan kapal.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat, misalnya hanya menyebut volume tanpa massa jenis zat cair.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Botol berisi pasir cukup berat sehingga tali selalu tegang, dan botol tidak perlu ditahan tangan. Bila tidak ada gagang sapu, botol boleh dipegang talinya oleh satu siswa, asalkan tangannya ditumpukan agar tidak bergoyang. Metode timbangan ini sangat jelas memperlihatkan Hukum III Newton; diskusikan dulu tebakan siswa sebelum mengukur ("angka timbangan naik, turun, atau tetap?"). Untuk SMP, cukup bandingkan Δm dengan volume tercelup; untuk SMA, minta analisis kemiringan dan ketidakpastiannya.

Botol Bocor dan Video HP: Menguji Teorema Torricelli

Bab 14 • Fluida Dinamis

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing) dengan analisis video

SMA kelas XI

2 x 45 menit

Model: POE (Predict – Observe – Explain)

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara tinggi permukaan air di atas lubang h dan jarak mendatar pancaran x .
- Peserta didik dapat menghitung kelajuan pancaran dari jarak jatuhnya dengan konsep gerak peluru mendatar.
- Peserta didik dapat membandingkan kelajuan terukur dengan ramalan teorema Torricelli $v = \sqrt{2gh}$ dan menjelaskan penyebab perbedaannya.
- Peserta didik dapat menerapkan hasil percobaan untuk menjelaskan pemasangan toren air di atas rumah.

Fenomena



Toren air di rumah Raka bocor kecil. Air memancar dari lubangnya, dan Raka melihat pancarannya makin lama makin pendek saat air di toren berkurang. "Kenapa pancarannya melemah?" tanyanya. Sari menebak, "Mungkin jaraknya sebanding dengan tinggi air." Kak Nara menantang, "Coba buktikan dengan botol bekas. Teorema Torricelli meramalkan kelajuan pancaran sama dengan kelajuan batu yang jatuh dari permukaan air ke lubang. Apakah air sungguhan sepatuh itu?" Tarsi sudah siap merekam dengan HP.

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara tinggi permukaan air di atas lubang h dan jarak mendatar pancaran x , dan apakah kelajuan pancaran sesuai dengan ramalan $v = \sqrt{2gh}$?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Tinggi permukaan air di atas lubang h	Jarak mendatar titik jatuh pancaran x	Tinggi lubang di atas permukaan pendaratan $y = 30$ cm, ukuran dan bentuk lubang, botol yang sama

Alat dan bahan

- 1 botol plastik bekas 1,5 L berdinding lurus, dengan satu lubang kecil (diameter ± 3 mm) 3 cm di atas dasar botol
- Paku kecil, tang, dan lilin (untuk melubangi botol, dilakukan oleh guru atau orang dewasa), serta selotip
- Kotak kardus atau tumpukan buku dalam kantong plastik setinggi ± 27 cm sebagai alas botol
- Spidol permanen dan penggaris 30 cm untuk menandai tinggi air 4, 8, 12, 16, dan 20 cm di atas lubang
- Meteran yang ditempel di dasar nampan atau baskom lebar, dengan angka nol tepat di bawah lubang
- HP untuk merekam video (sebaiknya mode gerak lambat) dan ember berisi air

Keselamatan

Melubangi botol dengan paku yang dipanaskan hanya boleh dilakukan guru atau orang dewasa, memakai tang dan di atas alas tahan panas; jauhkan lilin dari kertas dan rambut. Lakukan percobaan di halaman atau di atas nampan besar, jauh dari stopkontak dan peralatan listrik. Letakkan HP di tempat yang tidak terkena cipratan. Segera lap lantai yang basah agar tidak licin.

Langkah kerja

1. Minta guru melubangi botol 3 cm di atas dasarnya dengan paku panas. Tutup lubang dengan selotip.
2. Beri tanda garis pada botol 4, 8, 12, 16, dan 20 cm di atas pusat lubang.
3. Letakkan botol di atas alas setinggi ± 27 cm sehingga lubang berada $y = 30$ cm di atas dasar nampan (ukur langsung dengan penggaris). Pastikan meteran di nampan dimulai tepat di bawah lubang.
4. Isi botol sampai sedikit di atas tanda 20 cm. Pasang HP $\pm 1,5$ m di samping sehingga botol dan meteran terekam bersamaan, lalu mulai merekam.
5. Lepas selotip. Biarkan air memancar sampai permukaan air turun melewati tanda 4 cm, lalu tutup lagi lubangnya.
6. Putar ulang video. Catat jarak titik jatuh pancaran x tepat saat permukaan air melewati setiap tanda. Ulangi langkah 4–6 dua kali lagi untuk mendapatkan x_1 , x_2 , dan x_3 .
7. Hitung x rata-rata, x^2 , kelajuan terukur $v_{\text{ukur}} = x\sqrt{g/(2y)}$, dan kelajuan teori $v_{\text{teori}} = \sqrt{2gh}$ (pakai satuan meter dan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$).
8. Gambar grafik x^2 (sumbu tegak) terhadap h (sumbu mendatar), lalu tarik garis lurus terbaik.

Tabel pengamatan (tinggi lubang di atas nampan $y = 30$ cm)

Percobaan	h (cm)	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	x rata-rata (cm)	x^2 (cm ²)	v ukur (m/s)	v teori (m/s)
1								
2								
3								
4								
5								

Grafik

Grafik x^2 (sumbu tegak) terhadap h (sumbu mendatar). Tarik garis lurus terbaik, lalu gambar juga garis teori $x^2 = 4yh$ sebagai pembanding.

Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik x^2-h ? Apakah tebakan Sari (x sebanding dengan h) benar? Hubungan apa yang sebenarnya?

Kunci: Grafik x^2-h berupa garis lurus yang hampir melalui titik asal, jadi $x^2 \propto h$ atau $x \propto \sqrt{h}$. Tebakan Sari kurang tepat: saat h dijadikan 4 kali (dari 4 cm ke 16 cm), x hanya menjadi ± 2 kali (dari 20,2 cm ke 41,3 cm).

2. Turunkan rumus $x = 2\sqrt{hy}$ dari teorema Torricelli dan gerak peluru mendatar. Berapa kemiringan grafik x^2-h menurut teori? Bandingkan dengan kemiringan grafismu.

Kunci: Torricelli: $v = \sqrt{2gh}$. Waktu jatuh dari ketinggian y : $t = \sqrt{2y/g}$. Jarak $x = vt = \sqrt{2gh}\sqrt{2y/g} = 2\sqrt{hy}$, sehingga $x^2 = 4yh$. Kemiringan teori = $4y = 120$ cm. Contoh data memberi kemiringan ± 107 cm, sekitar 89% dari teori.

3. Bandingkan v_{ukur} dengan v_{teori} dan hitung perbandingannya (koefisien kecepatan). Mengapa nilainya sedikit kurang dari 1?

Kunci: Contoh: v_{ukur}/v_{teori} berkisar 0,92–0,95 (rata-rata $\pm 0,94$). Nilainya kurang dari 1 karena air nyata kental dan bergesekan dengan tepi lubang yang kasar, sebagian energi berubah menjadi pusaran dan kalor, dan pancaran sedikit dihambat udara. Untuk lubang bertepi tajam yang rapi, koefisien kecepatan biasanya $\pm 0,97$ –0,98.

4. Kelompok lain memakai air garam yang lebih rapat. Apakah jarak pancarannya akan berbeda? Jelaskan.

Kunci: Secara ideal tidak berbeda. Dalam $v = \sqrt{2gh}$ dan $x = 2\sqrt{hy}$ tidak ada massa jenis: tekanan di lubang (ρgh) memang lebih besar, tetapi massa air yang harus dipercepat juga lebih besar dengan perbandingan yang sama.

5. Ramalkan jarak pancaran jika botol dinaikkan sehingga $y = 60$ cm dan $h = 16$ cm. Uji ramalanmu bila sempat.

Kunci: Menurut teori, $x = 2\sqrt{hy} = 2\sqrt{16 \times 60} \approx 62$ cm. Dengan koefisien kecepatan $\pm 0,94$ dari percobaanmu, ramalan yang lebih realistis $\approx 0,94 \times 62 \approx 58$ cm.

6. Sebutkan dua sumber galat dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh galat: titik jatuh sulit dibaca karena pancaran memercik, permukaan air terus turun saat dibaca, botol sedikit miring atau menggembung, lubang tidak bulat, dan paralaks saat membaca meteran di video. Perbaikan: pakai mode gerak lambat lalu jeda video, letakkan kamera sejajar meteran, perhalus tepi lubang, atau buat lubang dengan paku yang lebih runcing.

7. Mengapa toren air dipasang setinggi mungkin di atas rumah? Mengapa pancaran keran di lantai dua lebih lemah daripada di lantai satu?

Kunci: Tekanan air di keran sebanding dengan tinggi permukaan air di toren di atas keran (ρgh), dan kelajuan pancarannya $\sqrt{2gh}$. Makin tinggi toren, makin deras air keran. Keran di lantai dua lebih dekat ke toren (h lebih kecil), sehingga pancarannya lebih lemah.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan h , x , dan kelajuan pancaran, lengkap dengan persamaannya, serta seberapa dekat hasilmu dengan teorema Torricelli.

🗨 Refleksi

- Hal yang paling seru saat menonton ulang video pancaran adalah ...
- Sekarang aku mengerti mengapa air dari toren ...
- Satu pertanyaan baru yang muncul setelah percobaan ini adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Tandon bocor: adu jauh tiga pancaran" di Bab 14 (subbab 14.4). Atur tinggi menara 1,0 m, lalu seret lubang biru ke dekat dasar tandon ($\pm 0,05$ m di atas dasar) sehingga $y \approx 1,05$ m. Ubah "Tinggi air di tandon" menjadi 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; dan 1,8 m, lalu catat kelajuan dan jarak pancaran lubang biru yang tertera di panel. Hitung h = tinggi air – tinggi lubang, isi tabel (kolom x_1 – x_3 boleh diisi satu nilai), lalu buat grafik x^2 – h dan bandingkan kemiringannya dengan $4y$. Mengapa hasil simulasi tepat sama dengan teori, sedangkan hasil botol tidak?

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b14-4

Contoh data (lubang ± 3 mm, $y = 30$ cm, $g = 9,8$ m/s²)

Percobaan	h (cm)	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	x rata-rata (cm)	x^2 (cm ²)	v ukur (m/s)	v teori (m/s)
1	4	20,0	20,0	20,5	20,2	408	0,82	0,89
2	8	29,5	30,0	29,0	29,5	870	1,19	1,25
3	12	35,5	35,0	36,0	35,5	1.260	1,43	1,53
4	16	42,0	41,5	40,5	41,3	1.706	1,67	1,77
5	20	45,5	47,0	46,0	46,2	2.134	1,87	1,98

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, y dijaga tetap, perekaman diulang 3 kali, dan aturan keselamatan (lubang dibuat orang dewasa, lantai kering) dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu perekaman yang tidak diulang atau kurang jelas.	Tinggi lubang berubah antarpercobaan atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar (cm diubah ke m saat menghitung kelajuan), v_{ukur} dan v_{teori} dihitung tepat.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau satuan cm dan m tercampur.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik x^2 – h rapi, garis terbaik dan garis teori digambar, kemiringan dibandingkan dengan $4y$, dan koefisien kecepatan ditafsirkan.	Grafik benar tetapi perbandingan dengan teori kurang lengkap.	Grafik salah skala atau hanya menggambar x – h tanpa analisis.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($x \propto \sqrt{h}$, $v \approx \sqrt{2gh}$ dikurangi efek gesekan), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan toren air.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat, misalnya menyatakan x sebanding dengan h .	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Lubang yang dibuat dengan paku panas biasanya bertepi tebal sehingga koefisien kecepataannya $\pm 0,9-0,95$; lubang yang dibor rapi memberi hasil lebih dekat ke teori. Mode gerak lambat di HP sangat membantu membaca titik jatuh. Jika waktu terbatas, setiap kelompok cukup merekam sekali, lalu data antarkelompok digabung sebagai x_1-x_3 . Tutup dengan Tebak Dulu di subbab 14.4: mengapa lubang di tengah kolom air memancar paling jauh?

Physicspedia · LKPD Bab 14 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Air Mandi Hangat untuk Adik: Menguji Asas Black di Gelas Styrofoam

Bab 15 • Suhu, Kalor & Perpindahan Kalor

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 7–8 dan SMA kelas XI

2 × 45 menit

Model: POE (Predict – Observe – Explain)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat meramalkan suhu campuran air panas dan air dingin dengan asas Black.
- Peserta didik dapat mengukur suhu campuran untuk berbagai perbandingan massa dan membandingkannya dengan ramalan.
- Peserta didik dapat menghitung kalor yang dilepas dan kalor yang diterima, lalu menjelaskan selisihnya.
- Peserta didik dapat menjelaskan peran kalorimeter (bahan isolator dan tutup) dalam mengurangi kalor yang hilang.

Fenomena



Pagi itu air keran di rumah Sari terasa dingin, padahal adiknya mau mandi. Sari menuang air panas dari termos ke ember. Raka berkomentar, "Gampang! Air panas 70 °C dicampur air 27 °C, hasilnya pasti rata-ratanya, 48,5 °C." Sari ragu, "Bagaimana kalau air panasnya cuma sedikit?" Kak Nara mengajak kelompokmu menguji kedua pendapat itu dengan gelas styrofoam. Tarsi menambah tantangan: "Mengapa hasil pengukuran hampir selalu sedikit lebih rendah daripada ramalan?"

Rumusan masalah

Bagaimana suhu campuran air panas dan air dingin bergantung pada perbandingan massanya, dan seberapa dekat hasil pengukuran dengan ramalan asas Black?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Massa air panas m_1 (50, 100, 150, 200, dan 250 g)	Suhu campuran T_c	Massa air dingin $m_2 = 150$ g, suhu awal air dingin, kalorimeter yang sama, cara dan lama mengaduk (± 30 s)

Alat dan bahan

- 2 gelas styrofoam (gelas kopi sekali pakai) yang ditumpuk menjadi satu sebagai kalorimeter sederhana, dengan tutup karton yang diberi lubang kecil untuk termometer
- 1 termometer digital (ketelitian 0,1 °C, misalnya termometer masak tusuk) atau termometer alkohol 0–100 °C
- Timbangan dapur digital (ketelitian 1 g) atau gelas ukur 250 mL (1 mL air $\approx$ 1 g)
- Termos berisi air panas ± 70 °C (dari dispenser) dan wadah berisi air keran bersuhu kamar
- Sendok plastik atau sedotan untuk mengaduk, gelas plastik tambahan untuk menakar air panas, nampan, lap, dan stopwatch HP

⚠ Keselamatan

Pakai air panas paling tinggi $\pm 70^\circ\text{C}$ dari termos atau dispenser, bukan air yang baru mendidih. Tuang air panas di atas nampan, pegang gelas pada bagian bawahnya, dan jangan berjalan sambil membawa gelas berisi air panas. Jangan mengaduk dengan termometer; pakai sendok plastik. Jika termometer kaca pecah, jangan disentuh dan segera laporkan kepada guru. Segera lap tumpahan agar lantai tidak licin.

📋 Langkah kerja

1. Timbang 150 g air keran ke dalam kalorimeter styrofoam. Ukur suhunya (T_2).
2. Timbang 50 g air panas dari termos di gelas lain, lalu ukur suhunya (T_1) secepat mungkin.
3. Tulis ramalanmu sebelum mencampur: $T_{\text{ramalan}} = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2}$.
4. Tuang air panas ke kalorimeter, tutup, aduk perlahan ± 30 s, lalu catat suhu tertinggi yang stabil sebagai T_c .
5. Buang airnya, keringkan kalorimeter, lalu ulangi langkah 1–4 dengan air panas 100, 150, 200, dan 250 g.
6. Hitung kalor yang dilepas air panas $Q_{\text{lepas}} = m_1 c (T_1 - T_c)$ dan kalor yang diterima air dingin $Q_{\text{terima}} = m_2 c (T_c - T_2)$, dengan $c = 4,2 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$.
7. Gambar grafik T_c ukur (sumbu tegak) terhadap T_c ramalan (sumbu mendatar), lalu gambar garis $y = x$ sebagai pembanding.

📋 Tabel pengamatan ($m_2 = 150 \text{ g}$, $c = 4,2 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$)

Percobaan	m_1 (g)	T_1 ($^\circ\text{C}$)	T_2 ($^\circ\text{C}$)	T_c ukur ($^\circ\text{C}$)	T_c ramalan ($^\circ\text{C}$)	Q lepas (J)	Q terima (J)
1							
2							
3							
4							
5							

📊 Grafik

Grafik T_c ukur (sumbu tegak) terhadap T_c ramalan (sumbu mendatar), dengan skala yang sama pada kedua sumbu. Gambar garis $y = x$ (ukur = ramalan) sebagai pembanding.

🧠 Analisis

1. Bandingkan T_c ukur dan T_c ramalan pada setiap percobaan. Apakah tebakan Raka ("pasti rata-ratanya") benar? Kapan tebakan itu kebetulan mendekati benar?

Kunci: Tebakan Raka hanya mendekati benar jika massa air panas sama dengan massa air dingin (percobaan 3: ramalan $48,3^\circ\text{C}$, terukur $47,4^\circ\text{C}$). Untuk massa berbeda, suhu campuran lebih dekat ke suhu air yang massanya lebih besar, misalnya 50 g air panas hanya menghasilkan $\pm 37^\circ\text{C}$. T_c adalah rata-rata yang "ditimbang" dengan massa.

2. Titik-titik di grafikmu berada di atas, di bawah, atau tepat pada garis $y = x$? Apa artinya?

Kunci: Semua titik sedikit di bawah garis $y = x$ ($\pm 0,5$ – $0,9^\circ\text{C}$). Artinya suhu campuran selalu sedikit lebih rendah daripada ramalan: sebagian kalor dari air panas tidak diterima oleh air dingin.

3. Bandingkan Q_{lepas} dan Q_{terima} . Mengapa tidak sama? Ke mana selisih kalornya pergi?

Kunci: Contoh percobaan 3: $Q_{\text{lepas}} = 150 \times 4,2 \times (69,5 - 47,4) = 13\,923 \text{ J}$, sedangkan $Q_{\text{terima}} = 150 \times 4,2 \times (47,4 - 27,0) = 12\,852 \text{ J}$. Selisih $\pm 1.070 \text{ J}$ ($\pm 8\%$) dipakai untuk memanaskan gelas styrofoam, termometer, dan sendok, serta bocor ke udara lewat permukaan air, tutup, dan saat menuang. Asas Black tetap berlaku jika semua penerima kalor ikut dihitung.

4. Perkirakan kapasitas kalor "tersembunyi" (gelas, termometer, sendok, ditambah kalor yang bocor ke udara) dari salah satu percobaan dengan $C_x = (Q_{\text{lepas}} - Q_{\text{terima}})/(T_c - T_2)$. Setara dengan berapa gram air?

Kunci: Dari percobaan 3: $C_x = 1071/(47,4 - 27,0) \approx 52 \text{ J/}^\circ\text{C}$, setara dengan $52/4,2 \approx 12 \text{ g}$ air. Jadi kalorimeter, termometer, dan kebocoran berperilaku seperti $\pm 12 \text{ g}$ air tambahan yang ikut dipanaskan.

5. Mengapa kalorimeter dibuat dari styrofoam dan diberi tutup? Ramalkan hasilnya bila kalorimeter diganti gelas aluminium tanpa tutup.

Kunci: Styrofoam penuh gelembung udara sehingga menghantarkan kalor sangat lambat (isolator), dan kapasitas kalornya kecil karena sangat ringan. Tutup mengurangi kalor yang hilang lewat konveksi dan penguapan. Gelas aluminium tanpa tutup menyerap lebih banyak kalor (mc lebih besar) dan menghantarkannya ke udara, sehingga T_c terukur jauh lebih rendah daripada ramalan.

6. Berapa gram air termos 70°C yang perlu dicampurkan ke 150 g air 27°C agar suhu campurannya 40°C ? Apakah hasil nyatanya akan sedikit di atas atau di bawah 40°C ?

Kunci: $m_1(70 - 40) = 150(40 - 27)$, sehingga $m_1 = 150 \times 13/30 = 65 \text{ g}$. Hasil nyatanya akan sedikit di bawah 40°C karena sebagian kalor diserap gelas dan bocor ke udara; agar tepat 40°C , tambahkan sedikit lebih banyak air panas.

7. Kaitkan hasil percobaan ini dengan menyiapkan air mandi hangat untuk adik dan dengan es teh yang diberi es batu.

Kunci: Banyaknya air panas untuk air mandi bergantung pada massa air dingin dan suhu yang diinginkan, bukan sekadar "setengah-setengah". Ember dan udara juga ikut menyerap kalor, jadi siapkan sedikit air panas cadangan dan selalu cek suhunya dengan tangan sebelum dipakai. Pada es teh, es batu menyerap kalor dari teh, termasuk kalor lebur yang besar, sehingga suhu teh turun jauh walaupun massa esnya kecil.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang cara meramalkan suhu campuran, lengkap dengan persamaan asas Black, dan jelaskan mengapa hasil pengukuran sedikit berbeda dari ramalan.

💡 Refleksi

- Tebakanku sebelum percobaan adalah ..., dan ternyata ...
- Bagian percobaan yang menuntutku paling berhati-hati adalah ...
- Di rumah, aku bisa memakai asas Black untuk ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Lab asas Black: campurkan, lalu amati kalornya" di Bab 15 (subbab 15.5). Pilih Air panas dan Air dingin, atur suhu benda panas 70°C , massa benda dingin 150 g , dan suhu air dingin 27°C . Ubah massa benda panas menjadi $50, 100, 150, 200$, dan 250 g . Untuk setiap massa, tekan Campurkan!, lalu catat suhu akhir dan "Ramalan asas Black". Ulangi dengan "Kalorimeter bocor" dinyalakan,

lalu bandingkan batang kalor yang dilepas dan yang diterima. Sebagai pengayaan, ganti benda panas dengan balok besi 200 g bersuhu 100 °C.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b15-5

Contoh data (kalorimeter dua gelas styrofoam bertutup, termometer digital 0,1 °C)

Percobaan	m_1 (g)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_c ukur (°C)	T_c ramalan (°C)	Q lepas (J)	Q terima (J)
1	50	70,0	27,0	37,2	37,8	6.888	6.426
2	100	70,0	27,0	43,4	44,2	11.172	10.332
3	150	69,5	27,0	47,4	48,3	13.923	12.852
4	200	69,0	27,0	50,2	51,0	15.792	14.616
5	250	68,5	27,0	52,1	52,9	17.220	15.813

Rubrik penilaian

Aspek	4 - Sangat baik	3 - Baik	2 - Cukup	1 - Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, ramalan ditulis sebelum mencampur, massa ditimbang teliti, kalorimeter selalu ditutup, dan aturan keselamatan air panas dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu percobaan yang kurang rapi (misalnya tutup lupa dipasang).	Ramalan tidak ditulis lebih dulu atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, T_c ramalan, Q_{lepas} , dan Q_{terima} dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau Q dihitung dengan beda suhu yang salah.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi dengan garis $y = x$, selisih ramalan dan pengukuran ditafsirkan, dan C_x diperkirakan dengan benar.	Grafik benar tetapi penjelasan selisih kalor kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis pembanding.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($Q_{\text{lepas}} = Q_{\text{terima}}$, T_c rata-rata yang ditimbang massa), didukung data, menjelaskan kalor yang hilang, dan dikaitkan dengan kehidupan sehari-hari.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat, misalnya hanya menyebut "suhu campuran di antara kedua suhu".	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Air panas ± 70 °C dari dispenser sudah memberi beda suhu yang jelas dan jauh lebih aman daripada air mendidih. Bila tidak ada timbangan, pakai gelas ukur (1 mL air $\approx$ 1 g). Termometer digital masak (0,1 °C) memberi hasil jauh lebih jelas daripada termometer alkohol berskala 1 °C. Pastikan setiap kelompok menulis

ramalan sebelum mencampur (tahap Predict), agar diskusi selisih ramalan dan pengukuran menjadi bermakna. Sebagai pengayaan, tantang siswa mencampur air dengan es batu (subbab 15.4–15.5).

Physicspedia · LKPD Bab 15 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Suntikan di Atas Timbangan Dapur: Membuktikan Hukum Boyle

Bab 16 • Teori Kinetik Gas

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI (juga cocok untuk IGCSE dan IB)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara tekanan dan volume sejumlah udara bersuhu tetap di dalam suntikan tertutup.
- Peserta didik dapat menghitung tekanan mutlak udara dari gaya tekan dan luas penampang pendorong memakai $P = P_0 + F/A$.
- Peserta didik dapat menafsirkan kemiringan grafik $P-1/V$ sebagai nRT dan menghitung jumlah mol udara di dalam suntikan.
- Peserta didik dapat menjelaskan sumber galat (gesekan pendorong, ruang mati di ujung suntikan, perubahan suhu) dan cara menguranginya.

Fenomena



Raka membantu Pak Darto di kios tambal ban dekat sekolah. Iseng, ia menutup ujung selang pompa dengan ibu jarinya lalu menekan gagang pompa. Makin dalam gagang ditekan, makin kuat udara di dalam pompa melawan tangannya! Sari langsung bertanya, "Kalau volumenya tinggal setengah, apakah tekanannya tepat dua kali?" Kak Nara menyodorkan suntikan baru tanpa jarum dan sebuah timbangan dapur: "Timbangan ini bisa jadi alat ukur tekanan, asal kalian tahu luas pendorongnya." Tarsi sudah siap mencatat setiap angka!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara tekanan P dan volume V sejumlah udara di dalam suntikan tertutup jika suhunya dijaga tetap?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Volume udara V yang terbaca pada skala suntikan (9,0; 8,0; 7,0; 6,0; 5,0; dan 4,0 mL)	Tekanan mutlak udara P , dihitung dari bacaan timbangan	Jumlah udara di dalam suntikan (ujung tetap tertutup rapat), suhu ruang, suntikan yang sama (luas pendorong A tetap), dan tekanan udara luar P_0

Alat dan bahan

- 1 suntikan plastik 10 mL yang masih baru, tanpa jarum (ada di apotek), ditambah 1 suntikan cadangan
- Penutup ujung suntikan: lem tembak (dipasang oleh guru) atau segumpal plastisin yang ditekan rapat lalu dililit selotip

- 1 timbangan dapur digital berkapasitas ≥ 5 kg dengan ketelitian 1 g
- Penggaris 30 cm untuk mengukur panjang skala 0–10 mL
- 1–2 tetes minyak goreng untuk melumasi karet pendorong, dan tisu
- Termometer ruang (atau perkiraan suhu dari aplikasi cuaca di HP) dan kertas milimeter

⚠ Keselamatan

Pakai suntikan baru tanpa jarum. Jika kemasannya berisi jarum, serahkan jarum kepada guru untuk dibuang ke wadah khusus benda tajam; jangan melepaskannya sendiri. Lem tembak panas hanya dipakai oleh guru atau orang dewasa; tunggu lem dingin sebelum disentuh. Saat ditekan kuat, tutup ujung suntikan bisa terlepas dan terlontar ke atas, jadi jangan menunduk tepat di atas ujung suntikan: baca skala dari samping. Tekan perlahan dengan jari, jangan dengan berat badan, dan jangan melebihi kapasitas timbangan. Lap tetesan minyak agar meja dan tangan tidak licin.

📋 Langkah kerja

1. Ukur panjang skala suntikan dari garis 0 sampai garis 10 mL dengan penggaris. Hitung luas penampang dalam tabung $A = 10,0 \text{ cm}^3 \div \text{panjang}$. Contoh: panjang 5,10 cm memberi $A = 1,96 \text{ cm}^2 = 1,96 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.
2. Catat suhu ruang dan tekanan udara luar P_0 : ± 101 kPa di dataran rendah. Di dataran tinggi, kurangi $\pm 1,2$ kPa untuk setiap kenaikan 100 m, atau baca sensor barometer HP bila ada.
3. Oleskan setetes minyak goreng pada karet pendorong dan gerakkan maju-mundur beberapa kali. Tarik pendorong sampai tepi depan karet tepat di garis 10,0 mL, lalu tutup ujung suntikan rapat-rapat.
4. Uji kebocoran: tekan pendorong sampai ± 5 mL, tahan 10 detik, lalu lepaskan. Jika pendorong kembali ke $\pm 10,0$ mL, suntikan kedap udara. Jika tidak, perbaiki tutupnya.
5. Berdirikan suntikan dengan pangkal pendorong (bagian yang biasa ditekan ibu jari) di atas timbangan dapur dan ujung suntikan menghadap ke atas. Nyalakan timbangan, lalu tekan tombol nol (tara).
6. Pegang suntikan hanya pada sayap tabungnya, jangan digenggam. Tekan tabung perlahan ke bawah sampai tepi depan karet tepat di garis 9,0 mL, tunggu ± 5 detik sampai angka stabil, lalu catat bacaan timbangan sebagai m_1 (saat ditekan).
7. Tekan sedikit lebih jauh ($\pm 0,5$ mL), lalu kurangi tekanan perlahan sampai karet kembali tepat di garis 9,0 mL. Catat bacaan timbangan sebagai m_2 (saat dilepas pelan).
8. Ulangi langkah 6–7 untuk volume 8,0; 7,0; 6,0; 5,0; dan 4,0 mL. Baca skala dari samping, setinggi mata.
9. Hitung m rata-rata, gaya $F = mg$ (m dalam kg, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$), tekanan mutlak $P = P_0 + F/A$ (ubah Pa ke kPa), $1/V$, dan $P \times V$ untuk setiap baris. Gambar grafik P terhadap $1/V$ di kertas milimeter, lalu tarik garis lurus terbaik.

 **Tabel pengamatan (V awal = 10,0 mL pada tekanan P_0 ; tulis A , P_0 , dan suhu ruang di atas tabel)**

V (mL)	m_1 saat ditekan (g)	m_2 saat dilepas pelan (g)	m rata-rata (g)	$F = mg$ (N)	$P = P_0 + F/A$ (kPa)	$1/V$ (mL ⁻¹)	$P \times V$ (kPa·mL)
9,0							
8,0							
7,0							
6,0							
5,0							
4,0							

Grafik

Grafik tekanan mutlak P (sumbu tegak) terhadap $1/V$ (sumbu mendatar). Mulailah kedua sumbu dari nol agar terlihat apakah garis lurus terbaik melewati titik asal. Sebagai pembanding, boleh juga menggambar P terhadap V (berbentuk hiperbola).

Analisis

1. Amati kolom $P \times V$. Apakah nilainya hampir tetap? Bagaimana bentuk grafik $P-1/V$? Apakah tebakan (hipotesis) kelompokmu terbukti?

Kunci: Ya. Pada contoh data, $P \times V$ hanya berkisar 997–1.011 kPa·mL (rata-rata 1.003,5 kPa·mL), padahal P naik dari 112 kPa menjadi 249 kPa. Grafik $P-1/V$ berupa garis lurus yang hampir melewati titik asal, jadi $P \propto 1/V$ atau $PV = \text{tetap}$ (hukum Boyle). Hipotesis "volume setengahnya, tekanan dua kalinya" terbukti: dari 8,0 mL ke 4,0 mL, tekanan naik dari 126 kPa menjadi 249 kPa (± 2 kali).

2. Hitung kemiringan (gradien) garis grafik $P-1/V$. Besaran apa yang ditunjukkan kemiringan itu? Bandingkan dengan $P_0 \times 10,0$ mL, lalu hitung jumlah mol udara di dalam suntikan memakai $PV = nRT$.

Kunci: Kemiringan = $\Delta P / \Delta(1/V)$. Contoh: $(249,3 - 112,1) / (0,250 - 0,111) \approx 987 \text{ kPa} \cdot \text{mL} \approx 0,99 \text{ J}$ (karena $1 \text{ kPa} \cdot \text{mL} = 10^{-3} \text{ J}$). Kemiringan ini sama dengan $PV = nRT$, dan hampir sama dengan $P_0 \times 10,0 \text{ mL} = 1.010 \text{ kPa} \cdot \text{mL}$. Jumlah mol udara: $n = \frac{0,99}{8,31 \times 300} \approx 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

3. Bacaan m_1 selalu lebih besar daripada m_2 . Mengapa? Perkirakan besar gaya gesek antara karet pendorong dan tabung, lalu jelaskan mengapa kita memakai rata-rata m_1 dan m_2 .

Kunci: Saat tabung ditekan turun, gesekan karet ikut mendorong pendorong ke bawah, sehingga timbangan membaca gaya dari udara ditambah gesekan. Saat dilepas pelan, gesekan berbalik arah, sehingga timbangan membaca gaya dari udara dikurangi gesekan. Pada contoh data, selisih $m_1 - m_2$ tetap $\pm 100 \text{ g}$, jadi gaya gesek $f \approx \frac{1}{2} \times 0,10 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \approx 0,5 \text{ N}$. Rata-rata m_1 dan m_2 menghapus pengaruh gesekan sehingga yang tersisa hanya gaya dari tekanan udara.

4. Nilai $P \times V$ cenderung sedikit mengecil saat volumenya makin kecil. Sebutkan dua kemungkinan penyebabnya.

Kunci: (1) Ruang mati: udara di dalam moncong suntikan dan di bawah tutupnya ($\pm 0,1$ mL) tidak terbaca skala. Yang benar-benar tetap adalah $P(V + 0,1 \text{ mL})$, yang pada contoh data bernilai ± 1.020 kPa·mL di semua baris, sehingga PV terbaca mengecil dari ± 1.010 menjadi 997 kPa·mL saat V kecil. (2) Sedikit udara bocor lewat tepi karet atau tutup ujung saat tekanannya tinggi. Perbaiki: tutup ujung serapat mungkin dan ulangi uji kebocoran.

5. Mengapa suntikan harus ditekan perlahan dan ditunggu beberapa detik sebelum timbangan dibaca? Apa akibatnya pada data jika tabung digenggam erat dengan telapak tangan?

Kunci: Menekan dengan cepat berarti melakukan usaha pada udara sehingga suhunya naik sesaat (seperti pompa sepeda yang terasa hangat), dan tekanannya lebih besar daripada nilai Boyle. Menunggu beberapa detik membuat udara kembali ke suhu ruang sehingga syarat Boyle (suhu tetap) terpenuhi. Jika tabung digenggam, suhu udara bisa naik beberapa derajat: kenaikan 6°C ($300 \text{ K} \rightarrow 306 \text{ K}$) membuat PV naik $\pm 2\%$, sehingga data tidak lagi isothermal.

6. Gunakan hasilmu untuk menjelaskan mengapa gagang pompa ban makin berat ditekan menjelang akhir dorongan. Berapa volume udara di dalam suntikan jika tekanannya dibuat 3 kali tekanan udara luar?

Kunci: Tekanan udara di pompa naik berbanding terbalik dengan volumenya ($P \propto 1/V$), sehingga gaya yang dibutuhkan, $(P - P_0)A$, naik makin cepat menjelang akhir dorongan, seperti bacaan timbangan yang melonjak dari $\pm 0,2$ kg menjadi ± 3 kg pada contoh data. Untuk $P = 3P_0 = 303 \text{ kPa}$: $V = \frac{PV}{P} \approx \frac{1.003,5}{303} \approx 3,3 \text{ mL}$, sepertiga volume awal.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan tekanan dan volume gas bersuhu tetap dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaannya dan nilai PV yang kamu peroleh.

💡 Refleksi

- Saat menekan suntikan, aku paling terkejut ketika ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang tekanan dan volume gas adalah ...
- Satu contoh hukum Boyle yang kutemui di rumah atau di jalan adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Pompa ban: hukum Boyle di tanganmu" di Bab 16 (subbab 16.2). Atur tekanan awal ban 30 psi agar katup lama tertutup, lalu seret gagang pompa ke bawah sedikit demi sedikit. Di setiap posisi, catat V dari tulisan " $P \times V = \dots$ " di bawah grafik dan tekanan dari angka "Tekanan udara pompa" (kPa), lalu isi kolom V , P , $1/V$, dan $P \times V$ (kolom massa dan gaya dikosongkan). Selama katup tertutup, $P \times V$ tetap $\pm 41 \text{ kPa}\cdot\text{L}$. Untuk melihat sisi molekulnya, pakai Lab Mini "Kotak gas: lihat tekanan lahir dari tumbukan" (subbab 16.4): biarkan jumlah molekul dan suhu tetap, ubah volume dari 100% ke 40%, lalu catat "P terukur (tumbukan)".

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b16-2

 Contoh data ($A = 1,96 \text{ cm}^2$; $P_0 = 101 \text{ kPa}$; suhu ruang 27°C)

V (mL)	m_1 saat ditekan (g)	m_2 saat dilepas pelan (g)	m rata-rata (g)	$F = mg$ (N)	$P = P_0 + F/A$ (kPa)	$1/V$ (mL^{-1})	$P \times V$ (kPa·mL)
9,0	275	170	222,5	2,18	112,1	0,111	1.009
8,0	558	456	507	4,97	126,4	0,125	1.011
7,0	899	798	848,5	8,32	143,4	0,143	1.004
6,0	1.366	1.265	1.315,5	12,89	166,8	0,167	1.001
5,0	2.028	1.924	1.976	19,36	199,8	0,200	999
4,0	3.015	2.917	2.966	29,07	249,3	0,250	997

 Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Suntikan lolos uji kebocoran, ditekan perlahan, m_1 dan m_2 dicatat untuk semua volume, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu volume yang hanya diukur sekali atau bacaannya kurang teliti.	Suntikan bocor atau beberapa langkah terlewat sehingga data meragukan.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, serta F , $P = P_0 + F/A$, $1/V$, dan PV dihitung tepat (termasuk konversi cm^2 ke m^2 dan Pa ke kPa).	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Lupa menambahkan P_0 (memakai tekanan terukur) atau salah mengonversi satuan.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik $P-1/V$ rapi (sumbu dari nol, satuan, skala tepat), garis terbaik ditarik, kemiringan dihitung dan ditafsirkan sebagai nRT , lalu jumlah mol dihitung.	Grafik benar tetapi penafsiran kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala, tanpa garis terbaik, atau hanya grafik $P-V$.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($PV = \text{tetap}$ pada suhu tetap), didukung data, membahas gesekan dan ruang mati sebagai sumber galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

 Catatan guru

Suntikan 10 mL dengan karet yang licin memberi hasil terbaik; suntikan 5 mL juga bisa dan butuh gaya lebih kecil. Pasang lem tembak sehari sebelumnya, atau pakai plastisin yang dililit selotip setelah lolos uji kebocoran. Jika timbangan hanya berkapasitas 3 kg, hentikan percobaan di 5,0 mL. Di dataran tinggi P_0 lebih kecil (Bandung $\pm 93 \text{ kPa}$, Dieng $\pm 80 \text{ kPa}$), sehingga nilai PV ikut lebih kecil tetapi tetap konstan: bahan

diskusi yang bagus. Nilai PV yang sedikit menurun dan garis yang tidak tepat melewati titik asal adalah pintu masuk ke analisis galat sistematis (ruang mati) gaya IB.

Physicspedia · LKPD Bab 16 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Air Terjun Mini di Dalam Pipa: Mengubah Usaha Menjadi Energi Dalam

Bab 17 • Termodinamika

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI (versi sederhana untuk SMP kelas 8–9)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara usaha mekanis yang diberikan pada pasir (banyaknya pembalikan pipa) dan kenaikan suhu pasir.
- Peserta didik dapat menghitung usaha $W = N m g h$ dan perubahan energi dalam $\Delta U = m c \Delta T$ dari data percobaan.
- Peserta didik dapat menerapkan Hukum I termodinamika $\Delta U = Q - W$ dengan konvensi tanda yang benar untuk menjelaskan selisih antara ΔU dan usaha.
- Peserta didik dapat mengevaluasi sumber galat dan kebocoran energi dalam percobaan.

Fenomena



Raka membaca kisah Joule yang konon membawa termometer saat berbulan madu untuk mengukur suhu air terjun. Ia lalu menghitung: air yang jatuh dari Air Terjun Sipiso-piso (± 120 m) hanya menghangat $\pm 0,3$ °C. "Terlalu kecil, mana bisa dibuktikan di kelas," keluhnya. Sari tidak mau menyerah: "Bagaimana kalau air terjunnya kita buat sendiri, lalu kita ulang ratusan kali?" Kak Nara menyodorkan pipa PVC sepanjang 1 m berisi pasir: "Balik pipa ini 300 kali, sama saja dengan menjatuhkan pasir dari ketinggian lebih dari 250 m! Kalor jenis pasir juga ± 5 kali lebih kecil daripada air, jadi pasir lebih mudah menghangat." Tarsi sudah siap dengan termometer digitalnya.

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara usaha mekanis yang diberikan pada pasir (banyaknya pembalikan pipa N) dan kenaikan suhu pasir ΔT ? Berapa bagian usaha itu yang benar-benar menjadi energi dalam pasir?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Banyaknya pembalikan pipa N (50, 100, ..., 300 kali), yang menentukan usaha $W = N m g h$	Kenaikan suhu pasir ΔT	Massa pasir (0,200 kg), tinggi jatuh h , irama membalik (± 1 kali per detik), pipa yang sama dan selalu terbungkus handuk

Alat dan bahan

- 1 batang pipa PVC berdiameter 1¼ inci ($\pm 3,5$ cm) sepanjang 1,00 m, dengan 2 dop (tutup) PVC yang pas
- ± 200 g pasir kering yang sudah diayak (timbang dengan timbangan dapur digital, ketelitian 1 g)

- 1 termometer digital akuarium berkabel probe (resolusi 0,1 °C); probe-nya dipasang menembus salah satu dop oleh guru
- 1 handuk kecil atau lembaran busa dan lakban untuk membungkus pipa
- Meteran gulung, 1 lidi panjang (± 1 m) untuk mengukur tebal lapisan pasir, dan stopwatch di HP
- 1 nampan atau beberapa lembar koran untuk mendinginkan pasir di antara dua uji

⚠ Keselamatan

Kosongkan ruang $\pm 1,5$ m di sekitar orang yang membalik pipa agar pipa tidak mengenai teman, lampu, atau jendela. Pastikan kedua dop terpasang rapat dan dilakban agar pasir tidak tumpah ke mata. Lubang probe di dop dibuat oleh guru, bukan oleh peserta didik. Pakai pasir yang bersih dan kering, jangan meniup pasir, dan cuci tangan setelah percobaan. Bergantianlah membalik pipa dan berhenti bila lengan terasa pegal agar tidak cedera.

📋 Langkah kerja

1. Timbang 200 g pasir kering, masukkan ke dalam pipa, lalu pasang kedua dop rapat-rapat dan lakban. Pastikan ujung probe termometer berada ± 2 cm di dalam pipa.
2. Ukur tinggi jatuh pasir. Berdirikan pipa dengan dop berprobe di bawah, buka dop atas, lalu masukkan lidi sampai menyentuh pasir untuk mengetahui tebal lapisan pasir h_p . Tinggi jatuh $h = L - h_p$, dengan L panjang bagian dalam pipa. Tutup dan lakban kembali dop atas.
3. Bungkus pipa dengan handuk atau busa (layar termometer tetap terlihat). Biarkan pipa berdiri tegak dengan ujung probe di bawah selama ± 2 menit, lalu catat suhu awal T_0 .
4. Uji 1: pegang pipa di bagian tengahnya, lalu balik pipa 180° dalam bidang tegak dengan irama ± 1 kali per detik sehingga pasir jatuh dari ujung ke ujung. Setiap pembalikan dihitung satu kali.
5. Setelah 50 kali balik, berhenti dengan ujung probe di bawah (karena 50 bilangan genap, ujung probe kembali ke bawah). Tunggu ± 15 – 20 detik sampai angka termometer stabil, catat suhu T , dan hitung $\Delta T = T - T_0$.
6. Lanjutkan membalik dan catat suhu setiap 50 kali balik sampai 300 kali. Anggota kelompok boleh bergantian membalik, asalkan iramanya tetap.
7. Uji 2: tuang pasir ke nampan, ratakan, dan biarkan ± 10 menit sampai suhunya kembali mendekati suhu ruang. Masukkan lagi ke dalam pipa dan ulangi langkah 3–6.
8. Hitung $W = N m g h$ (dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$), ΔT rata-rata, $\Delta U = m c \Delta T$ (kalor jenis pasir kering $c \approx 800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$; perubahan 1°C sama dengan 1 K), dan perbandingan $\Delta U/W$ untuk setiap baris.

📊 Tabel pengamatan ($m = \dots \text{ kg}$; $h = \dots \text{ m}$; T_0 uji 1 = $\dots^\circ\text{C}$; T_0 uji 2 = $\dots^\circ\text{C}$)

N (kali dibalik)	$W = N \cdot m \cdot g \cdot h$ (J)	ΔT uji 1 (°C)	ΔT uji 2 (°C)	ΔT rata-rata (°C)	$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T$ (J)	$\Delta U/W$ (%)
50						
100						
150						
200						
250						
300						

Grafik

Grafik ΔT rata-rata (sumbu tegak) terhadap usaha W (sumbu mendatar). Tarik garis lurus terbaik yang melalui titik $(0, 0)$. Pada kertas yang sama, gambar garis putus-putus $\Delta T = W/(mc)$ sebagai garis teori jika seluruh usaha menjadi energi dalam pasir.

Analisis

1. Bagaimana kenaikan suhu pasir berubah ketika banyaknya pembalikan (usaha) dijadikan dua atau tiga kali lipat? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti?

Kunci: ΔT naik hampir sebanding dengan N . Pada contoh data, 100 kali balik $\rightarrow 0,70^\circ\text{C}$, 200 kali $\rightarrow 1,30^\circ\text{C}$, dan 300 kali $\rightarrow 1,90^\circ\text{C}$. Kenaikannya tidak persis 2 dan 3 kali lipat karena resolusi termometer $0,1^\circ\text{C}$ dan kebocoran kalor. Hipotesis "makin besar usaha, makin besar kenaikan suhu, secara sebanding" terbukti.

2. Hitung kemiringan garis terbaik pada grafikmu. Bandingkan dengan kemiringan garis teori $1/(mc)$. Berapa persen usaha yang tersimpan sebagai energi dalam pasir?

Kunci: Garis terbaik melalui $(0, 0)$ pada contoh data berkemiringan $\pm 0,0038^\circ\text{C/J}$, sedangkan garis teori $1/(mc) = 1/(0,200 \times 800) = 0,00625^\circ\text{C/J}$. Jadi $\pm 61\%$ usaha tersimpan sebagai energi dalam pasir (kolom $\Delta U/W$ berkisar 60–67%). Jika dihitung balik, "kalor jenis semu" pasir $1/(m \times \text{kemiringan}) \approx 1.300 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, lebih besar daripada $800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ karena ada energi yang bocor.

3. Tuliskan Hukum I termodinamika untuk pasir (sebagai sistem) dengan konvensi buku ini, $\Delta U = Q - W$ dengan W = usaha oleh sistem. Apa tanda W ? Berapa nilai Q untuk data $N = 300$, dan apa artinya?

Kunci: Lingkungan (tangan yang mengangkat pasir, lalu gravitasi yang menjatuhkannya) melakukan usaha pada pasir, sehingga usaha oleh pasir negatif: $W = -N m g h = -499,8 \text{ J}$. Dari $\Delta U = Q - W$ diperoleh $Q = \Delta U + W = 304 - 499,8 \approx -196 \text{ J}$. Q negatif berarti $\pm 196 \text{ J}$ energi keluar dari pasir sebagai kalor ke dinding pipa, dop, dan udara (sebagian kecil merambat sebagai bunyi).

4. Nilai $\Delta U/W$ cenderung sedikit mengecil ketika N makin besar. Jelaskan penyebabnya.

Kunci: Makin lama percobaan berjalan dan makin panas pasir dibandingkan sekitarnya, makin cepat kalor bocor ke pipa dan udara, karena laju kebocoran sebanding dengan selisih suhu. Dinding pipa dan dop juga ikut menyerap energi. Akibatnya, porsi energi yang tersimpan turun dari $\pm 67\%$ ($N = 50\text{--}100$) menjadi $\pm 60\text{--}61\%$ ($N = 250\text{--}300$).

5. Mengapa pipa dibungkus handuk dan dipegang di bagian tengahnya? Proses mana di bab ini yang ingin kita dekati?

Kunci: Agar kalor dari tangan tidak masuk ke pasir dan kalor pasir tidak cepat keluar, sehingga $Q \approx 0$. Kita ingin mendekati proses adiabatik, seperti pompa sepeda yang ditekan cepat: semua usaha diharapkan menjadi energi dalam.

6. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: resolusi termometer $0,1^\circ\text{C}$ cukup besar dibandingkan $\Delta T \pm 0,35^\circ\text{C}$ pada $N = 50$; pasir tidak selalu jatuh penuh setinggi h karena pipa tidak benar-benar tegak dan sebagian pasir menggelincir di dinding; salah menghitung jumlah balikan; kalor bocor ke pipa. Perbaikan: membalik lebih banyak kali per data atau memakai pipa yang lebih panjang, memakai gotri (bola baja, kalor jenis $\pm 450 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) agar ΔT hampir 2 kali lebih besar, atau menghitung balikan dari rekaman video HP.

7. Hubungkan hasil percobaanmu dengan Air Terjun Sipiso-piso dan dengan cakram rem motor yang menjadi panas setelah menuruni jalan panjang dari kawasan Puncak.

Kunci: Air terjun adalah "pipa pasir" raksasa yang hanya jatuh sekali: $\Delta T = gh/c$ hanya $\pm 0,3^\circ\text{C}$ untuk air setinggi 120 m karena kalor jenis air besar. Pipa kita mengulang jatuhnya 300 kali (setara ± 255 m) dengan pasir yang kalor jenisnya ± 5 kali lebih kecil, sehingga kenaikan $\pm 2^\circ\text{C}$ dapat terukur. Saat motor menuruni jalan panjang, energi potensial motor dan pengendara diubah oleh gesekan rem menjadi energi dalam cakram, sehingga cakram bisa sangat panas. Keduanya contoh usaha yang berubah menjadi energi dalam.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan usaha mekanis dan energi dalam pasir dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaan Hukum I dan persentase usaha yang tersimpan sebagai energi dalam.

💡 Refleksi

- Saat lenganku pegal membalik pipa, aku menyadari bahwa ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang tanda kalor (Q) dan usaha (W) adalah ...
- Satu contoh usaha yang berubah menjadi energi dalam yang kutemui di rumah atau di jalan adalah ...

🖥️ Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Silinder piston: lihat usaha menjadi luas" di Bab 17 (subbab 17.2). Pilih proses Adiabatik (tanpa kalor) dan gas diatomik. Atur volume akhir $V_2 = 1,8; 1,6; 1,4; 1,2$; dan $1,0$ L (gas dimampatkan dari 2 L), tekan Jalankan, lalu catat W , Q , ΔU , dan T . Usaha yang diberikan pada gas sama dengan $-W$. Isi tabel serupa (kolom N diganti V_2), lalu buat grafik ΔU terhadap usaha pada gas. Ulangi dengan proses Isotermal untuk melihat apa yang terjadi jika kalor boleh keluar, seperti pipa yang tidak dibungkus.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b17-3

📊 **Contoh data ($m = 0,200$ kg; $L = 1,00$ m; $h_p = 0,15$ m sehingga $h = 0,85$ m; $c_{\text{pasir}} = 800$ J/kg·K; T_0 uji 1 = $27,0^\circ\text{C}$; T_0 uji 2 = $27,3^\circ\text{C}$)**

N (kali dibalik)	$W = N \cdot m \cdot g \cdot h$ (J)	ΔT uji 1 ($^\circ\text{C}$)	ΔT uji 2 ($^\circ\text{C}$)	ΔT rata-rata ($^\circ\text{C}$)	$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T$ (J)	$\Delta U/W$ (%)
50	83,3	0,4	0,3	0,35	56	67
100	166,6	0,7	0,7	0,70	112	67
150	249,9	1,0	1,0	1,00	160	64
200	333,2	1,3	1,3	1,30	208	62
250	416,5	1,6	1,5	1,55	248	60
300	499,8	1,9	1,9	1,90	304	61

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, irama membalik dijaga tetap, suhu dibaca setelah stabil, dua uji lengkap, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pembacaan yang terburu-buru atau uji kedua tidak lengkap.	Pipa tidak dibungkus, irama tidak terjaga, atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, W , ΔT rata-rata, ΔU , dan $\Delta U/W$ dihitung tepat untuk semua baris.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau rumus $W = N m g h$ dan $\Delta U = m c \Delta T$ salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis Hukum I	Grafik rapi (sumbu, satuan, skala tepat), garis terbaik dan garis teori digambar, kemiringan dibandingkan, dan tanda Q serta W dijelaskan dengan konvensi $\Delta U = Q - W$.	Grafik benar, tetapi penafsiran kemiringan atau tanda Q dan W kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik; tanda W keliru.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (usaha menaikkan energi dalam, $\Delta U = Q - W$), didukung persentase dari data, menyebut kebocoran energi, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Siapkan pipa sebelum pelajaran: lubangi satu dop seukuran probe (± 5 mm), masukkan probe sampai ujungnya ± 2 cm di dalam pipa, lalu rekatkan dengan lem tembak. Pasir harus benar-benar kering (jemur sehari) dan diayak agar tidak menggumpal; pasir basah menempel di dinding dan memakai sebagian energi untuk penguapan. Simpan pipa dan pasir di kelas sejak pagi agar suhunya sama dengan suhu ruang. Bila tersedia, gotri bekas dari bengkel sepeda memberi kenaikan suhu hampir 2 kali lebih besar. Hasil $\Delta U/W$ sekitar 55–75% sudah sangat baik; diskusikan ke mana sisanya untuk memperdalam tanda Q dan W di subbab 17.3. Kegiatan ini juga mengulang konsep kalor jenis dari Bab 15.

Benjolan di Tali Tambang: Mengukur Cepat Rambat Gelombang dengan Kamera Gerak Lambat

Bab 18 · Gelombang Mekanik

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI (dapat disederhanakan untuk SMP kelas 8 tanpa grafik v^2)

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengukur cepat rambat pulsa pada tali dari jarak tempuh dan waktu yang dibaca pada video gerak lambat.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara tegangan tali F dan cepat rambat gelombang v pada tali yang sama.
- Peserta didik dapat menafsirkan kemiringan grafik v^2-F sebagai $1/\mu$ dan membandingkannya dengan massa per panjang hasil penimbangan tali.
- Peserta didik dapat mengamati dan menjelaskan pemantulan pulsa pada ujung tali yang terikat.

Fenomena



Setelah lomba tarik tambang tujuh belasan di kampung, Raka iseng memukul tambang yang masih ditarik kencang oleh dua regu. Sebuah "benjolan" melesat sepanjang tambang, menabrak tiang, lalu kembali dalam sekejap, terbalik! Saat tambang dikendurkan, benjolan itu merayap jauh lebih lambat. Sari langsung bertanya: "Kalau tegangannya dibuat dua kali, apakah benjolannya juga dua kali lebih cepat?" Kak Nara tersenyum dan menantang kelompokmu menjawabnya dengan tali, ember berisi air, dan kamera gerak lambat di HP. Tarsi siap menghitung bingkai video satu per satu!

? Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara tegangan tali F dan cepat rambat pulsa v pada tali yang sama (massa per panjang μ tetap)?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Tegangan tali F (berat ember berisi air yang tergantung, $F = mg$)	Cepat rambat pulsa v (dihitung dari waktu bolak-balik pulsa)	Tali yang sama (μ tetap), jarak tanda M ke ujung terikat 4,00 m, cara memukul tali, dan laju rekam video

Alat dan bahan

- Tali tambang plastik berdiameter ± 10 mm, panjang ± 6 m (tali jemuran plastik yang agak berat juga bisa)
- 1 katrol jemuran kecil yang diikat atau dijepit kuat di tepi meja, serta tiang, teralis, atau kaki lemari yang kokoh untuk mengikat ujung tali

- 1 ember kecil bergagang ($\pm 0,2$ kg) dan air ± 3 L sebagai beban; massa ember + air diatur 1,00–3,00 kg
- Timbangan dapur digital (kapasitas ≥ 3 kg, ketelitian 1 g) dan meteran gulung ± 5 m
- Selotip berwarna untuk menandai tali dan 1 penggaris 30 cm untuk memukul tali
- HP dengan mode video gerak lambat (slow motion) 120 atau 240 bingkai/s, ditopang tripod atau tumpukan buku
- Kardus atau handuk tebal sebagai bantalan di bawah ember dan kain lap untuk air yang tumpah

⚠ Keselamatan

Ember berisi air hingga 3 kg bisa jatuh jika simpul lepas: letakkan bantalan kardus/handuk di bawahnya dan jangan menaruh kaki di bawah ember. Ikat tali dengan simpul yang kuat pada benda yang kokoh (bukan tiang listrik, pipa gas, atau gagang pintu), lalu tahan meja agar tidak tergeser oleh tarikan tali. Tali yang melintang setinggi pinggang mudah membuat orang tersandung: gantungkan kain penanda dan jangan berlari di sekitarnya. Pukul tali secukupnya dan jauhkan penggaris dari wajah teman. Segera lap air yang tumpah agar lantai tidak licin.

📋 Langkah kerja

1. Timbang seluruh tali dan ukur panjangnya. Hitung massa per panjang $\mu = m_{\text{tali}}/L_{\text{tali}}$ dalam kg/m.
2. Ikat satu ujung tali kuat-kuat ke tiang (ujung terikat). Bentangkan tali mendatar $\pm 4,5$ m ke meja, lewatkan di atas katrol di tepi meja, lalu ikat gagang ember di ujung lainnya sehingga ember tergantung bebas ± 20 cm di atas bantalan.
3. Tandai titik M dengan selotip tepat 4,00 m dari simpul di tiang. Pulsa yang berangkat dari M, memantul di tiang, lalu kembali ke M menempuh $2s = 8,00$ m.
4. Percobaan 1: isi ember dengan air sampai massa ember + air 1,00 kg (timbang dulu sebelum digantung). Pasang HP di penyangga sehingga daerah ± 1 m di sekitar M terlihat jelas dari samping, lalu mulai merekam dengan mode gerak lambat.
5. Pukul tali sekali dengan cepat memakai penggaris, ± 20 cm dari M di sisi katrol. Amati pulsa yang berangkat menuju tiang lalu kembali. Bagaimana bentuk pulsa yang kembali?
6. Putar ulang video bingkai demi bingkai. Catat nomor bingkai saat puncak pulsa melewati M ketika berangkat dan ketika kembali. Waktu bolak-balik $t = \Delta n / (\text{laju rekam})$, misalnya $\Delta n / 240$ untuk 240 bingkai/s. Ulangi 3 kali (t_1, t_2, t_3) lalu hitung rata-ratanya.
7. Percobaan 2–5: tambahkan air sehingga massa ember + air menjadi 1,50; 2,00; 2,50; dan 3,00 kg. Ulangi langkah 4–6. Pada salah satu percobaan, coba juga pukul tali lebih keras: apakah waktunya berubah?
8. Hitung $F = mg$ ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$), $v = 2s/t$, dan v^2 untuk setiap percobaan, lalu gambar grafik v^2 terhadap F di kertas milimeter.

 Tabel pengamatan ($2s = 8,00 \text{ m}$; $\mu = \dots \text{ kg/m}$; laju rekam $\dots \text{ bingkai/s}$)

Percobaan	m ember + air (kg)	$F = mg$ (N)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$v = 2s/t$ (m/s)	v^2 (m^2/s^2)
1								
2								
3								
4								
5								

 Grafik

Grafik v^2 (sumbu tegak) terhadap tegangan F (sumbu mendatar). Tarik satu garis lurus terbaik dan perhatikan apakah garis itu melewati titik asal (0, 0). Sebagai pembandingan, boleh juga menggambar v terhadap F untuk melihat bahwa grafiknya melengkung.

 Analisis

1. Bagaimana bentuk pulsa ketika kembali dari ujung yang terikat di tiang dibandingkan saat berangkat? Hubungkan pengamatanmu dengan pemantulan pada ujung tetap.

Kunci: Pulsa kembali dalam keadaan **terbalik**: jika berangkat sebagai lembah (tali dipukul ke bawah), ia kembali sebagai puncak, dengan lebar dan kecepatan yang hampir sama. Ujung yang diikat mati ke tiang adalah ujung tetap, sehingga pulsa pantul mengalami perubahan fase π (setengah getaran).

2. Bagaimana bentuk grafik v^2-F yang kamu peroleh? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti? Mengapa yang digambar v^2 terhadap F , bukan v terhadap F ?

Kunci: Titik-titik membentuk garis lurus yang hampir melewati titik asal. Pada contoh data, perpotongannya hanya sekitar $9 \text{ m}^2/\text{s}^2$, kecil dibandingkan nilai v^2 yang $200-590 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Jadi $v^2 \propto F$ atau $v \propto \sqrt{F}$: makin kencang tali, makin cepat pulsa, tetapi tidak sebanding lurus. Grafik $v-F$ melengkung dan sulit diuji, sedangkan grafik v^2-F berupa garis lurus yang kemiringannya mudah dibaca.

3. Hitung kemiringan (gradien) garis grafikmu beserta satuannya. Besaran apa yang ditunjukkan oleh kebalikan kemiringan itu? Bandingkan dengan μ hasil penimbangan tali dan hitung selisihnya dalam persen.

Kunci: Dari $v^2 = F/\mu$, kemiringan grafik $= 1/\mu$. Contoh data: kemiringan $\approx \frac{590 - 202}{29,4 - 9,8} \approx 20 \text{ m/kg}$ (satuan $\text{m}^2 \text{s}^{-2}/\text{N} = \text{m/kg}$), sehingga $\mu \approx 1/20 = 0,050 \text{ kg/m}$. Penimbangan memberi $\mu = 0,288/6,00 = 0,048 \text{ kg/m}$, jadi selisihnya sekitar 4%. Hasil grafik sedikit lebih besar karena gesekan katrol membuat tegangan tali mendatar sedikit lebih kecil daripada mg .

4. Bandingkan percobaan 1 dan 3, ketika tegangan tali dijadikan dua kali lipat. Berapa kali cepat rambatnya bertambah? Cocokkan dengan ramalan $v = \sqrt{F/\mu}$.

Kunci: Dari percobaan 1 ke 3, F naik dari $9,8 \text{ N}$ menjadi $19,6 \text{ N}$ (2 kali), sedangkan v naik dari $14,2 \text{ m/s}$ menjadi $20,2 \text{ m/s}$, yaitu $20,2/14,2 \approx 1,42$ kali. Ini cocok dengan $\sqrt{2} \approx 1,41$: tegangan dua kali tidak membuat gelombang dua kali lebih cepat, tetapi hanya $\sqrt{2}$ kali.

5. Apakah pukulan yang lebih keras (pulsa lebih tinggi) mengubah waktu bolak-balik secara berarti? Apa artinya bagi anggapan "gelombang yang lebih tinggi pasti merambat lebih cepat"?

Kunci: Tidak. Waktu bolak-baliknya hanya berbeda $\pm 1-2$ bingkai, sama dengan sebaran pengukuran biasa. Cepat rambat ditentukan oleh medium (F dan μ), bukan oleh tinggi pulsa, sehingga anggapan itu keliru (selama simpangannya kecil dibandingkan panjang tali).

6. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: (1) menentukan bingkai saat pulsa tepat melewati M ($\pm 1-2$ bingkai, yaitu $\pm 0,004-0,008$ s pada 240 bingkai/s); (2) gesekan katrol membuat tegangan tali mendatar tidak tepat sama dengan mg ; (3) tali melendut dan sedikit mulur sehingga μ berubah. Perbaikan: memperpanjang lintasan atau mengukur beberapa kali bolak-balik, memakai katrol beroda yang licin, atau mengukur tegangan langsung dengan timbangan gantung digital.

7. Hubungkan hasil percobaanmu dengan pemain sasando atau gitar yang mengencangkan dawai untuk menaikkan nada, dan dengan tambang yang dikendurkan pada lomba tarik tambang.

Kunci: Mengencangkan dawai memperbesar F sehingga $v = \sqrt{F/\mu}$ bertambah. Untuk panjang dawai yang sama, nada dasar $f_1 = v/(2L)$ ikut naik. Dawai yang tebal dan berat (μ besar) bernada lebih rendah. Tambang yang dikendurkan memiliki F kecil, sehingga "benjolan" merambat lambat, persis seperti yang dilihat Raka.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan tegangan tali, massa per panjang tali, dan cepat rambat gelombang dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaannya.

💡 Refleksi

- Saat melihat pulsa kembali dalam keadaan terbalik di video, aku merasa ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang cepat rambat gelombang adalah ...
- Gelombang pada tali atau dawai yang kutemui di rumah atau di sekolah adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Tali bergetar: berjalan, memantul, berdiri" di Bab 18 (subbab 18.7). Pilih mode "Pulsa memantul: ujung tetap" dan geser massa per panjang μ ke 2,00 kg/m. Untuk tegangan $F = 10, 20, 40, 60, 80$, dan 100 N, tekan "Kirim pulsa" lalu ukur dengan stopwatch waktu pulsa berangkat dari penggetar, memantul (terbalik) di ujung tetap, dan kembali ke penggetar. Jaraknya $2 \times 6 = 12$ m, jadi $v = 12/t$. Bandingkan hasilmu dengan angka "Cepat rambat v " di layar, lalu gambar grafik v^2-F : kemiringannya seharusnya $1/\mu = 0,5$ m/kg.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b18-5

 **Contoh data ($\mu = 0,288 \text{ kg} / 6,00 \text{ m} = 0,048 \text{ kg/m}$; $2s = 8,00 \text{ m}$; video 240 bingkai/s)**

Percobaan	m ember + air (kg)	$F = mg$ (N)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$v = 2s/t$ (m/s)	v^2 (m^2/s^2)
1	1,00	9,8	0,571	0,558	0,567	0,565	14,2	202
2	1,50	14,7	0,463	0,471	0,454	0,463	17,3	299
3	2,00	19,6	0,400	0,392	0,400	0,397	20,2	408
4	2,50	24,5	0,362	0,354	0,354	0,357	22,4	502
5	3,00	29,4	0,329	0,333	0,325	0,329	24,3	590

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Alat terpasang kokoh, tali dan jarak 4,00 m dijaga tetap, setiap waktu diukur 3 kali dari video, dan aturan keselamatan (bantalan, simpul kuat, lantai kering) dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada pengukuran yang tidak diulang atau video kurang jelas.	Tali atau jarak berubah antarpercobaan, atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, F , t rata-rata, $v = 2s/t$, dan v^2 dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau jarak bolak-balik $2s$ tertukar dengan s .	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik v^2-F rapi (sumbu, satuan, skala tepat), garis terbaik ditarik, kemiringan dihitung dan ditafsirkan sebagai $1/\mu$, lalu dibandingkan dengan hasil penimbangan.	Grafik benar, tetapi penafsiran kemiringan atau perbandingan dengan μ kurang lengkap.	Grafik salah skala, tanpa garis terbaik, atau hanya grafik $v-F$ yang dibuat.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($v = \sqrt{F/\mu}$), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata (dawai, tarik tambang).	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat (misalnya hanya "makin kencang, makin cepat").	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor $\div$ 16) $\times$ 100.

Catatan guru

Tali yang terlalu ringan (tali rafia, benang kasur) membuat pulsa terlalu cepat untuk direkam; pilih tali tambang $\pm 10 \text{ mm}$ atau tali lain dengan μ sekitar $0,03\text{--}0,1 \text{ kg/m}$. Pukulan yang singkat dan tidak terlalu keras menghasilkan pulsa yang rapi. Pukulan juga mengirim pulsa kecil ke arah katrol yang memantul dan menyusul di belakang pulsa utama; minta siswa mengikuti pulsa pertama saja. Jika HP hanya merekam 30 bingkai/s, ukur waktu dua atau tiga kali bolak-balik. Kemiringan grafik yang sedikit lebih kecil daripada $1/\mu$ wajar karena gesekan katrol. Kegiatan ini menjadi jembatan ke subbab 18.7 (pemantulan ujung tetap) dan Bab 19 (nada dawai $f_1 = v/2L$).

Paralon Bernyanyi: Mengukur Cepat Rambat Bunyi dengan Resonansi

Bab 19 · Bunyi

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI (bagian tabel dapat dipakai untuk SMP kelas 8)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Ukur – Grafik – Jelaskan

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menemukan panjang kolom udara yang menghasilkan resonansi pertama pada pipa tertutup untuk beberapa frekuensi.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan antara frekuensi f dan panjang kolom udara resonansi L , yaitu $L + 0,6r = \frac{1}{4}\lambda = \frac{v}{4f}$.
- Peserta didik dapat menentukan cepat rambat bunyi di udara dari kemiringan grafik $L-1/f$ dan menafsirkan titik potongnya sebagai koreksi ujung.
- Peserta didik dapat mengevaluasi sumber galat dan membandingkan hasilnya dengan $v \approx 331 + 0,6 T$.

Fenomena



Saat karyawisata ke bengkel angklung di Bandung, Raka melihat perajin memotong ujung tabung bambu sedikit demi sedikit sambil mendengarkan nadanya. "Makin pendek, makin tinggi!" seru Raka. Sari langsung bertanya, "Kalau panjang tabung dan frekuensinya kita tahu, bisakah kita menghitung cepat rambat bunyi?" Kak Nara menyodorkan sepotong pipa paralon, seember air, dan HP berisi aplikasi pembangkit nada. "Tabung bambunya kita ganti paralon, dan dasar tabungnya kita ganti permukaan air yang bisa digeser naik-turun!" Tarsi sudah siap dengan penggaris dan termometer.

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara frekuensi bunyi f dan panjang kolom udara L yang menghasilkan resonansi pertama pada pipa tertutup, dan berapa cepat rambat bunyi di kelasmu?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Frekuensi nada f dari aplikasi pembangkit nada (400, 500, 600, 700, dan 800 Hz)	Panjang kolom udara L saat terjadi resonansi pertama (bunyi paling keras)	Pipa yang sama (diameter tetap), suhu ruang, jenis gelombang (sinus), volume dan posisi HP di atas mulut pipa, serta cara menentukan bunyi paling keras

Alat dan bahan

- 1 potong pipa paralon (PVC) 1 inci, panjang ± 50 cm, kedua ujungnya terbuka dan diampelas halus (diameter dalam $\pm 2,8$ cm)
- 1 ember plastik yang tinggi (kedalaman ≥ 30 cm) atau galon bekas yang dipotong bagian atasnya, diisi air hampir penuh

- 1 HP dengan aplikasi pembangkit nada (*tone generator*) gratis, dimasukkan ke kantong plastik klip; bila ada, 1 HP lagi dengan aplikasi pengukur desibel
- Penggaris 30 cm atau meteran jahit, spidol, dan jangka sorong (bila ada) untuk mengukur diameter dalam pipa
- Termometer ruangan, atau suhu udara setempat dari aplikasi cuaca di HP
- Kain lap atau kain pel untuk air yang tumpah

Keselamatan

Setel volume HP sedang ($\pm 50\%$) dan jangan dekatkan speaker ke telinga siapa pun. Bunyikan nada hanya saat mengukur, lalu istirahatkan telinga; jika telinga berdenging atau pusing, hentikan dulu. Masukkan HP ke kantong plastik dan jauhkan dari air. Letakkan ember di lantai atau meja yang kokoh, segera lap air yang tumpah agar lantai tidak licin, dan jauhkan air dari stopkontak. Pastikan tepi pipa atau galon yang dipotong sudah diampelas agar tidak melukai tangan. Air bekas percobaan bisa dipakai menyiram tanaman.

Langkah kerja

1. Ukur diameter dalam pipa dengan jangka sorong atau penggaris, lalu hitung jari-jarinya r dan koreksi ujung $0,6r$. Catat suhu ruang T .
2. Letakkan ember berisi air di tempat yang kokoh. Masukkan pipa tegak lurus ke dalam air. Permukaan air di dalam pipa menjadi "ujung tertutup", sedangkan mulut pipa di atas menjadi ujung terbuka.
3. Buka aplikasi pembangkit nada, pilih gelombang sinus, setel 400 Hz, dan volume $\pm 50\%$. Pegang HP mendatar dengan speaker menghadap mulut pipa, $\pm 1\text{--}2$ cm di atasnya, tanpa menyentuh pipa. Posisi ini dijaga sama untuk semua percobaan.
4. Mulailah dengan pipa yang hampir tenggelam (kolom udara pendek), lalu angkat pipa perlahan. Pada panjang tertentu bunyi tiba-tiba terdengar jauh lebih keras: itulah resonansi pertama. Geser pipa naik-turun sedikit untuk menemukan titik paling keras (atau lihat angka terbesar di aplikasi pengukur desibel).
5. Tahan pipa, lalu ukur L , yaitu panjang pipa dari permukaan air sampai bibir atas pipa. Ulangi pencarian resonansi 3 kali dengan pengamat bergantian (L ukur 1, 2, dan 3), lalu hitung rata-ratanya.
6. Ulangi langkah 3–5 untuk frekuensi 500, 600, 700, dan 800 Hz.
7. Hitung $1/f$ (dalam ms), $\lambda = 4(L + 0,6r)$, dan $v = f\lambda$ untuk setiap frekuensi.
8. Gambar grafik L rata-rata (sumbu tegak) terhadap $1/f$ (sumbu mendatar). Tarik garis lurus terbaik dan perpanjang sampai memotong sumbu tegak.
9. Tantangan: pada 800 Hz, terus angkat pipa dari resonansi pertama sampai bunyi keras terdengar lagi (resonansi kedua). Ukur panjang kolom udaranya.

Tabel pengamatan resonansi pertama ($r = \dots$ cm, $T = \dots$ °C)

f (Hz)	$1/f$ (ms)	L ukur 1 (cm)	L ukur 2 (cm)	L ukur 3 (cm)	L rata-rata (cm)	$\lambda = 4(L + 0,6r)$ (cm)	$v = f\lambda$ (m/s)
400							
500							
600							
700							
800							

Grafik

Grafik L rata-rata (sumbu tegak, cm) terhadap $1/f$ (sumbu mendatar, ms). Mulai kedua sumbu dari nol, beri sedikit ruang di bawah nol pada sumbu tegak, lalu tarik satu garis lurus terbaik dan perpanjang sampai memotong sumbu tegak.

Analisis

1. Bagaimana panjang kolom udara resonansi L berubah ketika frekuensi dinaikkan? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti? Ketika frekuensi dijadikan dua kali ($400 \rightarrow 800$ Hz), berapa kali lebih pendek L ?

Kunci: L makin pendek ketika f makin tinggi; hipotesis "makin tinggi frekuensi, makin pendek kolom udara resonansi" terbukti. Dari contoh data, $20,9/10,0 \approx 2,1$ kali, sedikit lebih dari 2 kali. Jadi L hampir (tetapi tidak tepat) berbanding terbalik dengan f ; penyebabnya koreksi ujung.

2. Dari $L = \frac{v}{4} \cdot \frac{1}{f} - 0,6r$, tunjukkan bahwa kemiringan grafik $L-1/f$ sama dengan $v/4$. Hitung kemiringan grafikmu dan cepat rambat bunyi v . Bandingkan dengan rata-rata v di tabel dan dengan $v \approx 331 + 0,6T$ untuk suhu kelasmu.

Kunci: Persamaannya berbentuk $y = mx + c$ dengan $y = L$, $x = 1/f$, kemiringan $m = v/4$, dan titik potong $c = -0,6r$. Contoh data memberi kemiringan $\pm 8,67$ cm/ms = 86,7 m/s, sehingga $v = 4 \times 86,7 \approx 347$ m/s. Rata-rata kolom v di tabel ± 348 m/s, dan $331 + 0,6 \times 29 \approx 348$ m/s. Selisihnya kurang dari 1%.

3. Garis grafikmu memotong sumbu tegak sedikit di bawah nol. Apa arti fisisnya? Bandingkan besarnya dengan $0,6r$ pipamu.

Kunci: Titik potong $L \approx -0,8$ cm berarti kolom udara yang bergetar sebenarnya sedikit lebih panjang daripada pipa: perut simpangan berada sedikit di luar mulut pipa. Nilai $0,8$ cm hampir sama dengan $0,6r = 0,6 \times 1,4 = 0,84$ cm.

4. Hitung v untuk 400 Hz dan 800 Hz jika koreksi ujung diabaikan ($\lambda = 4L$). Mengapa hasilnya terlalu kecil, dan mengapa kesalahannya lebih besar pada 800 Hz?

Kunci: 400 Hz: $v = 4 \times 400 \times 0,209 \approx 334$ m/s. 800 Hz: $v = 4 \times 800 \times 0,100 = 320$ m/s. Keduanya terlalu kecil karena panjang efektif kolom udara $L + 0,6r$, bukan L . Koreksi ujung tetap $\pm 0,84$ cm, sedangkan L pada 800 Hz hanya separuh L pada 400 Hz, sehingga kesalahan relatifnya dua kali lebih besar ($\pm 8\%$ dibanding $\pm 4\%$).

5. Pada tantangan 800 Hz, resonansi kedua terjadi saat L_2 dan resonansi pertama saat L_1 . Hitung $v = 2f(L_2 - L_1)$. Mengapa cara ini tidak memerlukan koreksi ujung?

Kunci: Dengan $L_2 = 31,9$ cm dan $L_1 = 10,0$ cm: $v = 2 \times 800 \times (0,319 - 0,100) \approx 350$ m/s. Resonansi kedua terjadi saat $L_2 + 0,6r = \frac{3}{4}\lambda$ dan resonansi pertama saat $L_1 + 0,6r = \frac{1}{4}\lambda$. Jika dikurangkan, $L_2 - L_1 = \frac{1}{2}\lambda$: koreksi ujungnya saling meniadakan.

6. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: titik paling keras sulit ditentukan dengan telinga karena puncak resonansi agak lebar; paralaks saat membaca penggaris di permukaan air; posisi HP bergeser; bising kelas; pipa tidak tegak. Perbaiki: pakai aplikasi pengukur desibel, cari resonansi dari dua arah (pipa diangkat lalu diturunkan) dan rata-ratakan, lakukan di ruang yang tenang, atau jepit HP dengan penyangga agar posisinya tetap.

7. Mengapa tabung angklung untuk nada tinggi lebih pendek? Jika percobaan diulang pada siang yang lebih panas (35 °C), bagaimana perkiraan L untuk 500 Hz berubah? Apakah perubahan itu bisa terdeteksi dengan alatmu?

Kunci: Panjang kolom udara resonansi sebanding dengan $1/f$, jadi tabung untuk nada tinggi harus pendek. Pada 35 °C, $v \approx 331 + 0,6 \times 35 = 352$ m/s, sehingga L untuk 500 Hz bertambah $\Delta L = \frac{\Delta v}{4f} = \frac{3,6}{2.000} \text{ m} \approx 0,2 \text{ cm}$ (dari $\pm 16,4 \text{ cm}$ menjadi $\pm 16,6 \text{ cm}$). Perubahan ini sebesar sebaran pengukuran ($\pm 0,2$ - $0,3 \text{ cm}$), jadi sulit terdeteksi dari satu frekuensi; perlu banyak pengulangan atau alat yang lebih teliti.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan frekuensi dan panjang kolom udara pada resonansi pertama pipa tertutup, lengkap dengan persamaannya. Nyatakan juga cepat rambat bunyi yang kamu peroleh beserta perkiraan ketidakpastiannya.

💡 Refleksi

- Saat bunyi tiba-tiba mengeras di dalam pipa, aku merasa ...
- Bagian yang masih membingungkanku tentang resonansi dan koreksi ujung adalah ...
- Alat musik atau benda di sekitarku yang memakai resonansi kolom udara adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Penyintesis dawai & pipa organa (bisa didengar!)" di Bab 19 (subbab 19.5). Pilih Alat "Pipa organa tertutup (tabung angklung)", Mode getar ke- $n = 1$, dan Suhu udara (pipa) = 29 °C (atau suhu kelasmu). Atur Panjang $L = 0,10; 0,12; 0,14; 0,17$; dan $0,21 \text{ m}$, lalu catat Frekuensi f yang ditampilkan (tekan tombol Suara dan ▶ Jalankan untuk mendengarnya). Isi tabel dengan menukar peran: L yang diatur, f yang dibaca. Gambar grafik $L-1/f$, hitung $v = 4 \times$ kemiringan, dan bandingkan dengan readout Cepat rambat v . Karena Lab Mini memakai pipa ideal tanpa koreksi ujung, garisnya tepat melewati (0, 0). Untuk resonansi kedua, pilih $n = 2$ dan cari L yang memberi frekuensi sama: panjangnya tiga kali lipat.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b19-5

📊 Contoh data (T = 29 °C; diameter dalam pipa 2,8 cm → $r = 1,4 \text{ cm}$ dan $0,6r = 0,84 \text{ cm}$; resonansi kedua pada 800 Hz: $L_2 = 31,9 \text{ cm}$)

f (Hz)	$1/f$ (ms)	L ukur 1 (cm)	L ukur 2 (cm)	L ukur 3 (cm)	L rata-rata (cm)	$\lambda = 4(L + 0,6r)$ (cm)	$v = f\lambda$ (m/s)
400	2,50	20,9	21,2	20,7	20,9	87,0	348
500	2,00	16,5	16,3	16,4	16,4	69,0	345
600	1,67	13,5	13,7	13,8	13,7	58,2	349
700	1,43	11,7	11,6	11,5	11,6	49,8	349
800	1,25	9,9	10,3	9,8	10,0	43,4	347

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, posisi dan volume HP dijaga tetap, setiap resonansi dicari 3 kali, dan aturan keselamatan (volume, HP, lantai basah) dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada pengukuran yang tidak diulang atau posisi HP kurang konsisten.	Beberapa langkah terlewat atau variabel kontrol tidak dijaga.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, $1/f$, $\lambda = 4(L + 0,6r)$, dan $v = f\lambda$ dihitung tepat untuk semua frekuensi.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau koreksi ujung salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik $L-1/f$ rapi (sumbu, satuan, skala tepat), garis terbaik ditarik, kemiringan ditafsirkan sebagai $v/4$, dan titik potong ditafsirkan sebagai koreksi ujung.	Grafik dan kemiringan benar, tetapi titik potong tidak ditafsirkan.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($L + 0,6r = v/4f$), nilai v dinyatakan dengan ketidakpastiannya, galat dibahas, dan dikaitkan dengan alat musik bambu.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Gelombang sinus dari aplikasi pembangkit nada memberi resonansi paling jelas; rentang 400–800 Hz cocok untuk pipa 1 inci sepanjang 50 cm. Resonansi mudah tertutup bising, jadi atur kelompok bergiliran atau lakukan di selasar yang tenang. Jika tidak ada aplikasi, pakai garpu tala laboratorium yang dipukul dengan pemukul karet (bukan ke meja). Pipa paralon bisa diganti tabung bambu atau botol plastik panjang yang dipotong dasarnya. Untuk SMP, cukupkan sampai kolom λ dan v pada tabel; untuk SMA, tekankan kemiringan dan titik potong grafik. Hubungkan dengan kotak Lanjut "Koreksi ujung dan tabung resonansi" di subbab 19.5.

Physicspedia · LKPD Bab 19 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Lup Kakek di Meja Optik Buatan Sendiri: Memburu Jarak Fokus Lensa Cembung

Bab 20 • Cermin, Lensa & Alat Optik

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 8–9 dan SMA kelas XI

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengukur jarak bayangan nyata s' sebuah lup (lensa cembung) untuk berbagai jarak benda s dengan menangkap bayangan tajam di layar.
- Peserta didik dapat menentukan jarak fokus lup dari grafik $1/s' - 1/s$ dan dari rumus $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$.
- Peserta didik dapat menguji rumus perbesaran $|M| = s'/s = h'/h$ dan menjelaskan sifat bayangan berdasarkan letak benda terhadap F dan $2F$.
- Peserta didik dapat mengidentifikasi sumber galat percobaan dan cara menguranginya.

Fenomena



Kakek Raka membaca koran memakai lup. Saat Kakek beristirahat, Raka iseng mengarahkan lup itu ke jendela, dan di dinding kamar tiba-tiba muncul gambar jendela yang kecil dan terbalik! Sari langsung bertanya, "Kalau gambarnya bisa ditangkap dinding, berarti bayangannya nyata. Tapi berapa jarak fokus lup ini? Di gagangnya tidak ada tulisan apa pun." Kak Nara tersenyum, "Senter HP, karton, kertas HVS, dan meteran sudah cukup untuk membuat meja optik sendiri." Tarsi, yang selalu membawa kaca pembesar, siap mencatat setiap jarak!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan antara jarak benda s dan jarak bayangan nyata s' pada sebuah lup (lensa cembung), dan berapa jarak fokus f lup tersebut?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jarak benda s (jarak panah karton ke bagian tengah lup)	Jarak bayangan s' (jarak lup ke layar saat bayangan paling tajam) dan tinggi bayangan h'	Lup yang sama, tinggi benda $h = 2,0$ cm, senter dan keredupan ruangan yang sama, benda–lup–layar segaris dan tegak lurus rel meteran

Alat dan bahan

- 1 lup (kaca pembesar) berdiameter $\pm 5\text{--}7$ cm dengan jarak fokus sekitar $10\text{--}20$ cm, dari toko alat tulis
- 1 HP dengan lampu senter sebagai sumber cahaya
- Karton tebal ± 10 cm $\times$ 10 cm yang dilubangi berbentuk panah "↑" setinggi $2,0$ cm, lubangnya ditutup selembar kertas HVS tipis sebagai peredup cahaya

- 1 lembar kertas HVS putih sebagai layar, disandarkan tegak pada buku tebal atau kotak kardus
- Meteran jahit 150 cm (atau 2 penggaris 1 m), penggaris 30 cm, selotip, dan spidol
- Plastisin (lilin mainan) atau jepit baju sebagai penyangga agar lup berdiri tegak
- Kertas milimeter dan kalkulator (boleh kalkulator di HP)

⚠ Keselamatan

Jangan pernah melihat Matahari melalui lup dan jangan memusatkan sinar Matahari dengan lup ke kulit, kertas, atau kain: titik fokusnya cukup panas untuk membakar dan dapat merusak mata. Kerjakan di dalam ruangan, jauh dari sinar Matahari langsung. Jangan menatap lampu senter HP dari dekat. Pegang lup pada gagangnya; bila lensanya retak atau pecah, jangan dipungut dengan tangan dan segera lapor ke guru. Karton dilubangi oleh guru atau dengan pengawasan guru bila memakai cutter. Percobaan ini tidak memakai lilin atau api apa pun.

📋 Langkah kerja

1. Perkiraan cepat: arahkan lup ke jendela atau lampu kelas yang jauh (± 5 m), lalu geser kertas HVS di belakang lup sampai bayangan jendela paling tajam. Ukur jarak lup ke kertas sebagai perkiraan awal f . Jangan arahkan lup ke Matahari!
2. Buat benda bercahaya: lubangi karton berbentuk panah " $\uparrow$ " setinggi $h = 2,0$ cm, tutup lubangnya dari belakang dengan kertas HVS tipis, lalu sinari dari belakang dengan senter HP.
3. Rekatkan meteran di meja sebagai rel. Tegakkan karton-panah tepat di angka 0 cm, tegakkan lup dengan plastisin, dan sandarkan layar HVS pada buku. Atur agar pusat panah, pusat lup, dan pusat layar sama tinggi dan segaris. Gelapkan ruangan.
4. Letakkan bagian tengah lup pada $s = 20,0$ cm dari panah. Geser layar maju-mundur sampai bayangan panah paling tajam, lalu catat jarak lup ke layar sebagai s'_1 .
5. Geser layar menjauh, lalu cari lagi titik paling tajam untuk mendapatkan s'_2 dan s'_3 . Hitung rata-ratanya. Ukur tinggi bayangan h' dengan penggaris dan catat apakah bayangannya tegak atau terbalik.
6. Ulangi langkah 4–5 untuk $s = 25,0; 30,0; 40,0$; dan $50,0$ cm.
7. Hitung $1/s$ dan $1/s'$ (dalam cm^{-1} , empat angka desimal), jarak fokus tiap baris $f = \frac{s s'}{s + s'}$, dan perbesaran $|M| = s'/s$.
8. Gambar grafik $1/s'$ terhadap $1/s$ di kertas milimeter, lalu tarik garis lurus terbaik.
9. Terakhir, letakkan lup 10 cm dari panah (di dalam jarak fokus). Coba tangkap bayangannya di layar. Lalu singkirkan layar dan lihat panah melalui lup dari sisi layar. Catat pengamatanmu.

📋 Tabel pengamatan (tinggi benda $h = 2,0$ cm)

s (cm)	s'_1 (cm)	s'_2 (cm)	s'_3 (cm)	s' rata-rata (cm)	$1/s$ (cm^{-1})	$1/s'$ (cm^{-1})	$f = s \cdot s' / (s + s')$ (cm)	h' (cm)	$ M = s'/s$
20,0									
25,0									
30,0									
40,0									
50,0									

Grafik

Grafik $1/s'$ (sumbu tegak) terhadap $1/s$ (sumbu mendatar), keduanya dalam cm^{-1} dan dimulai dari nol sampai $\pm 0,07 \text{ cm}^{-1}$. Tarik satu garis lurus terbaik, lalu perpanjang sampai memotong kedua sumbu. Menurut rumus lensa $\frac{1}{s'} = -\frac{1}{s} + \frac{1}{f}$, gradiennya -1 dan kedua titik potongnya sama dengan $1/f$.

Analisis

1. Bagaimana perubahan jarak bayangan s' dan tinggi bayangan h' ketika benda didekatkan ke lup? Apakah s dan s' berbanding terbalik sederhana ($s \cdot s'$ tetap)? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti?

Kunci: Makin dekat benda ke lup (s turun dari 50,0 ke 20,0 cm), layar harus digeser makin jauh (s' naik dari ± 21 cm ke ± 60 cm) dan bayangan makin besar (h' naik dari $\pm 0,9$ cm ke $\pm 6,1$ cm). Namun, $s \cdot s'$ tidak tetap ($1,202 \text{ cm}^2$ pada baris pertama, $1,065 \text{ cm}^2$ pada baris terakhir), jadi keduanya tidak berbanding terbalik sederhana. Yang tetap adalah $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$. Hipotesis "makin dekat benda, makin jauh dan makin besar bayangannya" terbukti.

2. Sebutkan sifat bayangan di layar (nyata/maya, tegak/terbalik, diperbesar/diperkecil) untuk $s = 20,0$ cm, $s = 30,0$ cm, dan $s = 50,0$ cm. Kaitkan dengan letak benda terhadap F dan $2F$ serta trik ruang.

Kunci: Semua bayangan di layar nyata dan terbalik. $s = 20,0$ cm (antara F dan $2F$, ruang II): bayangan diperbesar ± 3 kali dan jatuh jauh di ruang III. $s = 30,0$ cm = $2f$: bayangan sama besar ($|M| \approx 1,01$) di $s' \approx 30$ cm. $s = 50,0$ cm (di luar $2F$, ruang III): bayangan diperkecil ($\pm 0,43$ kali) dan jatuh di antara F dan $2F$ (ruang II). Cocok dengan trik ruang: $2 + 3 = 5$.

3. Hitung gradien dan titik potong sumbu tegak grafik $1/s' - 1/s$ -mu. Tentukan jarak fokus lup dari titik potong itu, lalu bandingkan dengan rata-rata kolom f dan dengan hasil cara cepat (benda jauh) di langkah 1.

Kunci: Titik-titik membentuk garis lurus turun. Garis terbaik contoh data: gradien $\approx -1,01$ (teori: -1), titik potong sumbu tegak $\approx 0,0671 \text{ cm}^{-1}$, sehingga $f \approx 1/0,0671 \approx 14,9$ cm; titik potong sumbu mendatar $\approx 0,0663 \text{ cm}^{-1}$ memberi $f \approx 15,1$ cm. Rata-rata kolom $f = 14,98$ cm, jadi $f = (15,0 \pm 0,1)$ cm. Cara cepat dengan jendela ± 5 m memberi $\pm 15,5$ cm, sedikit lebih besar karena jendela tidak benar-benar di tak hingga: $s' = \frac{500 \times 15}{500 - 15} \approx 15,5$ cm.

4. Bandingkan h'/h hasil pengukuran dengan $|M| = s'/s$. Apakah rumus perbesaran terbukti? Menurut perjanjian tanda di buku ini, apa tanda M untuk bayangan-bayangan di layar, dan mengapa?

Kunci: $h'/h = 3,05; 1,45; 1,05; 0,55; 0,45$, sedangkan $s'/s = 3,01; 1,50; 1,01; 0,60; 0,43$. Selisihnya paling banyak 0,05, setara galat pembacaan penggaris $\pm 0,1$ cm pada h' . Jadi $|M| = h'/h = s'/s$ terbukti. Dengan perjanjian buku ini, $M = -s'/s$ bernilai negatif untuk semua baris karena s' positif (bayangan nyata), dan tanda minus itu berarti bayangan terbalik.

5. Pada langkah 9 ($s = 10$ cm), mengapa tidak ada bayangan yang dapat ditangkap layar, padahal panah tampak besar jika dilihat melalui lup? Hitung s' dan M dengan rumus lensa, lalu jelaskan arti tandanya.

Kunci: Pada $s = 10$ cm benda berada di dalam jarak fokus (ruang I). Rumus lensa memberi $s' = \frac{10 \times 15}{10 - 15} = -30$ cm: negatif berarti bayangan maya, 30 cm di depan lensa (di sisi benda). $M = -\frac{-30}{10} = +3$: tegak dan diperbesar 3 kali. Sinar-sinar biasanya menyebar dan tidak pernah berkumpul di layar, tetapi mata yang melihat melalui lup menelusuri sinar itu lurus ke belakang dan melihat panah tegak yang besar. Inilah cara kerja lup.

6. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaiki masing-masing.

Kunci: Contoh: (1) posisi bayangan paling tajam sulit ditentukan, terutama saat s' besar (daerah tajamnya bisa selebar 1–2 cm pada $s = 20$ cm); perbaikan: cari dari dua arah lalu ambil titik tengahnya, dan gelapkan ruangan. (2) Jarak diukur dari bingkai, bukan dari bagian tengah lensa; perbaikan: tandai pusat lensa dengan spidol. (3) Benda, lup, dan layar tidak segaris atau tidak tegak lurus rel; perbaikan: pakai meteran yang direkatkan sebagai rel dan penyangga yang kokoh. (4) Lup murah tidak tipis sempurna, sehingga tepi bayangan kabur.

7. Hubungkan hasilmu dengan kehidupan sehari-hari: mengapa tukang reparasi jam meletakkan jam di dalam jarak fokus lup, sedangkan proyektor meletakkan gambarnya sedikit di luar titik fokus? Berapa perbesaran lupmu untuk mata santai?

Kunci: Tukang reparasi jam meletakkan jam di dalam jarak fokus (ruang I) agar terbentuk bayangan maya, tegak, dan diperbesar yang bisa dilihat langsung. Proyektor meletakkan gambar sedikit di luar titik fokus (ruang II) agar terbentuk bayangan nyata, terbalik, dan sangat besar di dinding (ruang III). Lup dengan $f = 15$ cm memperbesar $25/15 \approx 1,7$ kali untuk mata santai ($\pm 2,7$ kali untuk mata berakomodasi maksimum). Makin kecil f , makin kuat lupnya.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan s , s' , dan f pada lensa cembung dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaannya, nilai jarak fokus lupmu beserta perkiraan ketidakpastiannya, dan syarat agar bayangan dapat ditangkap layar.

💡 Refleksi

- Saat bayangan panah tiba-tiba menjadi tajam di layar, aku merasa ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang bayangan nyata dan bayangan maya adalah ...
- Satu alat di sekitarku yang memakai lensa cembung, dan cara kerjanya menurutku, adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Meja optik: seret benda, kejar bayangannya" di Bab 20 (subbab 20.6). Pilih alat optik **Lensa cembung (+)** dan atur slider **Jarak fokus $|f|$** ke 15 cm (atau nilai lain). Seret panah hijau (benda) sampai pembacaan *Jarak benda s* mendekati 20, 25, 30, 40, dan 50 cm, lalu catat s , *Jarak bayangan s'* , *Perbesaran M* , dan *Sifat bayangan*. Simulasi tidak punya galat acak, jadi ketiga kolom s' akan sama; isi kolom h' dengan $|M| \times 2,0$ cm. Untuk langkah 9, seret benda ke $s = 10$ cm: perhatikan s' yang bertanda negatif dan garis putus-putus pembentuk bayangan maya.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b20-6

 Contoh data (lup $f \approx 15,0$ cm; $h = 2,0$ cm; sebaran posisi layar $\pm 0,4$ – 1 cm)

s (cm)	s'_1 (cm)	s'_2 (cm)	s'_3 (cm)	s' rata-rata (cm)	$1/s$ (cm ⁻¹)	$1/s'$ (cm ⁻¹)	$f = s \cdot s' / (s + s')$ (cm)	h' (cm)	$ M = s'/s$
20,0	60,4	59,5	60,3	60,1	0,0500	0,0166	15,0	6,1	3,01
25,0	38,3	36,7	37,4	37,5	0,0400	0,0267	15,0	2,9	1,50
30,0	30,1	30,3	30,4	30,3	0,0333	0,0330	15,1	2,1	1,01
40,0	24,3	23,1	24,0	23,8	0,0250	0,0420	14,9	1,1	0,60
50,0	22,0	21,4	20,6	21,3	0,0200	0,0469	14,9	0,9	0,43

 Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Benda, lup, dan layar disusun segaris; bayangan tajam dicari 3 kali untuk setiap s ; lup tidak pernah diarahkan ke Matahari dan alat dipakai dengan aman.	Susunan benar, tetapi ada nilai s yang hanya diukur sekali atau kurang rapi.	Susunan tidak segaris sehingga bayangan sulit tajam, atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau aturan keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, $1/s$, $1/s'$, f , dan $ M $ dihitung tepat untuk semua baris.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau rumus lensa salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi (sumbu, satuan, skala tepat), garis terbaik ditarik dan diperpanjang, gradien ≈ -1 dikenali, dan titik potong ditafsirkan sebagai $1/f$.	Grafik benar tetapi penafsiran titik potong atau gradien kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$, nilai f beserta ketidakpastiannya), didukung data, menyebut galat, dan membedakan bayangan nyata dan maya.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

 Catatan guru

Lup murah berdiameter 5–7 cm umumnya berfokus 10–20 cm. Ukur dulu dengan cara benda jauh (langkah 1); jika jarak fokus lup jauh dari 15 cm, ganti nilai s di tabel menjadi kira-kira $1,3f$, $1,7f$, $2f$, $2,7f$, dan $3,3f$ agar layar tidak terlalu jauh. Bayangan paling sulit ditajamkan saat benda dekat F (s' besar), sehingga sebaran s' terbesar ada di baris pertama: bahan diskusi galat yang bagus. Gelapkan ruangan dan pakai senter HP dengan kecerahan sedang. Langkah 9 (benda di dalam jarak fokus) adalah jembatan ke materi lup di subbab 20.7.

Detektif Keping Bekas: Mengukur Jarak Alur CD dan DVD dengan Sinar Laser

Bab 21 · Cahaya sebagai Gelombang

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI–XII (cocok juga untuk IGCSE/IB)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menyelidiki pola difraksi sinar laser yang dipantulkan keping CD dan DVD.
- Peserta didik dapat menghitung jarak antaralur d dari data jarak dengan memakai $\tan \theta = x_1/L$ dan $d \sin \theta = m\lambda$.
- Peserta didik dapat menjelaskan hubungan kerapatan alur dengan besar sudut belok cahaya.
- Peserta didik dapat mengevaluasi sumber galat dan menerapkan aturan keselamatan kerja dengan sinar laser.

Fenomena



Raka menemukan CD bekas lagu kesukaan Bapak di laci. Di bawah lampu kelas, permukaannya memancarkan pelangi. Sari mengarahkan penunjuk laser merah ke CD itu dengan hati-hati, dan di layar karton muncul beberapa titik merah yang berjajar rapi, bukan hanya satu! Kak Nara tersenyum: "Alur rekaman CD bekerja seperti kisi difraksi. Dari letak titik-titik itu, kalian bisa mengukur jarak antaralur yang puluhan kali lebih kecil daripada tebal rambut, hanya dengan penggaris!" Tarsi penasaran: apakah DVD memberi pola yang sama?

? Rumusan masalah

Berapa jarak antaralur pada keping CD dan DVD, dan bagaimana kerapatan alur memengaruhi sudut belok sinar laser?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jarak keping–layar L dan jenis keping (CD atau DVD)	Jarak bintik terang orde 1 dari lubang layar x_1 (dan sudut belok θ)	Laser yang sama (λ tetap), sinar jatuh tegak lurus keping, layar sejajar keping, orde $m = 1$

Alat dan bahan

- 1 penunjuk laser merah berdaya rendah (< 1 mW, kelas 2) dengan panjang gelombang tertulis di labelnya (± 650 nm)
- 1 keping CD bekas dan 1 keping DVD bekas (CD-R atau DVD-R kosong juga bisa)
- Karton putih ± 30 cm $\times$ 30 cm sebagai layar, dilubangi kecil (± 5 mm) tepat di tengahnya
- Penggaris 30 cm, pensil, dan selotip
- Plastisin (lilin mainan) atau tumpukan buku untuk menyangga laser, keping, dan layar agar tidak bergeser
- Kalkulator ilmiah atau kalkulator di HP (untuk fungsi arctan dan sin)

Keselamatan

Jangan pernah menatap sinar laser atau pantulannya, dan jangan mengarahkannya ke mata, wajah, kendaraan, atau pesawat. Pakai laser berdaya rendah (< 1 mW) dan letakkan di atas meja, di bawah tinggi mata. Nyalakan laser hanya saat mengukur. Jauhkan benda mengilap lain (jam, cermin, gelas) dari lintasan sinar. Jangan mematahkan keping CD/DVD karena pecahannya tajam.

Langkah kerja

1. Lubangi karton tepat di tengahnya (± 5 mm). Tegakkan karton dengan buku dan selotip sehingga menjadi layar.
2. Letakkan laser di belakang layar sehingga sinarnya lewat lubang. Tegakkan CD di depan layar dengan plastisin, sisi mengilap menghadap layar dan sejajar layar. Arahkan sinar ke bagian keping di antara lubang tengah dan tepinya.
3. Nyalakan laser. Atur posisi CD sampai pantulan paling terang (orde 0) kembali tepat ke lubang. Artinya sinar jatuh tegak lurus. Bintik orde +1 dan -1 muncul di kedua sisi lubang.
4. Atur jarak permukaan CD ke layar $L = 10,0$ cm. Tandai bintik orde +1 dan -1 dengan pensil, ukur jarak keduanya, lalu bagi dua untuk mendapat x_1 . Matikan laser.
5. Ulangi untuk $L = 15,0$ cm dan $L = 20,0$ cm. Amati juga apakah ada bintik orde 2 yang lebih jauh dan lebih redup.
6. Ganti CD dengan DVD. Karena sudut beloknya jauh lebih besar, pakai $L = 3,0$ cm, $4,0$ cm, dan $5,0$ cm.
7. Hitung $\theta = \arctan(x_1/L)$, lalu $d = \lambda/\sin \theta$ untuk setiap percobaan ($m = 1$). Pakai λ yang tertulis di label laser.
8. Gambar grafik x_1 terhadap L untuk CD dan DVD pada satu kertas milimeter.

Tabel pengamatan ($\lambda = \dots$ nm, orde $m = 1$)

Percobaan	Keping	L (cm)	x_1 (cm)	$\theta = \arctan(x_1/L)$ (°)	$\sin \theta$	$d = \lambda/\sin \theta$ (μm)
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Grafik

Grafik x_1 (sumbu tegak) terhadap L (sumbu mendatar) untuk CD dan DVD pada kertas milimeter yang sama. Tarik garis lurus terbaik melalui titik asal untuk masing-masing keping. Kemiringannya adalah $\tan \theta$.

Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik x_1-L untuk CD dan DVD? Apa arti kemiringannya, dan apakah nilai d bergantung pada L ?

Kunci: Kedua grafik berupa garis lurus melalui titik asal, sesuai $x_1 = L \tan \theta$. Kemiringannya adalah $\tan \theta$: $\pm 0,45$ untuk CD ($\theta \approx 24^\circ$) dan $\pm 1,83$ untuk DVD ($\theta \approx 61^\circ$). Sudutnya tetap, jadi d tidak bergantung pada L . L hanya mengubah seberapa jauh bintik di layar, sedangkan d adalah sifat keping.

2. Hitung rata-rata d untuk CD dan DVD, lalu nyatakan dalam garis per milimeter ($N = 1/d$). Bandingkan dengan nilai pabrik: $1,6 \mu\text{m}$ (CD) dan $0,74 \mu\text{m}$ (DVD). Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Contoh data: $d_{\text{CD}} \approx 1,59 \mu\text{m}$ ($N \approx 630$ garis/mm) dan $d_{\text{DVD}} \approx 0,74 \mu\text{m}$ ($N \approx 1350$ garis/mm). Selisihnya dari nilai pabrik kurang dari 1%. Hipotesis "alur DVD lebih rapat sehingga sinar dibelokkan lebih jauh" terbukti.

3. Mengapa sudut belok pada DVD jauh lebih besar daripada pada CD? Mengapa pada DVD tidak muncul bintik orde 2?

Kunci: Dari $d \sin \theta = m\lambda$, $\sin \theta = \lambda/d$. Alur DVD lebih rapat (d lebih kecil), sehingga $\sin \theta$ lebih besar: $650/740 = 0,88$ ($\theta \approx 61^\circ$) dibanding $650/1600 = 0,41$ ($\theta \approx 24^\circ$). Untuk orde 2 DVD, $\sin \theta = 1300/740 = 1,76 > 1$, jadi tidak ada.

4. Pada CD, apakah bintik orde 2 dan orde 3 mungkin muncul? Buktikan dengan perhitungan.

Kunci: Orde 2: $\sin \theta = 1300/1600 = 0,81$, sehingga $\theta \approx 54^\circ$. Bintik ini ada, tetapi jauh dan redup: $x_2 = L \tan 54^\circ \approx 1,4L$, yaitu ± 14 cm pada $L = 10$ cm. Orde 3: $\sin \theta = 1950/1600 > 1$, jadi tidak mungkin muncul.

5. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: (a) bintik selebar 3–5 mm sehingga titik tengahnya sulit ditentukan; (b) L sulit diukur tepat karena lapisan data berada ± 1 mm di bawah permukaan keping; (c) sinar tidak tepat tegak lurus; (d) λ laser murah bisa 630–670 nm. Perbaiki: ukur jarak bintik +1 ke -1 lalu bagi dua, pakai L yang lebih besar, pastikan pantulan orde 0 kembali ke lubang, dan pakai λ dari label.

6. Jelaskan mengapa CD bekas tampak berwarna-warni jika disinari lampu putih. Warna apa yang dibelokkan paling jauh?

Kunci: Cahaya putih berisi semua panjang gelombang. Setiap warna dibelokkan ke sudut yang berbeda ($\sin \theta = \lambda/d$), sehingga cahaya terurai menjadi pelangi. Merah (λ terpanjang) dibelokkan paling jauh, sedangkan ungu paling dekat dengan bayangan lampu. Prinsip ini dipakai spektroskop dan spektrometer di observatorium.

7. Ramalkan letak bintik orde 1 jika laser merah diganti laser hijau (532 nm) pada CD dengan $L = 10,0$ cm. Apakah lebih dekat atau lebih jauh dari lubang?

Kunci: $\sin \theta = 532/1600 = 0,33$, sehingga $\theta \approx 19,4^\circ$ dan $x_1 = 10 \times \tan 19,4^\circ \approx 3,5$ cm. Bintiknya lebih dekat ke lubang daripada bintik laser merah ($\pm 4,5$ cm), karena panjang gelombang cahaya hijau lebih pendek.

Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang jarak antarlur CD dan DVD yang kamu ukur, serta hubungan antara kerapatan alur, panjang gelombang, dan sudut belok cahaya, lengkap dengan persamaannya.

Refleksi

- Saat titik-titik merah muncul berjajar di layar, aku merasa ...
- Bagian perhitungan yang masih membingungkanku adalah ...
- Benda lain di sekitarku yang mungkin berperilaku seperti kisi difraksi adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya laser atau CD? Pakai Lab Mini "Spektrometer kisi: detektif lampu misterius" di Bab 21 (subbab 21.5). Pilih sumber "Laser merah" dan orde $m = 1$. Atur kerapatan kisi $N = 200, 400, 600, 800$, dan 1.000 garis/mm. Untuk setiap N , klik garis merah di panel kanan agar teropong membidiknya, lalu catat sudut θ . Hitung $d = \lambda/\sin \theta$ dan bandingkan dengan "Jarak celah d " yang ditampilkan. Ganti kolom "Keping" dengan N , lalu jawab pertanyaan yang sama ($N = 600$ mendekati CD; makin besar N , makin mirip DVD).

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b21-5

Contoh data (laser 650 nm, $m = 1$)

Percobaan	Keping	L (cm)	x_1 (cm)	$\theta = \arctan(x_1/L)$ (°)	$\sin \theta$	$d = \lambda/\sin \theta$ (μm)
1	CD	10,0	4,5	24,2	0,410	1,59
2	CD	15,0	6,6	23,7	0,402	1,62
3	CD	20,0	9,1	24,5	0,415	1,57
4	DVD	3,0	5,4	60,9	0,874	0,74
5	DVD	4,0	7,5	61,9	0,882	0,74
6	DVD	5,0	9,1	61,2	0,876	0,74

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan laser	Susunan alat rapi, sinar dibuat tegak lurus keping, semua jarak diukur, dan aturan keselamatan laser dipatuhi sepanjang percobaan.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang kurang teliti atau tidak diulang.	Sinar tidak tegak lurus atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau laser diarahkan sembarangan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, θ , $\sin \theta$, dan d dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang, atau kalkulator dipakai dalam mode radian tanpa disadari.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi (sumbu, satuan, skala tepat), garis terbaik ditarik, kemiringan ditafsirkan sebagai $\tan \theta$, dan d dibandingkan dengan nilai pabrik.	Grafik benar, tetapi penafsiran kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($d \sin \theta = m\lambda$), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat, tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Penunjuk laser murah kadang berdaya lebih besar daripada yang tertulis. Periksa dulu dan pegang kendali laser cadangan. Jika bintik orde 1 CD tidak tampak, pastikan sinar mengenai bagian keping yang beralur (bukan bagian bening di dekat lubang tengah). Ingatkan siswa memasang kalkulator pada mode derajat. Percobaan ini menyambung ke Tantangan Rumah "spektroskop dari CD bekas" dan ke tabel garis spektrum di subbab 21.5.

Physicspedia · LKPD Bab 21 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Kapasitor dari Aluminium Foil dan Kertas HVS: Menguji Rumus Kapasitas

Bab 22 • Listrik Statis & Kapasitor

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI–XII (cocok juga untuk IGCSE/IB)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing (discovery learning): Tebak – Amati – Jelaskan

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat merakit kapasitor keping sejajar sederhana dari aluminium foil dan kertas.
- Peserta didik dapat menyelidiki pengaruh luas keping A dan jarak keping d terhadap kapasitas C .
- Peserta didik dapat menentukan permitivitas relatif kertas dari kemiringan grafik C terhadap A/d .
- Peserta didik dapat menjelaskan sumber galat dan penerapan kapasitor dalam teknologi sehari-hari.

Fenomena



Sari heran: layar HP bisa tahu persis di mana jarinya menyentuh. Kak Nara menjelaskan bahwa di bawah kaca layar ada banyak kapasitor kecil, dan jari mengubah kapasitasnya. "Kapasitor itu sederhana: dua keping konduktor yang dipisahkan isolator," katanya. Raka langsung mengambil aluminium foil dari dapur dan kertas HVS dari printer. "Kalau begitu aku bisa membuatnya sendiri! Tapi apa yang membuat kapasitasnya besar?" Tarsi menyiapkan multimeter. Saatnya menguji rumus $C = \epsilon_r \epsilon_0 A/d$!

Rumusan masalah

Bagaimana kapasitas kapasitor keping sejajar bergantung pada luas tumpang-tindih keping A dan jarak antarkeping d ?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Luas tumpang-tindih keping A (keping atas digeser) dan jarak keping d (jumlah lembar kertas)	Kapasitas C yang terbaca di multimeter	Jenis kertas, beban penekan yang sama, keping foil yang sama, kabel penjepit yang sama

Alat dan bahan

- 2 lembar aluminium foil dapur 20 cm × 25 cm (bagian 20 cm × 20 cm menjadi keping, sisa 5 cm menjadi lidah penjepit)
- 5 lembar kertas HVS 80 g/m² (tebal ±0,10 mm per lembar)
- 1 multimeter digital yang memiliki rentang kapasitansi (Cx, 2–200 nF) dan 2 kabel jepit buaya
- Buku tebal (±1–2 kg) sebagai penekan supaya foil dan kertas rapat
- Penggaris 30 cm, gunting, selotip, dan meja kayu atau plastik (bukan logam)
- Mikrometer sekrup atau jangka sorong (jika ada) untuk mengukur tebal kertas

Keselamatan

Percobaan ini tidak memakai sumber listrik: kapasitas diukur langsung oleh multimeter. Jangan pernah menghubungkan kapasitor buatan ini ke stop kontak PLN, aki, atau baterai. Tepi aluminium foil bisa tajam: potong dengan gunting, jangan dirobek. Gunakan gunting dengan hati-hati, dan letakkan buku penekan pelan-pelan agar tidak jatuh menimpa jari.

Langkah kerja

1. Potong dua lembar foil 20 cm $\times$ 25 cm. Ratakan foil dengan penggaris sampai tidak berkerut.
2. Ukur tebal satu lembar kertas: ukur tebal tumpukan 50 lembar (± 5 mm), lalu bagi 50. Catat sebagai d_1 ($\pm 0,10$ mm).
3. Letakkan keping foil pertama di meja, tumpuk 2 lembar kertas di atasnya, lalu keping kedua tepat di atasnya (tumpang-tindih penuh, $\ell = 20$ cm). Kedua lidah foil harus mencuat ke arah berlawanan dan tidak saling bersentuhan.
4. Tutup dengan buku tebal. Catat dulu bacaan multimeter saat kabel belum menjepit apa pun (kapasitas kabel). Lalu jepit kedua lidah foil, jangan menyentuh foil atau kabel saat membaca, dan catat C .
5. Geser keping atas sehingga panjang tumpang-tindih ℓ menjadi 15, 10, lalu 5 cm (lebar tetap 20 cm). Tekan lagi dengan buku dan catat C setiap kali.
6. Kembalikan tumpang-tindih ke 20 cm, lalu ganti jumlah kertas menjadi 3 dan 4 lembar. Catat C .
7. Hitung $A = 0,20 \text{ m} \times \ell$, $d = n \times d_1$, dan A/d untuk setiap percobaan.
8. Gambar grafik C (sumbu tegak) terhadap A/d (sumbu mendatar), lalu tarik garis lurus terbaik.

Tabel pengamatan (lebar keping 0,20 m; tebal satu lembar kertas $d_1 = \dots$ mm)

Percobaan	Jumlah kertas n	$d = n \cdot d_1$ (m)	Tumpang-tindih ℓ (cm)	$A = 0,20 \text{ m} \times \ell$ (m ²)	A/d (m)	C terukur (nF)
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Grafik

Grafik C dalam nF (sumbu tegak) terhadap A/d dalam meter (sumbu mendatar). Bedakan simbol titik dari percobaan geser keping ($n = 2$) dan percobaan tambah kertas ($\ell = 20$ cm), lalu tarik satu garis lurus terbaik melalui titik asal.

Analisis

1. Bagaimana C berubah saat luas tumpang-tindih diperkecil? Bagaimana saat jumlah kertas ditambah? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: C mengecil sebanding dengan luas: dari 4,70 nF (20 cm) menjadi $\pm 1,17$ nF (5 cm), kira-kira seperempatnya. Menambah kertas dari 2 menjadi 4 lembar (jarak dua kali lipat) membuat C kira-kira tinggal setengahnya (4,70 $\rightarrow$ 2,37 nF). Jadi $C \propto A$ dan $C \propto 1/d$.

2. Apakah semua titik dari kedua jenis percobaan jatuh pada satu garis lurus melalui titik asal? Apa artinya?

Kunci: Ya, titik-titik dari kedua percobaan berada di sekitar satu garis lurus yang melalui titik asal. Artinya C sebanding dengan A/d , sesuai $C = \epsilon_r \epsilon_0 A/d$.

3. Hitung kemiringan grafismu. Besaran apa yang ditunjukkan kemiringan itu? Tentukan permitivitas relatif ϵ_r kertas ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

Kunci: Kemiringan = $\Delta C / \Delta(A/d) \approx 4,6 \text{ nF} / 200 \text{ m} = 0,023 \text{ nF/m} = 2,3 \times 10^{-11} \text{ F/m}$. Kemiringan ini adalah $\epsilon_r \epsilon_0$, sehingga $\epsilon_r = \frac{2,3 \times 10^{-11}}{8,85 \times 10^{-12}} \approx 2,6$.

4. Nilai ϵ_r kertas di buku sekitar 3–3,5. Mengapa hasilmu kemungkinan lebih kecil? Mengapa beban buku penting?

Kunci: Di antara foil dan kertas selalu ada lapisan udara tipis ($\epsilon_r = 1$) karena foil berkerut dan permukaan kertas tidak rata. Lapisan udara menurunkan permitivitas rata-rata dan sedikit menambah jarak sebenarnya. Beban buku menekan susunan sehingga celah udara mengecil dan hasilnya lebih konsisten.

5. Percobaan 3 dan 6 memiliki A/d yang sama (100 m). Bandingkan nilai C -nya. Apa yang dibuktikan?

Kunci: Kedua nilai hampir sama (2,33 nF dan 2,37 nF). Memperkecil luas menjadi separuh berefek sama dengan menggandakan jarak keping, karena yang menentukan kapasitas adalah perbandingan A/d .

6. Sebutkan dua sumber galat dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: (a) celah udara dan kerutan foil; (b) tebal kertas diukur kasar; (c) kapasitas kabel dan tangan yang menyentuh kabel; (d) medan di tepi keping. Perbaikan: ratakan foil dengan penggaris, pakai beban yang sama setiap kali, ukur tebal kertas dengan mikrometer, kurangkan kapasitas kabel, dan jangan menyentuh kabel saat membaca.

7. Ramalkan kapasitasnya jika 2 lembar kertas diganti selembat plastik setebal 0,20 mm ($\epsilon_r = 2,3$) dengan tumpang-tindih penuh. Lalu jelaskan mengapa kapasitor sungguhan dibuat dari foil panjang yang digulung dengan isolator sangat tipis.

Kunci: $C = \frac{2,3 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,040}{2,0 \times 10^{-4}} \approx 4,1 \text{ nF}$, sedikit lebih kecil daripada dengan kertas. Kapasitor sungguhan memakai foil yang sangat panjang (A besar) dan isolator setipis beberapa mikrometer (d sangat kecil), lalu digulung supaya ringkas. Hasilnya kapasitas besar dalam ukuran kecil, misalnya kapasitor lampu kilat kamera.

Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan kapasitas dengan luas keping, jarak keping, dan bahan isolator, lengkap dengan persamaannya dan nilai ϵ_r kertas yang kamu peroleh.

Refleksi

- Hal yang paling mengejutkan dari kapasitor buatanku adalah ...
- Bagian yang masih membuatku penasaran tentang kapasitor adalah ...
- Alat di rumahku yang mungkin memakai kapasitor adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya multimeter berkapasitansi? Pakai Lab Mini "Kapasitor keping sejajar: tarik, sisipkan, putuskan" di Bab 22 (subbab 22.6). Pilih bahan dielektrik "Kertas" dan geser "Dielektrik disisipkan" ke 100%. Ubah luas keping A (100, 200, 300, dan 400 cm²) pada d = 4 mm, lalu ubah jarak d (2, 4, 6, dan 8 mm) pada A = 400 cm². Catat kapasitas C dari panel bacaan, hitung A/d, dan buat grafik C terhadap A/d. Kemiringannya memberi $\epsilon_r \approx 3,5$, sesuai bahan yang dipilih.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b22-6

Contoh data ($d_1 = 0,10$ mm; kapasitas kabel sudah dikurangkan)

Percobaan	Jumlah kertas n	$d = n \cdot d_1$ (m)	Tumpang-tindih ℓ (cm)	$A = 0,20 \text{ m} \times \ell$ (m ²)	A/d (m)	C terukur (nF)
1	2	$2,0 \times 10^{-4}$	20	0,040	200	4,70
2	2	$2,0 \times 10^{-4}$	15	0,030	150	3,35
3	2	$2,0 \times 10^{-4}$	10	0,020	100	2,33
4	2	$2,0 \times 10^{-4}$	5	0,010	50	1,17
5	3	$3,0 \times 10^{-4}$	20	0,040	133	3,01
6	4	$4,0 \times 10^{-4}$	20	0,040	100	2,37

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Perakitan kapasitor & keselamatan	Foil rata, lidah tidak bersentuhan, beban penekan sama di setiap percobaan, dan kapasitor tidak pernah disambung ke sumber listrik.	Perakitan benar, tetapi ada satu percobaan dengan foil berkerut atau beban berbeda.	Lidah foil sering bersentuhan atau beban tidak dipakai, sehingga data tidak stabil.	Kapasitor tidak berhasil dirakit atau aturan keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, A , d , dan A/d dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang, atau satuan cm/mm tidak diubah ke meter.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi, garis terbaik ditarik, kemiringan ditafsirkan sebagai $\epsilon_r \epsilon_0$, dan ϵ_r dibandingkan dengan nilai di buku.	Grafik benar, tetapi penafsiran kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($C = \epsilon_r \epsilon_0 A/d$), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan teknologi nyata.	Kesimpulan tepat, tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Multimeter digital murah dengan rentang kapasitansi sudah memadai. Hasil terbaik diperoleh dengan foil tebal (heavy duty) dan beban yang sama di setiap percobaan. Kertas yang lembap memberi kapasitas lebih besar dan berubah-ubah, jadi lakukan di ruangan kering. Diskusikan mengapa garis grafik tidak tepat melalui titik asal (kapasitas kabel $\pm 0,01\text{--}0,05\text{ nF}$ dan efek tepi).

Resistor vs Bohlam Senter: Siapa yang Patuh Hukum Ohm?

Bab 23 • Listrik Dinamis

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 9 dan SMA kelas XI-XII

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat merangkai amperemeter secara seri dan voltmeter secara paralel dengan benar dan aman.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan tegangan V dan arus I pada resistor dan pada bohlam senter pijar.
- Peserta didik dapat menentukan hambatan dari kemiringan grafik $V-I$ dan membedakan komponen ohmik dan non-ohmik.
- Peserta didik dapat menjelaskan pengaruh suhu filamen dan hambatan dalam baterai terhadap hasil pengukuran.

Fenomena



Senter Raka meredup karena baterainya hampir habis. Ia penasaran dan mengukur hambatan bohlamnya dengan multimeter: hanya sekitar $2\ \Omega$! "Kalau begitu, dengan 6 V arusnya 3 A , dong?" tebak Raka. Sari menggeleng sambil menunjuk label bohlam: $6\text{ V } 0,3\text{ A}$. Kak Nara tertawa: "Hukum Ohm itu jujur, tetapi hanya untuk penghantar yang suhunya tetap. Coba bandingkan bohlam itu dengan resistor biasa." Tarsi sudah menyiapkan dua multimeter. Siapa yang patuh hukum Ohm?

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan tegangan V dan arus I pada resistor tetap dibandingkan pada bohlam senter pijar?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Tegangan sumber (jumlah baterai 1-4 buah)	Tegangan V dan arus I pada komponen, serta hambatan $R = V/I$	Komponen yang diuji, baterai yang sama, kabel dan multimeter yang sama

Alat dan bahan

- 4 baterai AA $1,5\text{ V}$ dan tempat baterai 4 slot (atau 4 tempat baterai tunggal yang bisa disambung seri)
- 1 resistor $100\ \Omega$ (gelang coklat-hitam-cokelat-emas), daya $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 1 bohlam senter pijar $6\text{ V } (\pm 0,3\text{ A})$ beserta fittingnya
- 2 multimeter digital (satu sebagai voltmeter, satu sebagai amperemeter); jika hanya ada satu, ukur bergantian
- 6 kabel jepit buaya dan 1 saklar tekan

Keselamatan

Hanya pakai baterai (paling banyak $4 \times 1,5\text{ V} = 6\text{ V}$). Jangan pernah menyambungkan rangkaian atau multimeter ke stop kontak PLN. Jangan menghubungkan kedua kutub baterai langsung dengan kabel

(hubung singkat), karena kabel dan baterai bisa panas, bahkan bocor. Amperemeter selalu dipasang seri, jangan pernah langsung ke kutub baterai. Bohlam dan resistor bisa panas: jangan dipegang saat atau sesaat setelah menyala. Lepaskan saklar setelah setiap pembacaan.

Langkah kerja

1. Siapkan multimeter: voltmeter pada rentang 20 V DC, amperemeter pada rentang 200 mA DC untuk resistor. Untuk bohlam, pindahkan kabel merah amperemeter ke lubang 10 A dan pilih rentang 10 A.
2. Rangkai secara seri: baterai → saklar → amperemeter → resistor → kembali ke baterai. Pasang voltmeter paralel di kedua ujung resistor.
3. Mulai dengan 1 baterai. Tekan saklar, tunggu 2–3 detik, lalu baca dan catat V dan I . Lepaskan saklar.
4. Ulangi dengan 2, 3, lalu 4 baterai yang disusun seri.
5. Ganti resistor dengan bohlam senter. Ulangi langkah 3–4 dengan amperemeter pada rentang 10 A, dan amati juga nyala bohlam.
6. Hitung $R = V/I$ untuk setiap pembacaan (ubah mA menjadi A).
7. Gambar grafik V (sumbu tegak) terhadap I (sumbu mendatar) untuk resistor dan bohlam pada kertas milimeter (boleh dua grafik terpisah).

Tabel pengamatan

Jumlah baterai	V resistor (V)	I resistor (mA)	$R = V/I$ resistor (Ω)	V bohlam (V)	I bohlam (A)	$R = V/I$ bohlam (Ω)
1						
2						
3						
4						

Grafik

Grafik V (sumbu tegak) terhadap I (sumbu mendatar) untuk resistor dan untuk bohlam, termasuk titik (0, 0). Tarik garis lurus terbaik untuk resistor dan kurva mulus untuk bohlam.

Analisis

1. Bandingkan bentuk grafik $V-I$ resistor dan bohlam. Komponen mana yang ohmik? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Grafik resistor berupa garis lurus melalui titik asal: $V \propto I$ dan R tetap ($\pm 99 \Omega$), sehingga resistor ohmik. Grafik bohlam melengkung: setiap kenaikan tegangan yang sama menghasilkan kenaikan arus yang makin kecil (grafik $V-I$ makin curam). Bohlam non-ohmik. Hipotesis bahwa resistor patuh hukum Ohm, sedangkan bohlam tidak, terbukti.

2. Hitung kemiringan grafik resistor. Bandingkan dengan nilai kode warnanya ($100 \Omega \pm 5\%$).

Kunci: Kemiringan $\approx \frac{6,15 - 1,55}{0,0624 - 0,0157} \approx 98,5 \Omega$. Nilai ini masih di dalam toleransi $100 \Omega \pm 5\%$ (95–105 Ω).

3. Mengapa hambatan bohlam naik dari $\pm 11 \Omega$ menjadi $\pm 20 \Omega$ saat tegangannya dinaikkan? Mengapa tebakan Raka (3 A) salah?

Kunci: Arus yang lebih besar memanaskan filamen wolfram hingga lebih dari 2000°C . Ion-ion logamnya bergetar lebih hebat sehingga elektron lebih sering bertumbukan, dan hambatannya naik ($R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$). Raka mengukur hambatan bohlam dalam keadaan dingin ($\pm 2 \Omega$). Saat menyala terang, hambatannya $\pm 20 \Omega$, sehingga arusnya hanya $\pm 0,3 \text{ A}$.

4. Dengan 4 baterai, tegangan pada bohlam (5,96 V) lebih kecil daripada tegangan pada resistor (6,15 V). Mengapa? (Petunjuk: hambatan dalam baterai.)

Kunci: Baterai memiliki hambatan dalam r , sehingga tegangan jepitnya $V = \varepsilon - Ir$. Bohlam menarik arus $\pm 0,30 \text{ A}$, jauh lebih besar daripada arus resistor ($0,062 \text{ A}$), sehingga tegangan yang hilang di dalam baterai lebih besar. Dari data: $r \approx \frac{6,15 - 5,96}{0,30 - 0,062} \approx 0,8 \Omega$ untuk 4 baterai.

5. Hitung daya bohlam saat memakai 4 baterai. Kira-kira berapa jam 4 baterai AA ($\pm 2500 \text{ mAh}$) dapat menyalakannya? Bandingkan dengan lampu LED yang terangnessnya sama tetapi dayanya hanya $\pm 0,3 \text{ W}$.

Kunci: $P = VI = 5,96 \times 0,30 \approx 1,8 \text{ W}$. Kapasitas $\pm 2500 \text{ mAh}$ pada arus $0,30 \text{ A}$ cukup untuk ± 8 jam (kenyataannya lebih singkat karena tegangan baterai turun). Lampu LED $\pm 0,3 \text{ W}$ memakai daya sekitar seperenamnya, sehingga baterainya bisa bertahan kira-kira 6 kali lebih lama. Inilah sebabnya senter LED lebih hemat.

6. Sebutkan dua sumber galat dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: (a) baterai melemah selama percobaan; (b) filamen belum mencapai suhu tetap saat dibaca; (c) resolusi rentang 10 A hanya $0,01 \text{ A}$; (d) hambatan kabel dan sambungan jepit buaya. Perbaikan: pakai baterai baru, tunggu 2–3 detik sebelum membaca, pakai rentang 2 A bila ada, dan rapatkan sambungan.

7. Bohlam pijar paling sering putus tepat saat saklar dinyalakan. Jelaskan dengan hasil percobaanmu.

Kunci: Saat dingin, hambatan filamen hanya $\pm 2 \Omega$, kira-kira sepersepuluh hambatan saat panas. Pada sepersekian detik pertama, arusnya bisa sekitar 10 kali arus normal. Lonjakan arus dan pemanasan mendadak ini membuat bagian filamen yang paling tipis mudah putus tepat saat lampu dinyalakan.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan V dan I pada resistor dan bohlam, kapan hukum Ohm berlaku, dan peran suhu, dalam dua atau tiga kalimat.

💡 Refleksi

- Hal baru yang kupelajari tentang cara memasang amperemeter dan voltmeter adalah ...
- Bagian yang masih membingungkanku adalah ...
- Satu kebiasaan hemat dan aman listrik yang ingin kulakukan di rumah adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya multimeter? Pakai Lab Mini "Lab Ohm: gambar grafik V – I sendiri" di Bab 23 (subbab 23.3). Pilih komponen "Resistor 10Ω ", atur tegangan sumber 2, 4, 6, 8, 10, dan 12 V, tekan tombol Catat titik, lalu salin bacaan voltmeter dan amperemeter. Ulangi untuk "Lampu pijar 12 V / 6 W". Isi tabel yang sama (kolom jumlah baterai diganti tegangan sumber) dan bandingkan kedua grafik yang tergambar.

Contoh data (resistor sebenarnya $\pm 98,6 \Omega$; baterai AA baru)

Jumlah baterai	V resistor (V)	I resistor (mA)	$R = V/I$ resistor (Ω)	V bohlam (V)	I bohlam (A)	$R = V/I$ bohlam (Ω)
1	1,55	15,7	98,7	1,52	0,14	10,9
2	3,09	31,3	98,7	3,02	0,21	14,4
3	4,62	46,9	98,5	4,50	0,26	17,3
4	6,15	62,4	98,6	5,96	0,30	19,9

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Perakitan rangkaian & keselamatan	Amperemeter seri dan voltmeter paralel terpasang benar, rentang alat ukur tepat, saklar dilepas setelah setiap pembacaan, dan tidak ada hubung singkat.	Rangkaian benar, tetapi sekali salah memilih rentang alat ukur.	Amperemeter atau voltmeter sempat dipasang salah dan harus dibantu guru.	Rangkaian tidak berhasil dibuat atau aturan keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, dan $R = V/I$ dihitung tepat untuk semua pembacaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang, atau mA tidak diubah menjadi A.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Kedua grafik rapi dengan sumbu, satuan, dan skala tepat; kemiringan resistor dihitung; lengkungan bohlam dijelaskan dengan suhu filamen.	Grafik benar, tetapi penjelasan lengkungan bohlam kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (hukum Ohm berlaku jika suhu tetap), didukung data, menyebut galat, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat, tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Bohlam senter pijar bisa dicari di toko listrik atau toko suku cadang sepeda motor; bohlam 6 V lain juga bisa dipakai asalkan arusnya tidak melebihi $\pm 0,5$ A. Jika hanya ada satu multimeter, ukur V dan I bergantian tanpa mengubah rangkaian. Tekankan aturan "Ampere antre, Volt nonton". Pertanyaan 4 membuka diskusi tentang GGL dan hambatan dalam di subbab 23.2.

Kompas, Baterai, dan Gulungan Kawat: Mengukur Medan Magnet Bumi di Sekolahmu

Bab 24 • Medan Magnet

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI–XII (cocok juga untuk IGCSE/IB)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing (discovery learning)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengulang percobaan Oersted dan menentukan arah medan magnet kawat berarus dengan aturan genggaman tangan kanan.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan kuat arus dengan simpangan jarum kompas di dekat kawat.
- Peserta didik dapat menentukan komponen mendatar medan magnet Bumi dari kemiringan grafik $\tan \theta$ terhadap B_{kawat} .
- Peserta didik dapat mengevaluasi sumber galat dan menjelaskan mengapa kompas bisa "tertipu" oleh kabel berarus.

Fenomena



Di perkemahan Pramuka, kompas Raka tiba-tiba "bandel" di dekat kabel lampu yang tersambung ke aki. Kak Nara menjelaskan bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet yang ikut mendorong jarum kompas. Sari langsung punya ide: "Kalau medan kawat bisa kita hitung dengan $B = \mu_0 NI / (2\pi a)$, berarti dari besar simpangan jarum kita bisa mengukur medan magnet Bumi juga!" Tarsi siap menggulung kawat. Berapa kuat medan magnet Bumi di sekolahmu?

Rumusan masalah

Bagaimana simpangan jarum kompas di dekat kawat berarus bergantung pada kuat arus, dan berapa komponen mendatar medan magnet Bumi di tempatmu?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Kuat arus I (jumlah baterai 1–4 buah)	Sudut simpangan jarum kompas θ	Jumlah lilitan $N = 20$, jarak jarum ke kawat $a = 2,0$ cm, arah kawat utara–selatan, posisi kompas

Alat dan bahan

- 1 kompas kecil (diameter 4–5 cm) dengan skala derajat
- ± 25 m kawat tembaga email 0,5 mm (atau kabel tipis berisolasi) dan selembar kardus 45 cm × 25 cm sebagai rangka kumparan
- 4 baterai AA 1,5 V dengan tempat baterai, 1 saklar tekan, dan 4 kabel jepit buaya
- 1 resistor keramik 33 Ω 5 W sebagai pembatas arus
- 1 multimeter digital (rentang 200 mA DC) sebagai amperemeter
- Penggaris, amplas halus, selotip, dan potongan karton untuk mengatur tinggi kompas

⚠ Keselamatan

Hanya pakai baterai (paling banyak 6 V), jangan pernah listrik PLN. Resistor $33\ \Omega$ akan menjadi hangat: letakkan di atas alas tahan panas dan jangan dipegang. Alirkan arus hanya 5–10 detik untuk setiap pembacaan, lalu lepaskan saklar. Jangan menghubungkan kutub baterai tanpa resistor (hubung singkat). Hati-hati dengan ujung kawat email yang tajam saat diampelas.

📋 Langkah kerja

1. Lilitkan kawat 20 kali mengelilingi tepi kardus $45\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ sehingga terbentuk kumparan persegi panjang yang datar. Rekatkan dengan selotip. Ampelas kedua ujung kawat email sampai tembaganya mengilap.
2. Letakkan kumparan mendatar di meja kayu, jauh dari benda besi, HP, dan magnet. Putar kardus sampai salah satu sisi panjangnya tepat searah utara–selatan menurut kompas.
3. Letakkan kompas di atas sisi panjang itu, dengan pengganjal karton sehingga jarum berada $a = 2,0\text{ cm}$ di atas berkas kawat. Pastikan jarum menunjuk 0° (utara) sebelum arus dialirkan.
4. Rangkai secara seri: baterai → saklar → amperemeter → resistor $33\ \Omega$ → kumparan → kembali ke baterai.
5. Mulai dengan 1 baterai. Tekan saklar, tunggu jarum diam, lalu baca sudut simpangan θ_1 dan arus I . Lepaskan saklar, lalu ulangi untuk mendapat θ_2 .
6. Ulangi untuk 2, 3, dan 4 baterai. Terakhir, dengan 4 baterai, tukar kutub baterai (arus dibalik), lalu catat arah dan besar simpangannya.
7. Hitung $B_{\text{kawat}} = \frac{\mu_0 N I}{2\pi a}$ dengan $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ T m/A}$, serta $\tan \theta$ untuk setiap percobaan.
8. Gambar grafik $\tan \theta$ (sumbu tegak) terhadap B_{kawat} (sumbu mendatar), lalu tarik garis lurus terbaik melalui titik asal.

📋 Tabel pengamatan ($N = 20$ lilitan, $a = 2,0\text{ cm}$)

Percobaan	$I\text{ (A)}$	$\theta_1\text{ (}^\circ\text{)}$	$\theta_2\text{ (}^\circ\text{)}$	$\theta\text{ rata-rata (}^\circ\text{)}$	$\tan \theta$	$B\text{ kawat (}\mu\text{T)}$
1 baterai						
2 baterai						
3 baterai						
4 baterai						
4 baterai, arus dibalik						

📊 Grafik

Grafik $\tan \theta$ (sumbu tegak) terhadap B_{kawat} dalam μT (sumbu mendatar). Tarik garis lurus terbaik yang melalui titik asal. Kemiringannya adalah $1/B_{\text{Bumi}}$.

🧠 Analisis

1. Apakah sudut θ naik sebanding dengan arus? Bagaimana dengan $\tan \theta$? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: θ naik saat arus naik, tetapi tidak sebanding: arus 4 kali lipat hanya menaikkan θ dari 13° menjadi $\pm 42^\circ$. Yang sebanding dengan arus adalah $\tan \theta$ ($0,23 \rightarrow 0,92$, juga 4 kali lipat). Hipotesis "makin besar arus, makin besar simpangan" terbukti, dengan hubungan $\tan \theta \propto I$.

2. Jelaskan dengan gambar vektor mengapa $\tan \theta = B_{\text{kawat}}/B_{\text{Bumi}}$.

Kunci: Jarum menunjuk arah medan total. B_{Bumi} mengarah ke utara, sedangkan B_{kawat} di atas kawat utara-selatan mengarah ke timur atau barat, tegak lurus B_{Bumi} . Kedua vektor membentuk segitiga siku-siku, sehingga sudut jarum dari utara memenuhi $\tan \theta = B_{\text{kawat}}/B_{\text{Bumi}}$.

3. Hitung kemiringan grafismu, lalu tentukan komponen mendatar medan magnet Bumi B_{Bumi} . Bandingkan dengan nilai $\pm 38\text{--}40\ \mu\text{T}$ untuk Indonesia.

Kunci: Contoh: kemiringan $\approx 0,92/34,6 \approx 0,026\ \mu\text{T}^{-1}$, sehingga $B_{\text{Bumi}} \approx 1/0,026 \approx 38\ \mu\text{T}$. Nilai ini cocok dengan komponen mendatar medan Bumi di Jawa ($\pm 38\ \mu\text{T}$), karena medan totalnya ($\pm 45\ \mu\text{T}$) sedikit miring terhadap bidang mendatar.

4. Kawat di bawah kompas membawa arus ke utara. Ke mana jarum menyimpang? Apa yang terjadi saat arus dibalik? Jelaskan dengan aturan genggaman tangan kanan.

Kunci: Genggam kawat dengan ibu jari kanan menunjuk ke utara: di atas kawat, lipatan jari mengarah ke timur. Jadi kutub U jarum menyimpang ke timur. Saat arus dibalik (ke selatan), medan kawat di atasnya mengarah ke barat, sehingga jarum menyimpang ke barat dengan sudut yang hampir sama.

5. Mengapa kawat harus dipasang searah utara-selatan? Apa yang terjadi jika kawat dipasang timur-barat?

Kunci: Agar medan kawat tegak lurus medan Bumi, sehingga $\tan \theta = B_{\text{kawat}}/B_{\text{Bumi}}$ berlaku. Jika kawat dipasang timur-barat, medan kawat di atasnya mengarah ke utara atau selatan, searah atau berlawanan dengan medan Bumi. Jarum hampir tidak menyimpang, atau malah berbalik 180° jika medan kawat ke selatan lebih kuat daripada medan Bumi.

6. Mengapa dipakai 20 lilitan, bukan satu kawat saja? Mengapa jarak a harus diukur teliti?

Kunci: Medan dari 20 lilitan sama dengan medan satu kawat berarus $20I$. Dengan satu kawat saja, arus $0,17\ \text{A}$ hanya menghasilkan $\pm 1,7\ \mu\text{T}$ dan simpangan $\pm 2,6^\circ$, terlalu kecil untuk dibaca. Karena $B \propto 1/a$, salah ukur a sebesar $2\ \text{mm}$ (10%) langsung membuat B_{Bumi} meleset $\pm 10\%$.

7. Sebutkan dua sumber galat dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: (a) jarak a dari pusat berkas kawat ke jarum sulit diukur tepat; (b) skala kompas hanya terbaca $\pm 1\text{--}2^\circ$; (c) ada benda besi, paku di meja, atau HP di dekatnya; (d) baterai melemah sehingga arus berubah. Perbaiki: pakai meja kayu, jauhkan HP, baca arus bersamaan dengan sudut, ulangi pembacaan, dan usahakan sudut berada di antara 20° dan 60° yang paling teliti.

8. Kaitkan dengan kompas Raka di perkemahan: mengapa kompas di dekat kabel aki atau pengeras suara bisa menunjuk arah yang salah?

Kunci: Kabel aki membawa arus beberapa ampere. Pada jarak beberapa sentimeter, medannya bisa sebanding dengan atau lebih besar daripada medan Bumi ($\pm 40\ \mu\text{T}$), sehingga jarum menunjuk arah medan total, bukan utara. Pengeras suara dan HP berisi magnet tetap yang juga mengganggu. Saat memakai kompas, jauhi kabel berarus, kendaraan, dan benda besi.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan arus, medan magnet kawat, dan simpangan kompas, serta nilai komponen mendatar medan magnet Bumi yang kamu peroleh.

Refleksi

- Saat jarum kompas bergerak sendiri karena arus, aku merasa ...
- Bagian yang masih sulit kupahami adalah ...
- Tempat di sekitarku yang sebaiknya dihindari saat memakai kompas adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Percobaan Oersted: kompas di sekitar kawat berarus" di Bab 24 (subbab 24.3). Biarkan medan magnet Bumi ($40 \mu\text{T}$) menyala. Seret kompas besar tepat ke selatan kawat (di bawah kawat pada layar) sampai bacaan jarak $5,0 \text{ cm}$. Atur arus $+2$, $+4$, $+6$, $+8$, dan $+10 \text{ A}$, tunggu jarum diam, lalu catat sudut jarum dan "Medan kawat di kompas besar". Isi tabel yang sama ($N = 1$, $a = 5 \text{ cm}$) dan buat grafik $\tan \theta$ terhadap B kawat. Kemiringannya seharusnya $1/(40 \mu\text{T})$.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b24-3

Contoh data (komponen mendatar medan Bumi sebenarnya $\pm 38 \mu\text{T}$; saat arus dibalik, jarum menyimpang ke arah berlawanan)

Percobaan	I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ rata-rata (°)	$\tan \theta$	B kawat (μT)
1 baterai	0,044	14	12	13,0	0,23	8,8
2 baterai	0,087	25	26	25,5	0,48	17,4
3 baterai	0,130	33	34	33,5	0,66	26,0
4 baterai	0,173	43	42	42,5	0,92	34,6
4 baterai, arus dibalik	0,173	41	43	42,0	0,90	34,6

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Kumparan rapi, kawat tepat utara-selatan, jarak a dijaga tetap, arus hanya dialirkan sebentar, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pembacaan yang tidak diulang atau arah kawat sedikit melenceng.	Arah kawat atau jarak a tidak dijaga sehingga data tidak konsisten.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, B_{kawat} dan $\tan \theta$ dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang, atau cm tidak diubah menjadi m.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi, garis terbaik ditarik, kemiringan ditafsirkan sebagai $1/B_{\text{Bumi}}$, dan hasilnya dibandingkan dengan nilai acuan.	Grafik benar, tetapi penafsiran kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala, atau θ dipakai langsung tanpa $\tan \theta$.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat, didukung data, arah simpangan dijelaskan dengan aturan tangan kanan, galat disebut, dan dikaitkan dengan contoh nyata.	Kesimpulan tepat, tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Kawat email 0,5 mm dijual per gulung di toko elektronik. Lakukan di meja kayu, jauh dari kaki meja besi, laptop, dan HP. Jika simpangan terlalu kecil, kurangi jarak a atau tambah lilitan; jika terlalu besar (lebih dari 70°), perbesar a . Komponen mendatar medan Bumi di Indonesia umumnya $\pm 36\text{--}41 \mu\text{T}$, bergantung pada lokasi. Alat ini pada dasarnya adalah galvanometer tangen sederhana.

Physicspedia · LKPD Bab 24 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Magnet Jatuh Selambat Siput: Menyelidiki Rem Arus Pusing di Pipa Tembaga AC

Bab 25 • Induksi Elektromagnetik

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XI–XII (versi sederhana untuk SMP kelas 9)

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat membandingkan gerak jatuh magnet di dalam pipa plastik dan pipa tembaga.
- Peserta didik dapat menentukan kecepatan terminal magnet dari kemiringan grafik waktu jatuh terhadap panjang pipa.
- Peserta didik dapat menjelaskan gaya hambat pada magnet dengan hukum Faraday dan hukum Lenz (arus pusing).
- Peserta didik dapat menghitung perubahan energi potensial menjadi kalor dan mengaitkannya dengan rem magnetik.

Fenomena



Sari menjatuhkan magnet kecil ke potongan pipa tembaga AC sisa pemasangan di rumahnya. Raka menunggu di bawah: satu detik, dua detik, lima detik... magnetnya baru keluar! "Pipanya diberi lem, ya?" tanya Raka. Padahal tembaga tidak ditarik magnet, dan di pipa plastik magnet itu langsung meluncur jatuh. Kak Nara tersenyum: "Yang menahan magnet adalah arus listrik yang lahir di dinding pipa itu sendiri." Tarsi menyiapkan stopwatch: seberapa lambat sebenarnya magnet itu jatuh, dan ke mana perginya energinya?

Rumusan masalah

Bagaimana waktu jatuh magnet di dalam pipa tembaga bergantung pada panjang pipa, dan berapa kecepatan terminalnya dibandingkan saat jatuh di pipa plastik?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Panjang pipa tembaga L (25, 50, 75, dan 100 cm) serta jenis pipa (tembaga atau PVC)	Waktu jatuh magnet t	Magnet yang sama, dilepas dari keadaan diam tepat di mulut pipa, pipa berdiri tegak

Alat dan bahan

- 1 magnet neodimium silinder (diameter ± 12 mm, tinggi ± 12 mm, massa ± 10 g)
- Pipa tembaga AC 5/8 inci (diameter dalam ± 14 mm) sepanjang 1 m, dipotong di toko menjadi 4 potong @ 25 cm
- Pipa PVC 1/2 inci sepanjang 1 m sebagai pembanding, dan selotip kertas untuk menyambung potongan pipa

- Stopwatch HP (lebih baik: kamera HP untuk merekam video), meteran, dan timbangan dapur digital
- Kain lap atau kotak berisi spons untuk menangkap magnet di bawah pipa

⚠ Keselamatan

Magnet neodimium sangat kuat: dua magnet bisa saling menyambar, menjepit kulit, atau pecah menjadi serpihan tajam. Pakai satu magnet saja, jauhkan dari HP, kartu ATM, jam, dan alat pacu jantung, dan simpan jauh dari anak kecil karena berbahaya jika tertelan. Tangkap magnet dengan kain atau kotak spons agar tidak pecah membentur lantai. Ujung pipa tembaga yang baru dipotong bisa tajam: bungkus dengan selotip. Percobaan ini tidak memakai listrik.

📋 Langkah kerja

1. Timbang magnet dan catat massanya. Ukur panjang setiap potongan pipa.
2. Tegakkan pipa PVC 1 m (dipegang teman atau diikat ke kaki kursi). Pegang magnet tepat di mulut atas pipa, lepaskan bersamaan dengan menekan stopwatch, dan hentikan stopwatch saat magnet keluar dari ujung bawah. Ulangi 3 kali (t_1 , t_2 , t_3).
3. Tegakkan satu potongan pipa tembaga 25 cm, lalu ulangi cara yang sama.
4. Sambung 2 potongan pipa tembaga ujung ke ujung dengan selotip (50 cm), lalu ulangi. Lanjutkan untuk 3 potongan (75 cm) dan 4 potongan (100 cm).
5. Agar lebih teliti, rekam percobaan dengan kamera HP, lalu baca waktu jatuh dari video (dari saat magnet dilepas sampai bunyi magnet mengenai kotak spons).
6. Hitung waktu rata-rata dan kecepatan rata-rata $v = L/t$ untuk setiap percobaan.
7. Gambar grafik t (sumbu tegak) terhadap L (sumbu mendatar) untuk pipa tembaga, lalu tarik garis lurus terbaik.

📋 Tabel pengamatan (massa magnet $m = \dots$ g)

Pipa	L (m)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$v = L/t$ (m/s)
PVC 100 cm						
Tembaga 25 cm						
Tembaga 50 cm						
Tembaga 75 cm						
Tembaga 100 cm						

📊 Grafik

Grafik t (sumbu tegak) terhadap L (sumbu mendatar) untuk pipa tembaga. Tarik garis lurus terbaik. Kemiringannya adalah $1/v_{\text{terminal}}$.

🧠 Analisis

1. Bandingkan waktu jatuh di pipa PVC dan pipa tembaga 100 cm. Berapa kali lebih lama? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Di pipa PVC, magnet jatuh bebas dalam $\pm 0,46$ s (teori: $\sqrt{2L/g} \approx 0,45$ s). Di pipa tembaga 100 cm, magnet butuh $\pm 8,3$ s, sekitar 18 kali lebih lama. Hipotesis "pipa tembaga memperlambat magnet" terbukti.

2. Bagaimana bentuk grafik $t-L$? Hitung kecepatan terminal magnet dari kemiringannya. Apa artinya kecepatan L/t hampir sama untuk semua panjang pipa tembaga?

Kunci: Grafiknya berupa garis lurus yang hampir melalui titik asal: $t \propto L$. Kemiringannya $\approx \frac{8,34 - 2,11}{1,00 - 0,25} \approx 8,3$ s/m, sehingga $v_{\text{terminal}} \approx 1/8,3 \approx 0,12$ m/s. Kecepatan L/t yang sama untuk semua panjang berarti magnet hampir seketika mencapai kecepatan tetap, lalu bergerak lurus beraturan di sepanjang pipa.

3. Jelaskan dengan hukum Faraday dan hukum Lenz mengapa magnet diperlambat, padahal tembaga tidak ditarik magnet. Mengapa magnet akhirnya bergerak dengan kecepatan tetap?

Kunci: Saat magnet jatuh, fluks magnet yang melingkupi setiap "cincin" dinding pipa berubah, sehingga timbul GGL dan arus pusar yang melingkar (hukum Faraday). Menurut hukum Lenz, arus di bawah magnet membentuk kutub yang menolak magnet, sedangkan arus di atasnya menarik magnet. Keduanya melawan gerak jatuh. Gaya hambat ini makin besar jika magnet makin cepat, sampai sama dengan berat magnet. Gaya total menjadi nol, sehingga kecepatannya tetap (kecepatan terminal).

4. Hitung energi potensial magnet yang berkurang selama jatuh 1 m dan energi kinetiknya di ujung bawah. Ke mana perginya selisih energi itu? Berapa dayanya?

Kunci: $E_p = mgh = 0,010 \times 9,8 \times 1,0 \approx 0,098$ J, sedangkan $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 0,010 \times 0,12^2 \approx 7 \times 10^{-5}$ J. Lebih dari 99,9% energi potensial berubah menjadi kalor di dinding pipa melalui arus pusar. Dayanya $P = mgv \approx 0,098 \times 0,12 \approx 0,012$ W, terlalu kecil untuk terasa hangat.

5. Ramalkan: jika pipa tembaga diganti pipa aluminium berukuran sama (konduktivitas aluminium $\pm 0,6$ kali tembaga), apakah magnet jatuh lebih cepat atau lebih lambat? Bagaimana jika pipa tembaga dibelah memanjang?

Kunci: Gaya hambat sebanding dengan konduktivitas, sehingga di pipa aluminium magnet jatuh lebih cepat: $v_{\text{terminal}} \approx 0,12/0,6 \approx 0,2$ m/s (jika ukuran dan tebal dindingnya sama). Pipa tembaga yang dibelah memanjang memutus jalur arus pusar yang melingkar, sehingga gaya hambatnya jauh lebih kecil dan magnet jatuh jauh lebih cepat.

6. Sebutkan dua sumber galat dan cara memperbaikinya. Mengapa data pipa PVC paling tidak teliti?

Kunci: Contoh: (a) waktu reaksi saat menekan stopwatch ($\pm 0,1-0,2$ s); (b) magnet menggesek dinding pipa; (c) sambungan potongan pipa tidak rapat; (d) pipa tidak tegak. Perbaikan: rekam video, ulangi lebih banyak, pakai pipa utuh, dan tegakkan pipa dengan bantuan benang berbandul. Data PVC paling tidak teliti karena waktu jatuhnya ($\pm 0,45$ s) hampir sama besar dengan waktu reaksi, sehingga galat relatifnya bisa 20-40%.

7. Sebutkan dua penerapan rem arus pusar dan jelaskan keuntungannya dibandingkan rem gesek.

Kunci: Contoh: rem wahana jatuh bebas dan roller coaster, rem kereta cepat, rem tambahan pada truk dan bus, serta peredam jarum timbangan. Keuntungannya: tidak ada bagian yang bergesekan sehingga tidak aus, pengeremannya halus, dan tetap bekerja tanpa listrik jika memakai magnet tetap. Kelemahannya, rem ini melemah saat kendaraan melambat, jadi tetap perlu rem gesek untuk berhenti total.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang gerak magnet di dalam pipa tembaga, kecepatan terminal yang kamu peroleh, dan peran hukum Faraday serta hukum Lenz, dalam dua atau tiga kalimat.

Refleksi

- Saat magnet akhirnya keluar dari pipa tembaga, aku merasa ...
- Hal yang masih membuatku penasaran tentang arus pusar adalah ...
- Aku ingin mencoba percobaan serupa dengan ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya pipa tembaga atau magnet neodimium? Pakai Lab Mini "Lomba jatuh: pipa plastik, aluminium, dan tembaga" di Bab 25 (subbab 25.3). Atur tebal dinding 2 mm dan kekuatan magnet 1x, lalu tekan Jalankan dan catat waktu ketiga pipa. Untuk grafik t-L, tekan Jeda saat magnet di pipa tembaga melewati tanda 25, 50, dan 75 cm pada mistar, lalu catat waktunya. Bandingkan kecepatan terminalmu dengan bacaan "Kecepatan terminal (tembaga)". Ulangi dengan tebal dinding 1 mm dan 3 mm: bagaimana kecepatan terminalnya berubah?

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b25-3

Contoh data (magnet 10 g, pipa tembaga AC 5/8 inci)

Pipa	L (m)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t rata-rata (s)	v = L/t (m/s)
PVC 100 cm	1,00	0,48	0,41	0,50	0,46	2,16
Tembaga 25 cm	0,25	2,18	2,00	2,15	2,11	0,118
Tembaga 50 cm	0,50	4,06	4,24	4,27	4,19	0,119
Tembaga 75 cm	0,75	6,36	6,19	6,22	6,26	0,120
Tembaga 100 cm	1,00	8,30	8,46	8,26	8,34	0,120

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Pipa tegak, magnet dilepas dari diam tepat di mulut pipa, setiap pengukuran diulang 3 kali, dan aturan keselamatan magnet dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang tidak diulang.	Magnet sering dilempar atau pipa miring sehingga data tidak konsisten.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap, satuan benar, rata-rata dan $v = L/t$ dihitung tepat untuk semua percobaan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang, atau cm tidak diubah menjadi m.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik rapi, garis terbaik ditarik, kemiringan ditafsirkan sebagai $1/v_{\text{terminal}}$, dan perubahan energi dihitung.	Grafik benar, tetapi penafsiran kemiringan atau energi kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat, didukung data, menjelaskan peran hukum Faraday dan Lenz, menyebut galat, dan dikaitkan dengan rem magnetik.	Kesimpulan tepat, tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Pipa tembaga AC dijual per meter di toko perlengkapan AC; minta toko memotongnya dengan pemotong pipa agar ujungnya rapi. Pastikan magnet muat longgar (celah 1–2 mm). Kecepatan terminal sangat bergantung pada kekuatan magnet dan tebal dinding pipa, jadi hasil tiap kelompok bisa berbeda dari contoh data. Jika tidak ada pipa tembaga, gulungan aluminium foil 40 lapis di luar pipa PVC memberi efek yang lebih kecil tetapi masih terlihat (lihat Tantangan Rumah Bab 25). Diskusikan kaitannya dengan kekekalan energi di Bab 8.

Physicspedia · LKPD Bab 25 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Radio Bandul: Menala Resonansi seperti Memutar Tombol Radio

Bab 26 • Arus Bolak-balik

Eksperimen kelompok dengan model analogi (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XII (cocok juga untuk pengayaan IGCSE/IB)

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE) dengan analogi mekanik-listrik

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat menunjukkan peristiwa resonansi: bandul yang frekuensi alaminya sama dengan frekuensi penggerak berayun paling besar.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan frekuensi alami bandul dengan panjang talinya melalui grafik f terhadap $1/\sqrt{\ell}$.
- Peserta didik dapat menganalogikan ℓ/g pada bandul dengan LC pada penala radio, $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, serta redaman dengan hambatan R .
- Peserta didik dapat menjelaskan pengaruh redaman terhadap ketajaman resonansi dan sumber galat percobaan.

Fenomena



Malam Minggu, Raka memutar tombol radio tua milik kakeknya. "Di udara ada puluhan siaran, kok yang keluar dari speaker cuma satu?" Sari teringat ayunan di taman: kalau didorong tepat seirama, ayunan makin tinggi. Kak Nara mengangguk: "Rangkaian LC di radio juga punya irama alami, $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$. Memutar tombol berarti mengubah C ." Ia lalu membentangkan tali rafia, menggantung lima bandul yang berbeda panjang, dan menantang kelompokmu membuat "radio bandul". Tarsi siap menjadi pendengar setia!

Rumusan masalah

Bandul mana yang ikut berayun paling besar ketika bandul penggerak diayunkan, dan bagaimana hubungan frekuensi alami bandul dengan panjang talinya?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Panjang tali bandul ℓ (dan panjang bandul penggerak)	Frekuensi alami f setiap bandul dan simpangan maksimumnya saat digerakkan	Massa beban bandul ringan, simpangan awal bandul penggerak (± 10 cm), tali pembentang yang sama, jumlah ayunan yang diukur (10 ayunan)

Alat dan bahan

- Tali rafia atau benang kasur $\pm 1,5$ m sebagai tali pembentang, diikat agak kencang di antara dua sandaran kursi
- 1 botol air mineral 600 mL berisi penuh air sebagai bandul penggerak (berat), digantung dengan tali yang panjangnya bisa diatur 30–80 cm

- 5 gelas plastik kecil berisi plastisin ± 20 g sebagai bandul ringan A–E, digantung benang sepanjang 20, 35, 50, 65, dan 80 cm (diukur sampai titik tengah beban)
- 5 potong karton ± 8 cm $\times$ 8 cm sebagai sirip peredam
- Penggaris 1 m atau meteran, selotip kertas, dan spidol untuk label
- Stopwatch HP (atau kamera HP untuk merekam video gerak lambat)

Keselamatan

Ikat tali pembentang pada kursi yang stabil dan beri pemberat (misalnya tas) di dudukannya agar kursi tidak terguling. Jangan mengayun botol lebih dari ± 15 cm supaya tidak mengenai wajah atau tangan teman. Pastikan tutup botol rapat agar air tidak tumpah dan lantai tidak licin. Percobaan ini sama sekali tidak memakai listrik.

Langkah kerja

1. Bentangkan tali rafia mendatar di antara dua sandaran kursi. Gantungkan bandul ringan A–E dan botol penggerak sepanjang 50 cm pada tali yang sama, berjarak ± 12 cm satu sama lain.
2. Frekuensi alami: pegangi semua bandul lain, lalu ayunkan bandul A sendirian dengan simpangan kecil (± 5 cm). Ukur waktu 10 ayunan penuh t_{10} . Ulangi untuk bandul B–E.
3. Hitung periode $T = t_{10}/10$, frekuensi $f = 1/T$, dan $1/\sqrt{\ell}$ untuk setiap bandul.
4. Resonansi: diamkan semua bandul. Tarik botol penggerak ± 10 cm lalu lepaskan. Tunggu ± 30 detik, lalu catat simpangan maksimum setiap bandul ringan (baca pada penggaris di belakang bandul atau dari video gerak lambat).
5. "Ganti stasiun": ubah panjang tali botol menjadi 35 cm, lalu 65 cm. Bandul mana yang sekarang berayun paling besar? Lalu "putar tombol radio": kembalikan botol ke 50 cm dan ubah panjang bandul A sedikit demi sedikit sampai ia ikut berayun besar. Catat panjang bandul A saat itu.
6. Redaman: tempelkan sirip karton pada setiap bandul ringan (bidang sirip tegak lurus arah ayunan), lalu ulangi langkah 4.
7. Gambar grafik f (sumbu tegak) terhadap $1/\sqrt{\ell}$ (sumbu mendatar), tarik garis lurus terbaik, lalu hitung kemiringannya.

Tabel pengamatan (bandul penggerak 50 cm)

Bandul	ℓ (m)	$1/\sqrt{\ell}$ ($1/\sqrt{\text{m}}$)	t 10 ayunan (s)	T (s)	$f = 1/T$ (Hz)	Simpangan tanpa sirip (cm)	Simpangan dengan sirip (cm)
A							
B							
C							
D							
E							

Grafik

Grafik frekuensi alami f (sumbu tegak) terhadap $1/\sqrt{\ell}$ (sumbu mendatar) dengan satu garis lurus terbaik. Buat juga diagram batang simpangan bandul A–E (tanpa dan dengan sirip) sebagai "kurva resonansi".

Analisis

1. Saat bandul penggerak 50 cm diayunkan, bandul mana yang berayun paling besar? Apa kesamaan bandul itu dengan bandul penggerak? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Bandul C (50 cm) berayun paling besar (contoh data: 10 cm, bandul lain hanya 0,3–2,1 cm). Panjangnya sama dengan bandul penggerak, jadi frekuensi alaminya sama dengan frekuensi dorongan yang merambat lewat tali. Dorongan kecil yang selalu tepat seirama terus menambah energinya: inilah resonansi. Bandul lain kadang didorong searah, kadang berlawanan dengan gerakannya, sehingga hanya bergoyang kecil.

2. Bagaimana bentuk grafik $f-1/\sqrt{\ell}$? Hitung kemiringannya, bandingkan dengan nilai teori $\sqrt{g}/(2\pi)$, lalu tentukan g dari datamu.

Kunci: Garis lurus yang melalui titik asal: $f \propto 1/\sqrt{\ell}$. Contoh: kemiringan $\pm 0,497 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$, dekat dengan teori $\sqrt{9,8}/(2\pi) = 0,498$. Dari kemiringan k : $g = (2\pi k)^2 \approx 9,75 \text{ m/s}^2$.

3. Frekuensi bandul $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\ell/g}}$, sedangkan frekuensi penala radio $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Besaran bandul apa yang berperan seperti LC ? Bagian percobaan mana yang setara dengan "ganti stasiun" dan mana yang setara dengan "memutar tombol radio"?

Kunci: ℓ/g berperan seperti LC . Mengubah panjang tali botol penggerak setara dengan "ganti stasiun" (frekuensi gelombang yang datang berubah). Mengubah panjang bandul A sampai ikut berayun besar setara dengan "memutar tombol radio": kita mengubah C sampai frekuensi alami rangkaian LC sama dengan frekuensi stasiun. Bandul A beresonansi saat panjangnya $\pm 50 \text{ cm}$.

4. Bandingkan simpangan dengan dan tanpa sirip karton. Besaran apa pada rangkaian RLC yang berperan seperti sirip? Mengapa radio dengan R besar membuat stasiun-stasiun bercampur?

Kunci: Dengan sirip, simpangan bandul C anjlok (contoh: dari 10 cm menjadi 2,5 cm), sedangkan bandul tetangga hampir tidak berubah (1,0–1,7 cm), sehingga bandul C tidak lagi menonjol: resonansinya tumpul. Sirip berperan seperti hambatan R yang mengubah energi menjadi panas. Pada radio, R besar memperlebar pita $\Delta f = R/(2\pi L)$, sehingga stasiun yang frekuensinya berdekatan ikut tertangkap dan bercampur.

5. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: waktu reaksi saat menekan stopwatch ($\pm 0,1$ – $0,2 \text{ s}$, diperkecil dengan mengukur 10 ayunan), panjang tidak diukur sampai titik tengah beban, simpangan terlalu besar, dan bandul lain ikut bergoyang lewat tali pembentang saat frekuensi alami diukur. Perbaikan: ukur 20 ayunan atau pakai video gerak lambat, tandai titik tengah beban, dan pegangi bandul lain saat mengukur satu bandul.

6. Penala radio FM memakai kumparan $L = 0,1 \mu\text{H}$. Berapa C yang diperlukan untuk menangkap stasiun 100 MHz? Jika C dibuat 4 kali lipat, berapa frekuensi resonansinya, dan apa padanannya pada bandul?

Kunci: $C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} = \frac{1}{(2\pi \times 10^8)^2 (1 \times 10^{-7})} \approx 2,5 \times 10^{-11} \text{ F} = 25 \text{ pF}$. Karena $f_0 \propto 1/\sqrt{C}$, C yang 4 kali lipat membuat f_0 tinggal setengahnya, yaitu 50 MHz (di luar pita FM). Padanannya pada bandul adalah tali 4 kali lebih panjang: frekuensinya juga tinggal setengah (bandul A 20 cm $\pm 1,1 \text{ Hz}$, bandul E 80 cm $\pm 0,55 \text{ Hz}$).

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang syarat terjadinya resonansi, hubungan frekuensi alami dengan panjang bandul, dan pengaruh redaman. Kaitkan dengan cara radio memilih stasiun memakai $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$.

💡 Refleksi

- Momen paling seru saat bandul-bandul mulai "menjawab" bandul penggerak adalah ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang resonansi dan rangkaian LC adalah ...
- Contoh resonansi lain yang pernah dialami di rumah, di jalan, atau saat bermain adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya alat? Pakai Lab Mini "Osilasi LC: energi yang berayun" di Bab 26 (subbab 26.5): buat $R = 0$ dan $L = 50$ mH, lalu ubah C menjadi 10, 20, 40, 60, dan 80 μF . Catat periode T dan frekuensi alami f_0 yang ditampilkan, isi tabel dengan C menggantikan ℓ (kolom $1/\sqrt{C}$), lalu gambar grafik f_0 terhadap $1/\sqrt{C}$. Untuk bagian resonansi dan redaman, pakai Lab Mini "Penala radio: putar kapasitor, tangkap stasiun!" di subbab yang sama: geser C sampai satu stasiun terdengar jernih, lalu besarkan R dan amati stasiun-stasiun mulai bercampur.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b26-5

📊 Contoh data (bandul penggerak 50 cm, simpangan awal 10 cm, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

Bandul	ℓ (m)	$1/\sqrt{\ell}$ ($1/\sqrt{\text{m}}$)	t 10 ayunan (s)	T (s)	f = 1/T (Hz)	Simpangan tanpa sirip (cm)	Simpangan dengan sirip (cm)
A	0,20	2,24	9,04	0,904	1,106	0,3	0,3
B	0,35	1,69	11,79	1,179	0,848	1,2	1,0
C	0,50	1,41	14,24	1,424	0,702	10,0	2,5
D	0,65	1,24	16,14	1,614	0,620	2,1	1,7
E	0,80	1,12	18,02	1,802	0,555	1,3	1,2

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Bandul terpasang rapi, frekuensi alami diukur 10 ayunan, resonansi dan redaman diamati sesuai langkah, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada satu pengukuran yang terburu-buru atau tidak diulang.	Beberapa langkah terlewat, misalnya bagian redaman atau "ganti stasiun".	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap; T , f , dan $1/\sqrt{\ell}$ dihitung tepat dengan satuan benar.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data atau satuan hilang.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik $f-1/\sqrt{\ell}$ rapi dengan garis terbaik, kemiringan dipakai menentukan g , dan analogi $\ell/g \leftrightarrow LC$ serta sirip $\leftrightarrow R$ dijelaskan tepat.	Grafik benar, tetapi penafsiran kemiringan atau analoginya kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik; analogi keliru.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (resonansi terjadi saat frekuensi sama, $f \propto 1/\sqrt{\ell}$, redaman menumpukan resonansi), didukung data, dan dikaitkan dengan penala radio.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Bandul penggerak harus jauh lebih berat daripada bandul ringan agar energinya cukup untuk menggerakkan semuanya. Tali pembentang yang sedikit kendur membuat sambungan antarbandul lebih kuat sehingga resonansi lebih jelas. Tegaskan bahwa ini model analogi tanpa listrik: hubungkan dengan kotak Lanjut di subbab 26.5 ($L \leftrightarrow m$, $1/C \leftrightarrow k$), lalu tutup dengan Lab Mini "Penala radio" agar siswa melihat kurva resonansi rangkaian LC yang sebenarnya.

Senter dan Sinyal BTS: Menguji Hukum Kuadrat Terbalik dengan Sensor Cahaya HP

Bab 27 • Gelombang Elektromagnetik

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XII (cocok juga untuk IGCSE/IB)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengukur kuat penerangan cahaya LED pada berbagai jarak memakai sensor cahaya HP.
- Peserta didik dapat menyelidiki hubungan intensitas gelombang elektromagnetik dengan jarak dari sumber titik, $I = P/(4\pi r^2)$, melalui grafik E terhadap $1/r^2$.
- Peserta didik dapat menjelaskan hasil kali Er^2 yang tetap dengan model energi yang menyebar ke permukaan bola.
- Peserta didik dapat mengaitkan hukum kuadrat terbalik dengan jangkauan BTS, radar cuaca, dan sinar Matahari.

Fenomena



Raka sedang main gim daring di teras rumah neneknya di desa. Begitu ia berjalan ke kebun belakang, sinyalnya tinggal satu garis. "Padahal jaraknya ke menara BTS cuma dua kali lebih jauh!" protesnya. Sari curiga sinyal tidak melemah sebanding jarak, melainkan lebih cepat. Kak Nara mengeluarkan LED kecil dan HP: "Cahaya LED dan sinyal HP sama-sama gelombang elektromagnetik. Temukan aturan melemahnya cahaya LED, maka kalian tahu aturan untuk BTS." Tarsi sudah menutup semua tirai!

Rumusan masalah

Bagaimana hubungan kuat penerangan (intensitas) cahaya sebuah LED dengan jaraknya dari LED itu?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jarak sensor HP dari LED, r	Kuat penerangan terukur E (lux), yang sebanding dengan intensitas I	LED dan baterai yang sama, LED dan sensor tetap segaris dan saling berhadapan, ruangan gelap dengan cahaya latar yang sama, posisi HP tidak dimiringkan

Alat dan bahan

- 1 LED putih 5 mm dan 1 baterai koin 3 V (CR2032) yang dirangkai dengan selotip (atau senter LED kecil satu mata)
- 1 HP Android dengan aplikasi pengukur cahaya (lux meter) yang membaca sensor cahaya di dekat kamera depan, misalnya phyphox (gratis)
- Penggaris 1 m atau meteran, selotip, dan spidol untuk menandai jarak 10–50 cm

- Kardus atau tumpukan buku sebagai penyangga agar LED dan sensor HP setinggi dan segaris
- Ruang yang bisa digelapkan (tirai ditutup, lampu dimatikan)
- Kertas grafik (milimeter) atau aplikasi lembar kerja (spreadsheet)

⚠ Keselamatan

Jangan menatap LED yang menyala dari jarak dekat terlalu lama. Baterai koin berbahaya jika tertelan: simpan di wadah tertutup, jauhkan dari adik kecil, dan segera ke dokter jika tertelan. Saat ruangan gelap, rapikan tas dan kursi agar tidak tersandung, dan gunakan senter HP untuk berjalan. Percobaan ini hanya memakai baterai, tanpa listrik PLN.

📋 Langkah kerja

1. Cari letak sensor cahaya HP (biasanya di samping kamera depan): tutup bagian itu dengan jari dan perhatikan angka lux turun. Buka aplikasi pengukur cahaya.
2. Letakkan HP terlentang di atas penyangga. Tempelkan penggaris di meja dengan angka nol tepat di bawah sensor. Pasang LED pada penyangga lain setinggi sensor, menghadap sensor.
3. Gelapkan ruangan. Dengan LED padam, catat cahaya latar E_{latar} .
4. Nyalakan LED pada jarak $r = 0,10$ m (diukur dari ujung LED ke sensor). Catat tiga pembacaan lux E_1, E_2, E_3 dengan selang beberapa detik.
5. Ulangi untuk $r = 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40$; dan $0,50$ m. Pastikan LED tetap tepat menghadap sensor.
6. Hitung E rata-rata, $E_{\text{bersih}} = E_{\text{rata-rata}} - E_{\text{latar}}$, $1/r^2$, dan hasil kali $E_{\text{bersih}} \times r^2$.
7. Gambar grafik E_{bersih} terhadap $1/r^2$, tarik garis lurus terbaik, dan hitung kemiringannya. (Tantangan IB: gambar juga $\log E_{\text{bersih}}$ terhadap $\log r$.)

📋 Tabel pengamatan (E latar = ... lux)

r (m)	$1/r^2$ (m ⁻²)	E_1 (lux)	E_2 (lux)	E_3 (lux)	E rata-rata (lux)	E bersih (lux)	E bersih $\times r^2$ (lux·m ²)
0,10							
0,15							
0,20							
0,25							
0,30							
0,40							
0,50							

📊 Grafik

Grafik E_{bersih} (sumbu tegak) terhadap $1/r^2$ (sumbu mendatar) dengan garis lurus terbaik. Pengayaan: grafik $\log E_{\text{bersih}}$ terhadap $\log r$; kemiringannya menunjukkan pangkat hubungan.

Analisis

1. Apa yang terjadi pada kuat penerangan ketika jarak dijadikan dua kali (dari 0,10 m ke 0,20 m) dan tiga kali (dari 0,10 m ke 0,30 m)? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Jarak dua kali: penerangan bersih tinggal sekitar $\frac{1}{4}$ (contoh: 508 lux $\rightarrow$ 125 lux). Jarak tiga kali: tinggal sekitar $\frac{1}{9}$ (508 lux $\rightarrow$ 55,7 lux). Penerangan melemah jauh lebih cepat daripada "sebanding jarak": hipotesis kuadrat terbalik terbukti.

2. Bagaimana bentuk grafik $E-1/r^2$? Apa arti hasil kali Er^2 yang hampir tetap? (Pengayaan: berapa kemiringan grafik log-log-mu?)

Kunci: Grafik $E-1/r^2$ berupa garis lurus yang (hampir) melalui titik asal, jadi $E \propto 1/r^2$. Hasil kali Er^2 tetap ($\pm 5,0$ lux·m² pada contoh data) dan sama dengan kemiringan grafik; nilainya menyatakan kuat sumber (sekitar 5 kandela). Kemiringan grafik log-log $\pm -2,0$.

3. Mengapa cahaya latar harus dikurangkan, dan mengapa data pada jarak sangat dekat bisa menyimpang dari pola?

Kunci: Cahaya latar dari luar tidak bergantung pada jarak LED; tanpa dikurangkan, titik-titik jauh tampak terlalu terang dan grafik tidak melalui titik asal. Pada jarak sangat dekat, LED tidak lagi seperti titik (ada lensa epoksi dan pola berkas), titik pancar sebenarnya berada beberapa milimeter di dalam LED, dan sensor bisa mendekati batas ukurnya.

4. Jelaskan hasilmu dengan model energi yang menyebar ke permukaan bola, $I = P/(4\pi r^2)$.

Kunci: Daya P yang dipancarkan menyebar ke permukaan bola seluas $4\pi r^2$. Jika r dua kali, luas bola menjadi empat kali, sehingga daya per meter persegi tinggal $\frac{1}{4}$. Karena energinya tidak hilang (udara bersih hampir tidak menyerap), $Ir^2 = P/(4\pi)$ tetap.

5. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: LED tidak tepat menghadap sensor, jarak diukur dari titik yang salah, pantulan dari meja atau dinding, cahaya latar berubah, baterai melemah, dan angka lux berfluktuasi. Perbaikan: pakai alas kain hitam, ukur ulang cahaya latar setiap beberapa data, kelilingi lintasan dengan kardus hitam, dan ambil rata-rata beberapa pembacaan.

6. Sebuah BTS memancarkan daya 40 W (anggap sama rata ke segala arah). Hitung intensitasnya pada jarak 500 m dan 1.000 m. Pakai hasilmu untuk menjelaskan keluhan Raka, dan mengapa jaringan 5G membutuhkan BTS yang lebih rapat.

Kunci: $I(500 \text{ m}) = \frac{40}{4\pi(500)^2} \approx 1,3 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ dan $I(1000 \text{ m}) \approx 3,2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$: jarak dua kali, sinyal tinggal $\frac{1}{4}$. Ditambah serapan pohon dan dinding, sinyal Raka anjlok. Jaringan 5G memakai frekuensi lebih tinggi yang lebih mudah diserap dinding dan hujan, sehingga perlu banyak BTS kecil yang rapat agar jarak ke pengguna tetap pendek.

Kesimpulan

Tuliskan kesimpulan tentang hubungan intensitas gelombang elektromagnetik dengan jarak dari sumber titik, lengkap dengan persamaannya dan syarat berlakunya.

Refleksi

- Bagian yang paling mengejutkan bagiku dalam percobaan ini adalah ...

- Aku masih ingin tahu lebih banyak tentang ...
- Lain kali saat sinyal HP-ku lemah, aku akan ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya ruangan gelap atau sensor cahaya? Pakai Lab Mini "Lampu & sensor cahaya: hukum kuadrat terbalik" di subbab 27.6. Pilih "Ruang gelap", lalu seret HP ke jarak 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; dan 0,50 m. Di setiap jarak, tekan  "Catat data" dan salin angka "E – E latar" ke tabel. Ganti grafik ke "E terhadap $1/r^2$ " untuk mengecek garis lurusmu, lalu ulangi dengan "Lampu kamar menyala" untuk melihat kenapa cahaya latar harus dikurangkan.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b27-6

Contoh data (LED 5 mm + baterai koin, E latar = 3 lux)

r (m)	$1/r^2$ (m ⁻²)	E ₁ (lux)	E ₂ (lux)	E ₃ (lux)	E rata-rata (lux)	E bersih (lux)	E bersih × r ² (lux·m ²)
0,10	100	507	509	517	511,0	508,0	5,08
0,15	44,4	221	219	230	223,3	220,3	4,96
0,20	25,0	127	127	130	128,0	125,0	5,00
0,25	16,0	81	85	83	83,0	80,0	5,00
0,30	11,1	57	60	59	58,7	55,7	5,01
0,40	6,25	33	35	35	34,3	31,3	5,01
0,50	4,00	23	23	24	23,3	20,3	5,08

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	LED dan sensor selalu segaris, cahaya latar diukur, setiap jarak dibaca 3 kali, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Langkah benar, tetapi ada beberapa jarak yang tidak dibaca berulang.	Cahaya latar tidak diukur atau posisi LED berubah-ubah.	Percobaan tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap; E bersih, $1/r^2$, dan $E r^2$ dihitung tepat dengan satuan benar.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau cahaya latar tidak dikurangkan.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik $E-1/r^2$ rapi dengan garis terbaik, kemiringan ditafsirkan sebagai kuat sumber, dan hukum kuadrat terbalik dijelaskan dengan model bola.	Grafik benar tetapi penafsiran kurang lengkap.	Hanya grafik $E-r$ atau grafik tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($I \propto 1/r^2$, $I = P/(4\pi r^2)$), didukung data, menyebut syarat sumber titik, dan dikaitkan dengan BTS atau radar.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Aplikasi phyphox (menu "Cahaya") dapat membaca sensor cahaya pada sebagian besar HP Android; pada iPhone sensor itu tidak terbuka untuk aplikasi, jadi kelompok dapat meminjam HP Android atau memakai versi virtual. Angka lux berbeda antar-HP, tetapi pola $1/r^2$ tetap sama. Jika pembacaan pada 10 cm melewati batas sensor, mulailah dari 15 cm. Diskusikan bahwa lux adalah ukuran terang menurut kepekaan mata; untuk sumber yang sama, lux sebanding dengan intensitas dalam W/m^2 .

Physicspedia · LKPD Bab 27 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Menimbang Foton dengan LED: Mengukur Tetapan Planck dari Lima Warna

Bab 28 • Kuantum: Foton & Gelombang Materi

Eksperimen kelompok (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XII (cocok untuk IB DP dan olimpiade)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengukur tegangan ambang menyala LED berbagai warna dengan rangkaian baterai, potensiometer, dan voltmeter.
- Peserta didik dapat menjelaskan bahwa energi satu foton yang dipancarkan LED sebanding dengan frekuensinya, $E = hf = hc/\lambda$.
- Peserta didik dapat menentukan tetapan Planck dari kemiringan grafik tegangan ambang V terhadap $1/\lambda$.
- Peserta didik dapat mengevaluasi galat percobaan dengan membandingkan hasilnya dengan $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Fenomena



Lampu hias LED warna-warni di pagar rumah Sari berkedip menyambut Lebaran. Raka penasaran: "Kenapa LED biru di mainan adikku butuh baterai lebih banyak daripada LED merah?" Kak Nara tersenyum: "Di dalam LED, setiap elektron yang melewati sambungan melepaskan tepat satu foton. Energi yang diberikan baterai kepada satu elektron, eV , harus cukup untuk membuat satu foton, hf ." Sari langsung berseru: kalau begitu, tegangan LED bisa dipakai untuk "menimbang" foton, bahkan mengukur tetapan Planck! Tarsi menyiapkan lima LED dan sedotan hitam.

? Rumusan masalah

Bagaimana hubungan tegangan ambang menyala sebuah LED dengan panjang gelombang (warna) cahayanya, dan berapa nilai tetapan Planck yang dapat ditentukan dari hubungan itu?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Warna LED (panjang gelombang λ)	Tegangan ambang V saat LED mulai menyala redup	Rangkaian dan resistor yang sama, cara mengamati (melalui sedotan hitam di tempat gelap), kriteria "mulai menyala" yang sama, suhu ruang

Alat dan bahan

- 5 LED 5 mm berwarna merah, oranye, kuning, hijau, dan biru (catat panjang gelombang puncak dari kemasan atau lembar data; jika tidak ada, pakai 630, 605, 590, 525, dan 470 nm)
- 3 baterai AA 1,5 V dalam tempat baterai (total 4,5 V)
- 1 potensiometer 1 k Ω (atau 10 k Ω) dan 1 resistor 220 Ω
- 1 multimeter digital (mode tegangan DC) dan kabel penjepit buaya

- Sedotan hitam atau gulungan kertas hitam ± 10 cm untuk mengintip LED, dan kotak kardus untuk menggelapkan
- Papan rangkai (project board) bila ada

⚠ Keselamatan

Jangan pernah menghubungkan LED langsung ke baterai tanpa resistor: LED bisa panas dan rusak. Jangan menghubungkan kedua kutub baterai secara langsung (korsleting) karena baterai dan kabel bisa panas. Jangan menatap LED biru yang menyala terang dari jarak dekat terlalu lama. Percobaan hanya memakai baterai, tanpa listrik PLN. Buang baterai bekas ke tempat sampah khusus.

📋 Langkah kerja

1. Susun rangkaian: hubungkan kedua kutub baterai ke kedua ujung potensiometer; kaki tengah potensiometer $\rightarrow$ resistor $220\ \Omega$ $\rightarrow$ kaki panjang (anode) LED; kaki pendek (katode) LED $\rightarrow$ kutub negatif baterai. Pasang multimeter (DC, batas 20 V) sejajar dengan LED.
2. Putar potensiometer ke posisi tegangan nol. Pasang sedotan hitam di depan LED dan gelapkan sekitar LED dengan kardus.
3. Putar potensiometer perlahan sambil mengintip melalui sedotan. Berhenti tepat saat LED mulai tampak menyala sangat redup, lalu catat tegangan LED V_1 .
4. Kembalikan ke nol dan ulangi dua kali lagi (V_2 , V_3). Pengamat sebaiknya bergantian agar kriteria "mulai menyala" lebih adil.
5. Ganti LED dan ulangi langkah 2–4 untuk kelima warna.
6. Hitung V rata-rata, $1/\lambda$ (dalam 10^6 m^{-1}), dan energi foton hc/λ dalam eV (pakai $1240/\lambda$ dengan λ dalam nm).
7. Gambar grafik V (sumbu tegak) terhadap $1/\lambda$ (sumbu mendatar), tarik garis lurus terbaik, lalu hitung kemiringannya m . Tetapan Planck: $h = me/c$.

📋 Tabel pengamatan tegangan ambang LED

Warna LED	λ (nm)	$1/\lambda$ ($\times 10^6\text{ m}^{-1}$)	V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	V rata-rata (V)	hc/λ (eV)
Merah							
Oranye							
Kuning							
Hijau							
Biru							

📊 Grafik

Grafik tegangan ambang rata-rata V (sumbu tegak) terhadap $1/\lambda$ (sumbu mendatar). Tarik satu garis lurus terbaik; garis tidak harus melalui titik asal.

Analisis

1. Urutkan LED dari tegangan ambang terkecil sampai terbesar. Bagaimana hubungannya dengan warna (panjang gelombang)? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Merah ($\pm 1,79$ V) < oranye < kuning < hijau < biru ($\pm 2,48$ V). Makin pendek panjang gelombang (makin tinggi frekuensi), makin besar tegangan ambangnya, jadi foton biru membutuhkan energi lebih besar daripada foton merah. Hipotesis " V sebanding dengan $1/\lambda$ " terbukti.

2. Hitung kemiringan grafismu, lalu tentukan $h = me/c$ ($e = 1,60 \times 10^{-19}$ C, $c = 3,00 \times 10^8$ m/s). Berapa persen selisihnya dari $6,63 \times 10^{-34}$ J s?

Kunci: Contoh: kemiringan $m \approx 1,25 \times 10^{-6}$ V m, sehingga $h = (1,25 \times 10^{-6})(1,60 \times 10^{-19})/(3,00 \times 10^8) \approx 6,6 \times 10^{-34}$ J s, selisih kurang dari 1% dari nilai sebenarnya. Hasil kelas sering berselisih 5–20%, masih wajar untuk alat sederhana.

3. Mengapa energi eV yang diterima satu elektron dari baterai dapat dipakai untuk mengukur energi satu foton hf ?

Kunci: Di sambungan p–n LED, satu elektron yang turun dari tingkat energi tinggi ke tingkat rendah melepaskan satu foton. Energi yang dibawa satu elektron dari baterai adalah eV . LED baru menyala jika eV kira-kira sama dengan energi satu foton $hf = hc/\lambda$, sehingga $V \approx (hc/e)(1/\lambda)$ dan kemiringannya hc/e . Ini kebalikan efek fotolistrik: di sini listrik menghasilkan foton.

4. Bandingkan eV ambang dengan hc/λ untuk setiap LED. Mengapa tegangan ambang sedikit lebih kecil, dan mengapa hal ini tidak banyak mengubah kemiringan grafik?

Kunci: Pada contoh data, eV ambang 0,15–0,18 eV lebih kecil daripada hc/λ . LED sudah memancarkan sedikit cahaya sebelum tegangan mencapai $hc/(e\lambda)$ karena sebagian elektron punya energi gerak termal dan tingkat energi semikonduktor tidak setajam anak tangga; mata juga baru melihat cahaya yang cukup terang. Selisih yang hampir sama untuk semua LED hanya menggeser garis ke bawah (memotong sumbu tegak di $\pm 0,18$ V), sedangkan kemiringannya hampir tidak berubah.

5. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: kriteria "mulai menyala" berbeda antarpengamat, cahaya ruangan masih masuk, panjang gelombang LED hanya perkiraan (LED memancarkan pita warna selebar ± 20 – 30 nm), potensiometer kurang halus, dan LED memanaskan. Perbaiki: amati di kotak gelap oleh pengamat yang sama atau pakai kamera HP sebagai detektor, gunakan panjang gelombang dari lembar data, putar potensiometer sangat perlahan, dan ulangi lebih banyak kali.

6. LED inframerah remote TV memancarkan foton 940 nm. Ramalkan tegangan ambangnya dari grafismu. Mengapa LED ultraviolet membutuhkan tegangan lebih besar, dan apa hubungannya dengan efek fotolistrik?

Kunci: Dari garis contoh, $1/\lambda = 1,06 \times 10^6$ m⁻¹ memberi $V \approx 1,25 \times 1,06 - 0,18 \approx 1,15$ V (energi fotonnya 1,32 eV); LED inframerah memang mulai menyala sekitar 1,1–1,3 V. LED ultraviolet memancarkan foton berenergi lebih dari 3,1 eV, sehingga setiap elektron perlu energi lebih besar dari baterai. Ini cermin efek fotolistrik: di sana satu foton memberikan energinya kepada satu elektron ($eV_0 = hf - \phi$), sedangkan di LED satu elektron memberikan energinya untuk satu foton.

Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang hubungan energi foton dengan panjang gelombang cahaya, lengkap dengan persamaannya dan nilai tetapan Planck yang kamu peroleh.

Refleksi

- Hal yang membuatku kagum adalah sebutir foton bisa "ditimbang" dengan ...
- Bagian percobaan yang paling menantang bagi kelompokku adalah ...
- Sekarang, saat melihat lampu LED warna-warni, aku teringat bahwa ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya LED dan multimeter? Pakai Lab Mini "Lab fotolistrik: warna, kecerahan, logam, dan tegangan" di Bab 28 (subbab 28.3): pilih logam sesium dan kecerahan 60%, lalu atur panjang gelombang 400, 425, 450, 500, dan 550 nm. Untuk setiap warna, geser tegangan anode ke arah negatif sampai arus tepat nol dan catat tegangan henti V_0 (atau pakai tombol  Rekam kurva I-V). Isi tabel dengan V_0 menggantikan tegangan ambang, gambar V_0 terhadap $1/\lambda$, lalu hitung h dari kemiringannya dengan cara yang sama. Titik potong grafik dengan sumbu tegak memberi $-\phi/e$.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b28-2

Contoh data (baterai 4,5 V, resistor 220 Ω , diamati melalui sedotan hitam)

Warna LED	λ (nm)	$1/\lambda$ ($\times 10^6 \text{ m}^{-1}$)	V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	V rata-rata (V)	hc/λ (eV)
Merah	630	1,587	1,78	1,78	1,80	1,79	1,97
Oranye	605	1,653	1,89	1,88	1,90	1,89	2,05
Kuning	590	1,695	1,95	1,94	1,95	1,95	2,10
Hijau	525	1,905	2,20	2,17	2,17	2,18	2,36
Biru	470	2,128	2,48	2,49	2,48	2,48	2,64

Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Rangkaian benar dengan resistor, setiap LED diukur 3 kali di tempat gelap, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Rangkaian benar, tetapi ada LED yang tidak diukur berulang.	Rangkaian perlu banyak bantuan atau kriteria pengamatan berubah-ubah.	Percobaan tidak selesai atau LED dihubungkan tanpa resistor.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap; $1/\lambda$, V rata-rata, dan hc/λ dihitung tepat dengan satuan benar.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau satuan $1/\lambda$ keliru.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik $V-1/\lambda$ rapi dengan garis terbaik, kemiringan dipakai menghitung h , dan persentase galat dibahas.	Grafik benar tetapi perhitungan h atau galatnya kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat ($E = hf = hc/\lambda$, nilai h beserta galatnya), didukung data, dan dikaitkan dengan efek fotolistrik atau LED sehari-hari.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

LED bening (epoksinya tidak berwarna) dengan lembar data memberi hasil terbaik. Agar siswa sepakat soal "mulai menyala", minta mereka memakai sedotan hitam dan memutar potensiometer sangat perlahan; versi lebih teliti memakai kamera HP sebagai detektor. LED putih tidak dipakai karena cahayanya berasal dari LED biru dan lapisan fosfor. Kaitkan hasilnya dengan efek fotolistrik (subbab 28.3) dan panel surya (subbab 28.7).

Spektroskop CD: Membaca Sidik Jari Cahaya Lampu

Bab 29 • Model Atom & Spektrum

Eksperimen kelompok + proyek mini (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XII (cocok juga untuk IGCSE/IB)

2 × 45 menit (spektroskop dapat dibuat di rumah lebih dulu)

Model: Inkuiri terbimbing (discovery learning): Amati – Ukur – Bandingkan

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat membuat spektroskop sederhana dari CD bekas dan membedakan spektrum kontinu dengan spektrum garis.
- Peserta didik dapat menghitung panjang gelombang garis spektrum dengan persamaan kisi $\lambda = d \sin \theta$.
- Peserta didik dapat mengidentifikasi unsur (merkuri dan natrium) dari panjang gelombang garis yang diukur.
- Peserta didik dapat menghubungkan setiap garis dengan lompatan elektron antartingkat energi, $E = hc/\lambda$.

Fenomena



Malam tahun baru, Raka dan Sari menonton kembang api di alun-alun. Di bawah lampu jalan natrium, baju merah Raka tampak cokelat kusam! "Kenapa lampu jalan kuning, sedangkan lampu kelas putih?" tanya Raka. Kak Nara mengeluarkan CD bekas: "Setiap unsur memancarkan warna-warna tertentu, seperti sidik jari. Astronom di Observatorium Bosscha memakai spektrograf untuk membaca sidik jari bintang. Kita bisa membuat versi sederhananya dari kardus." Tarsi sudah memegang gunting!

? Rumusan masalah

Apakah lampu-lampu di sekitar kita memancarkan spektrum kontinu atau spektrum garis, dan berapa panjang gelombang garis-garis itu?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jenis sumber cahaya (lampu TL, LED putih, lampu natrium)	Jenis spektrum, letak garis x pada skala, dan panjang gelombang λ	Spektroskop yang sama, jarak kisi-skala $D = 20,0$ cm, lebar celah, orde pertama ($m = 1$)

Alat dan bahan

- 1 keping CD-R bekas yang lapisan labelnya dikupas dengan selotip sehingga menjadi kepingan bening bergaris (jarak antargaris $d = 1,6 \mu\text{m} = 1.600 \text{ nm}$)
- 1 kotak kardus panjang ± 25 cm (misalnya kotak sepatu) dan karton hitam
- Gunting, cutter, selotip hitam, lem, dan penggaris
- Kertas milimeter selebar ± 12 cm sebagai skala
- Sumber cahaya: lampu TL atau lampu hemat energi di kelas, lampu LED putih, layar HP, dan (bila ada) lampu jalan natrium berwarna kuning
- HP berkamera untuk memotret spektrum

Keselamatan

Jangan pernah mengarahkan spektroskop ke Matahari karena cahayanya dapat merusak mata. Hati-hati memakai cutter dan memotong CD karena tepinya tajam: potong di atas alas dengan mata pisau menjauhi tangan. Amati lampu yang sudah terpasang saja; jangan membuka, menyentuh, atau melepas lampu dan fittingnya karena terhubung listrik PLN. Lampu jalan diamati bersama orang dewasa dari tempat aman, jauh dari lalu lintas.

Langkah kerja

1. Kupas lapisan label CD-R dengan selotip lebar sampai kepingannya bening. Potong sepotong $\pm 3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ dari bagian pinggir CD (garis-garisnya hampir lurus di sana).
2. Di satu ujung kotak, buat celah tegak $\pm 1 \text{ mm}$ dari dua potong karton hitam. Tempelkan kertas skala di sisi dalam ujung yang sama, mendatar di samping celah, dengan angka nol tepat di celah.
3. Di ujung lain, tepat berhadapan dengan celah, buat lubang intip dan tempelkan potongan CD sehingga garis-garisnya sejajar celah. Ukur jarak CD ke dinding skala: $D = 20,0 \text{ cm}$.
4. Arahkan celah ke lampu LED putih, lalu ke lampu TL. Saat mengintip, kamu melihat celah terang di tengah dan pelangi (orde pertama) di sampingnya, tepat di atas skala. Gambar dan potret keduanya: mana yang kontinu, mana yang bergaris?
5. Pada lampu TL, baca letak x setiap garis terang (biru-ungu, hijau, kuning, oranye-merah) pada skala, diukur dari celah. Ulangi pada lampu jalan natrium atau lampu kuning lain bila ada.
6. Hitung $\tan \theta = x/D$, sudut θ , lalu $\lambda = d \sin \theta$ dengan $d = 1.600 \text{ nm}$. Hitung juga energi foton $E = 1240/\lambda$ (eV, dengan λ dalam nm).
7. Bandingkan dengan panjang gelombang acuan: merkuri 436, 546, dan 578 nm; fosfor merah lampu TL $\pm 611 \text{ nm}$; natrium 589 nm. Hitung selisihnya dalam persen.

Tabel pengamatan ($d = 1.600 \text{ nm}$, $D = 20,0 \text{ cm}$)

Sumber & warna garis	x (cm)	$\tan \theta =$ x/D	θ ($^\circ$)	$\lambda = d \sin \theta$ (nm)	λ acuan (nm)	Selisih (%)	$E = 1240/\lambda$ (eV)
TL: biru-ungu							
TL: hijau							
TL: kuning							
TL: oranye-merah							
Lampu natrium: kuning							

Grafik

Gambar sketsa spektrum setiap lampu berjajar pada satu skala panjang gelombang 400–700 nm: pita bersambung untuk spektrum kontinu dan garis-garis tegak untuk spektrum garis.

Analisis

1. Lampu mana yang memberi spektrum kontinu dan mana yang memberi spektrum garis? Apakah dugaanmu benar?

Kunci: LED putih dan layar HP memberi pita warna yang bersambung (LED putih memakai fosfor yang memancarkan pita lebar), jadi mendekati spektrum kontinu. Lampu TL memberi beberapa garis terang terpisah di atas pita redup, dan lampu natrium memberi hampir hanya satu garis kuning-oranye: spektrum garis (emisi).

2. Bandingkan panjang gelombang hasil ukurmu dengan nilai acuan. Unsur apa yang ada di dalam lampu TL dan lampu jalan kuning?

Kunci: Contoh: 439, 542, 575, dan 613 nm (selisih kurang dari 1%) cocok dengan garis merkuri 436, 546, dan 578 nm serta fosfor merah ± 611 nm. Garis 588 nm cocok dengan natrium (589 nm). Jadi lampu TL berisi uap merkuri, sedangkan lampu jalan kuning berisi uap natrium.

3. Hitung energi foton setiap garis. Mengapa atom merkuri hanya memancarkan beberapa warna tertentu, bukan pelangi utuh? Jelaskan dengan model tingkat energi Bohr.

Kunci: Contoh: 2,82; 2,29; 2,16; dan 2,02 eV (TL) serta 2,11 eV (natrium). Elektron dalam atom hanya boleh berada di tingkat energi tertentu. Saat turun dari tingkat atas ke tingkat bawah, atom memancarkan foton yang energinya tepat sama dengan selisih kedua tingkat, $hf = E_{\text{atas}} - E_{\text{bawah}}$. Karena selisihnya hanya beberapa nilai tertentu, warnanya pun tertentu: garis-garis terpisah, bukan pelangi.

4. Garis kuning natrium 589 nm berasal dari lompatan elektron natrium ke keadaan dasar. Berapa selisih energi kedua tingkat itu? Mengapa baju merah tampak cokelat kusam di bawah lampu natrium?

Kunci: $\Delta E = 1240/589 \approx 2,11$ eV. Lampu natrium hampir hanya memancarkan cahaya 589 nm. Baju merah hanya memantulkan cahaya merah dengan baik, padahal hampir tidak ada cahaya merah yang datang, sehingga baju itu hanya memantulkan sedikit cahaya kuning dan tampak gelap kecokelatan.

5. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan satu cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: garis tampak lebar karena celah terlalu lebar, skala tidak tepat di samping celah, D tidak diukur teliti, potongan CD miring sehingga garis kisinya tidak sejajar celah, dan nilai d CD sedikit berbeda. Perbaiki: persempit celah, potret spektrum lalu ukur pada foto, ukur D dengan teliti, dan kalibrasi dulu dengan garis hijau merkuri 546 nm.

6. Bagaimana astronom di Observatorium Bosscha dapat mengetahui unsur penyusun bintang tanpa pergi ke sana? Apa perbedaan spektrum bintang dengan spektrum lampu TL?

Kunci: Cahaya bintang diuraikan dengan spektrograf. Spektrum bintang berupa pelangi dengan garis-garis gelap (spektrum serapan), karena atom di atmosfer bintang yang lebih dingin menyerap warna-warna tertentu. Letak garis gelap dicocokkan dengan garis terang unsur di laboratorium, seperti garis merkuri dan natrium yang kamu ukur, sehingga unsur penyusun bintang diketahui. Lampu TL memberi garis terang (emisi) di atas latar gelap.

Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang perbedaan spektrum kontinu dan spektrum garis, unsur yang kamu kenali dari garis-garisnya, dan hubungan setiap garis dengan tingkat energi atom.

Refleksi

- Saat pertama kali melihat garis-garis warna dari lampu kelas, aku merasa ...
- Hal yang belum kupahami tentang tingkat energi atom adalah ...
- Lampu lain di rumah atau di jalan yang ingin kuamati dengan spektroskopku adalah ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak bisa membuat spektroskop? Pakai Lab Mini "Detektif spektrum: unsur apa di bintang itu?" di Bab 29 (subbab 29.5): pilih sumber "Lampu gas (spektrum emisi)", centang Merkuri dan Natrium, lalu arahkan penunjuk ke setiap garis terang untuk membaca panjang gelombangnya. Isi kolom λ dan E pada tabel, lalu pecahkan beberapa misteri lampu. Untuk menghubungkan garis dengan tingkat energi, buka Lab Mini "Tangga energi Bohr: lompat, pancarkan, kumpulkan garis" (subbab 29.3) dan kumpulkan keempat garis Balmer hidrogen.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b29-5

Contoh data (CD-R, $d = 1.600 \text{ nm}$, $D = 20,0 \text{ cm}$)

Sumber & warna garis	x (cm)	$\tan \theta = x/D$	θ (°)	$\lambda = d \sin \theta$ (nm)	λ acuan (nm)	Setisih (%)	$E = 1240/\lambda$ (eV)
TL: biru-ungu	5,7	0,285	15,9	439	436	0,7	2,82
TL: hijau	7,2	0,360	19,8	542	546	-0,7	2,29
TL: kuning	7,7	0,385	21,1	575	578	-0,5	2,16
TL: oranye-merah	8,3	0,415	22,5	613	611	0,3	2,02
Lampu natrium: kuning	7,9	0,395	21,6	588	589	-0,2	2,11

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Spektroskop rapi (celah sempit, CD sejajar celah, skala tepat), semua lampu diamati, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Spektroskop berfungsi, tetapi ada satu sumber cahaya yang tidak diamati atau dibaca kurang teliti.	Spektroskop kurang tepat sehingga garis sulit dibaca.	Spektroskop tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap; θ , λ , selisih persen, dan E dihitung tepat dengan satuan benar.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa data hilang atau rumus $\lambda = d \sin \theta$ salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Sketsa spektrum rapi pada skala yang sama, unsur dikenali dengan benar, dan setiap garis dijelaskan dengan tingkat energi.	Sketsa benar, tetapi penjelasan tingkat energinya kurang lengkap.	Sketsa tidak berskala atau unsur salah dikenali.	Sketsa dan analisis tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (kontinu vs garis, unsur yang dikenali, garis = selisih tingkat energi), didukung data, dan dikaitkan dengan astronomi atau lampu sehari-hari.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

CD-R lebih mudah dikupas daripada CD pabrikan; DVD ($d = 740 \text{ nm}$) juga bisa, tetapi sudutnya jauh lebih besar sehingga skala harus lebih lebar. Banyak ruang kelas kini memakai lampu LED putih yang tidak bergaris, jadi siapkan satu lampu TL atau lampu hemat energi. Jika lampu jalan natrium tidak ada, guru dapat menaburkan sejumput garam dapur ke nyala kompor gas untuk menunjukkan garis kuning natrium (jauh dari bahan mudah terbakar dan dengan pengawasan). Hubungkan hasilnya dengan deret Balmer di subbab 29.4.

Physicspedia · LKPD Bab 29 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Hujan Muon dari Dadu: Membuktikan Dilatasi Waktu dengan Permainan Peluang

Bab 30 • Relativitas Khusus

Simulasi hands-on dengan model analogi + analisis data (inkuiri terbimbing)

SMA kelas XII (pengayaan IB DP dan olimpiade)

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing berbasis model: Prediksi – Simulasi – Bandingkan

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat memodelkan peluruhan acak muon dengan lemparan dadu.
- Peserta didik dapat membandingkan jumlah muon yang sampai ke tanah menurut fisika Newton dan menurut relativitas khusus ($\Delta t = \gamma \Delta t_0$).
- Peserta didik dapat menafsirkan grafik $\ln N$ terhadap jumlah lemparan sebagai peluruhan eksponensial dan menghitung umur paruhnya.
- Peserta didik dapat menjelaskan sampainya muon di permukaan laut sebagai bukti nyata dilatasi waktu dan kontraksi panjang.

Fenomena



Di sebuah pameran sains, Sari melihat detektor partikel kosmik yang berbunyi "tik" setiap kali ada partikel lewat. "Itu muon," kata Kak Nara, "lahir sekitar 15 km di atas kita dan hanya hidup rata-rata 2,2 mikrodetik." Raka menghitung cepat: "Secepat cahaya pun, dalam 2,2 μ s cuma menempuh 660 m. Mustahil sampai ke sini!" Namun detektor terus berbunyi. Kak Nara membagikan segenggam dadu: "Setiap dadu adalah satu muon. Mata 1 berarti muon itu meluruh. Ayo kita uji siapa yang benar: Newton atau Einstein?" Tarsi siap mencatat yang meluruh dan yang selamat.

? Rumusan masalah

Berapa banyak muon yang sampai ke permukaan laut jika jam muon berjalan normal (fisika Newton), dibandingkan jika jam muon melambat sesuai dilatasi waktu (relativitas khusus)?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Aturan waktu: Newton (16 lemparan setiap turun 2 km) atau Einstein (1 lemparan setiap turun 2 km)	Jumlah dadu-muon yang tersisa N di setiap ketinggian	Jumlah dadu awal (60), aturan meluruh (mata 1), cara melempar, ketinggian lahir 16 km, kecepatan muon 0,998c

Alat dan bahan

- 60 dadu kecil per kelompok (jika kurang, pakai 30 dadu dan gabungkan hasil dua kelompok)
- 1 nampan plastik atau kotak kardus tanpa tutup sebagai tempat melempar dadu
- 1 lembar karton panjang bergaris setiap 2 km dari 16 km sampai 0 km sebagai "atmosfer"
- Kalkulator atau aplikasi lembar kerja (spreadsheet) di HP
- Kertas grafik dan spidol dua warna

Keselamatan

Lempar dadu di dalam nampan atau kotak agar tidak memantul ke wajah teman atau berserakan di lantai yang bisa membuat orang terpeleset. Jangan memasukkan dadu kecil ke mulut, dan hitung kembali semua dadu sebelum disimpan.

Langkah kerja

1. Pahami aturan model: satu lemparan dadu mewakili $0,4 \mu\text{s}$ waktu yang dialami muon (waktu diri). Dengan peluang meluruh $1/6$ setiap lemparan, umur rata-rata dadu-muon $0,4/(-\ln \frac{5}{6}) \approx 2,2 \mu\text{s}$, sama dengan muon sungguhan.
2. Muon melaju $0,998c$, jadi menempuh 2 km dalam $\pm 6,7 \mu\text{s}$ menurut jam Bumi. Aturan Newton: jam muon sama dengan jam Bumi, sehingga setiap turun 2 km dadu dilempar 16 kali. Aturan Einstein: $\gamma \approx 15,8$, jam muon melambat, sehingga setiap turun 2 km dadu hanya dilempar 1 kali.
3. Tulis prediksi (hipotesis) kelompokmu: berapa dari 60 muon yang sampai ke tanah menurut masing-masing aturan?
4. Aturan Einstein: letakkan 60 dadu di garis 16 km . Lempar semua dadu sekali, keluarkan dadu bermata 1 (meluruh), lalu geser sisanya ke garis 14 km dan catat N . Ulangi sampai garis 0 km (8 lemparan).
5. Aturan Newton: mulai lagi dengan 60 dadu di garis 16 km . Lempar 16 kali (setiap kali keluarkan mata 1) sebelum menggeser sisanya ke garis 14 km , dan seterusnya. Berhenti jika dadu habis.
6. Hitung $N_{\text{teori}} = 60 (5/6)^k$ untuk aturan Einstein, dengan k jumlah lemparan sejak lahir. Gabungkan data seluruh kelas agar hasilnya lebih halus.
7. Gambar grafik N terhadap ketinggian untuk kedua aturan pada satu kertas, lalu grafik $\ln N$ terhadap k untuk aturan Einstein.

Tabel pengamatan (60 dadu-muon lahir pada ketinggian 16 km)

Ketinggian (km)	Lemparan Einstein, k	N Einstein	N teori = $60(5/6)^k$	Lemparan Newton	N Newton
16					
14					
12					
10					
8					
6					
4					
2					
0					

Grafik

Grafik N (sumbu tegak) terhadap ketinggian (sumbu mendatar, dari 16 km ke 0 km) untuk aturan Newton dan aturan Einstein dengan dua warna. Grafik kedua: $\ln N$ terhadap k untuk aturan Einstein, lengkap dengan garis lurus terbaik.

Analisis

1. Berapa dadu-muon yang sampai ke tanah menurut aturan Newton dan menurut aturan Einstein? Aturan mana yang cocok dengan kenyataan bahwa detektor di permukaan laut menangkap banyak muon? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Contoh data: aturan Newton 0 dari 60 (dadu sudah habis sebelum garis 12 km), aturan Einstein 15 dari 60 (25%). Kenyataannya banyak muon terdeteksi di permukaan laut, jadi hanya aturan Einstein (jam muon melambat γ kali) yang cocok. Hipotesis "dengan dilatasi waktu banyak muon selamat" terbukti.

2. Bandingkan N Einstein hasil lemparan dengan N_{teori} . Mengapa hasilnya tidak tepat sama, dan bagaimana cara membuatnya lebih dekat?

Kunci: Contoh: $N = 52; 38; 35; \dots$ dibandingkan teori $50,0; 41,7; 34,7; \dots$. Peluruhan bersifat acak, sehingga hasil satu kelompok berfluktuasi sekitar $\pm\sqrt{N}$. Menggabungkan data seluruh kelas (lebih banyak dadu) atau mengulang percobaan membuat hasilnya mendekati $60(5/6)^k$.

3. Grafik $\ln N$ terhadap k berbentuk apa? Hitung kemiringannya, bandingkan dengan $\ln(5/6) = -0,182$, lalu tentukan umur paruh dalam lemparan dan dalam kilometer.

Kunci: Garis lurus menurun, jadi $N = N_0 e^{-\lambda k}$ (eksponensial). Contoh kemiringan $\pm 0,16$ (teori $-0,182$). Umur paruh teori $k_{1/2} = \ln 2 / 0,182 \approx 3,8$ lemparan, atau $\pm 7,6$ km menurut aturan Einstein (muon sungguhan: $0,693 \times 10,4 \text{ km} \approx 7,2 \text{ km}$).

4. Jelaskan dari mana angka 16 lemparan (Newton) dan 1 lemparan (Einstein) setiap 2 km berasal. Gunakan $v = 0,998c$, $\tau_0 = 2,2 \mu\text{s}$, dan $\gamma = 15,8$.

Kunci: Menempuh 2 km dengan $v = 0,998c$ memerlukan $t = 2000 / (0,998 \times 3,0 \times 10^8) \approx 6,7 \mu\text{s}$ menurut jam Bumi. Dengan jam normal, itu $6,7 / 0,4 \approx 16$ lemparan. Dengan dilatasi waktu, jam muon hanya maju $6,7 / 15,8 \approx 0,42 \mu\text{s} \approx 1$ lemparan. Satu lemparan bernilai $0,4 \mu\text{s}$ karena peluang meluruh $1/6$ per lemparan memberi umur rata-rata $0,4 / (-\ln \frac{5}{6}) \approx 2,2 \mu\text{s}$.

5. Menurut muon sendiri, jamnya berdetak normal. Bagaimana muon "menjelaskan" bahwa ia bisa sampai ke tanah? Hitung tebal atmosfer 16 km menurut muon.

Kunci: Menurut muon, atmosfer yang bergerak ke arahnya menyusut (kontraksi panjang) menjadi $16 / 15,8 \approx 1,0 \text{ km}$. Jarak itu ditempuh dalam $\pm 3,4 \mu\text{s}$ waktu diri (sekitar 8 lemparan), sama dengan aturan Einstein. Kedua kerangka acuan meramalkan jumlah muon selamat yang sama.

6. Sebutkan dua kelemahan model dadu ini dibandingkan muon sungguhan, dan satu bukti lain dilatasi waktu dalam kehidupan sehari-hari.

Kunci: Contoh kelemahan: waktu dipotong-potong per lemparan, padahal peluruhan bisa terjadi kapan saja; semua muon dianggap lahir pada ketinggian dan kecepatan yang sama; muon sungguhan kehilangan energi di udara dan datang dari berbagai arah; jumlah dadu kecil sehingga fluktuasinya besar. Bukti lain: jam satelit GPS yang harus dikoreksi $\pm 38 \mu\text{s}$ per hari, jam atom yang diterbangkan dengan pesawat (1971), dan umur partikel di akselerator.

Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang pengaruh dilatasi waktu terhadap jumlah muon yang sampai ke tanah, lengkap dengan persamaan $\Delta t = \gamma \Delta t_0$, dan jelaskan mengapa data ini menjadi bukti relativitas khusus.

Refleksi

- Hal yang paling membuatku takjub dari permainan dadu ini adalah ...
- Bagian relativitas yang masih terasa aneh bagiku adalah ...
- Aku bisa menjelaskan dilatasi waktu kepada adik atau temanku dengan cara ...

Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya dadu? Pakai Lab Mini "Hujan muon: siapa yang sampai ke tanah?" di Bab 30 (subbab 30.7): atur kecepatan muon 0,998c, lalu ubah "ketinggian lahir" menjadi 6, 8, 10, 12, 14, dan 16 km (sama dengan jarak yang sudah ditempuh muon saat tiba di ketinggian 10, 8, 6, 4, 2, dan 0 km pada tabel). Untuk setiap jarak, jalankan dengan dan tanpa "dilatasi waktu", catat persentase "Ramalan sampai tanah" dan "Hasil simulasi", lalu hitung $N = 60 \times \text{persentase}$. Isi tabel dan analisis grafiknya dengan cara yang sama.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b30-7

Contoh data satu kelompok (60 dadu)

Ketinggian (km)	Lemparan Einstein, k	N Einstein	N teori = $60(5/6)^k$	Lemparan Newton	N Newton
16	0	60	60,0	0	60
14	1	52	50,0	16	4
12	2	38	41,7	32	0
10	3	35	34,7	– (habis)	0
8	4	30	28,9	– (habis)	0
6	5	27	24,1	– (habis)	0
4	6	23	20,1	– (habis)	0
2	7	20	16,7	– (habis)	0
0	8	15	14,0	– (habis)	0

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Aturan Newton dan Einstein dijalankan tepat (16 dan 1 lemparan per 2 km), dadu dihitung teliti, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Aturan dijalankan benar, tetapi ada beberapa hitungan dadu yang terlewat.	Aturan lemparan tertukar atau tidak konsisten.	Simulasi tidak selesai atau dadu berserakan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap; N_{teori} dan $\ln N$ dihitung tepat.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa baris kosong atau perhitungan teori salah.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Kedua grafik rapi; kemiringan $\ln N-k$ dihitung dan dibandingkan dengan $\ln(5/6)$; umur paruh ditentukan dan dikaitkan dengan muon sungguhan.	Grafik benar tetapi analisis kemiringan atau umur paruh kurang lengkap.	Grafik salah skala atau tanpa garis terbaik.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (hanya dilatasi waktu, $\Delta t = \gamma \Delta t_0$, yang cocok dengan banyaknya muon di tanah), didukung data, dan menyebut sudut pandang muon (kontraksi panjang).	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Dadu dapat dibeli murah dalam satu bungkus isi 100, atau dibuat dari kubus kertas. Bagi peran: satu siswa melempar, satu menghitung, satu mencatat. Data gabungan kelas (misalnya 6 kelompok × 60 = 360 muon) memperlihatkan kurva eksponensial dengan sangat jelas. Tegaskan bahwa dadu hanya model peluang; fisika relativitasnya ada pada aturan berapa kali dadu dilempar setiap turun 2 km. Lanjutkan dengan Lab Mini "Hujan muon" untuk membandingkan model dengan hitungan eksak.

Seratus Dadu, Satu Jam Alam: Mencari Waktu Paruh tanpa Bahan Radioaktif

Bab 31 • Inti Atom & Radioaktivitas

Eksperimen kelompok: model peluruhan dengan dadu (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 9 dan SMA kelas XII (grafik $\ln N$ untuk SMA)

2 × 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Amati – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat memodelkan peluruhan radioaktif yang acak dengan 100 dadu dan mencatat jumlah "inti" yang tersisa setiap lemparan.
- Peserta didik dapat menentukan waktu paruh dari grafik jumlah sisa N terhadap jumlah lemparan k .
- Peserta didik dapat menafsirkan kemiringan grafik $\ln N - k$ sebagai konstanta peluruhan λ dan membandingkannya dengan peluang meluruh tiap lemparan.
- Peserta didik dapat menjelaskan mengapa peluruhan satu inti tidak dapat diramal, tetapi peluruhan banyak inti sangat teratur.

Fenomena



Di Museum Sangiran, Raka bingung: "Kak Nara bilang setiap inti meluruh secara acak, tidak ada yang tahu kapan. Kok bisa dipakai sebagai jam yang sangat teliti?" Sari menyahut, "Seperti melempar dadu, ya? Satu dadu tidak bisa ditebak, tapi kalau dadunya seratus...?" Kak Nara tersenyum dan menumpahkan sekantong dadu ke meja. "Anggap setiap dadu satu inti. Kalau keluar mata 6, inti itu meluruh. Ayo kita lihat apakah ada iramanya!" Tarsi sudah menandai satu dadu sebagai "dadu Tarsi". Kapan ya dadu itu meluruh?

Rumusan masalah

Bagaimana jumlah dadu ("inti") yang belum meluruh berubah terhadap jumlah lemparan, dan berapa waktu paruhnya jika peluang meluruh tiap lemparan $1/6$?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jumlah lemparan k (berperan sebagai waktu)	Jumlah dadu yang belum meluruh N	Jumlah dadu awal (100), aturan meluruh (mata 6), cara mengocok dan menuang yang sama

Alat dan bahan

- 100 dadu kecil bermata 1–6 (boleh dikumpulkan dari beberapa kelompok atau dari set permainan ular tangga)
- 1 kotak kardus tertutup atau gelas plastik besar untuk mengocok, dan 1 nampan/tampah berpinggir untuk menuang dadu
- 1 spidol kecil untuk menandai satu dadu

- 2 wadah kecil (mangkuk plastik) untuk dadu "meluruh" dan dadu "belum meluruh"
- Kertas milimeter (atau kertas berpetak), penggaris, dan kalkulator HP (untuk $\ln N$)

⚠ Keselamatan

Percobaan ini **tidak memakai bahan radioaktif sama sekali**: dadu hanyalah model. Tuang dadu ke dalam nampan berpinggir agar tidak terpental ke lantai dan membuat orang terpeleset. Jangan memasukkan dadu ke mulut (penting bila ada adik kecil di sekitar). Hitung kembali dadu di akhir kegiatan dan cuci tangan.

📋 Langkah kerja

1. Hitung dadu sampai tepat 100 buah. Tandai satu dadu dengan titik spidol: inilah "dadu Tarsi". Tulis hipotesis kelompokmu: setelah berapa lemparan kira-kira dadu tinggal separuh?
2. Masukkan semua dadu ke kotak, tutup, kocok, lalu tuang ke nampan. Ini lemparan ke-1 ($k = 1$).
3. Ambil semua dadu yang menunjukkan mata 6 dan masukkan ke mangkuk "meluruh". Hitung dadu yang tersisa, lalu catat sebagai N di tabel. Jika dadu Tarsi meluruh, catat nomor lemparannya.
4. Kembalikan hanya dadu yang tersisa ke kotak, kocok, dan tuang lagi ($k = 2$). Ulangi langkah 3–4 sampai $k = 10$.
5. Ulangi seluruh percobaan (langkah 2–4) sampai 3 kali, dimulai lagi dari 100 dadu. Jika waktunya sempit, gabungkan data dari 3 kelompok.
6. Hitung N rata-rata, nilai teori $N = 100 \times (5/6)^k$, dan $\ln N$ rata-rata (tombol $\ln$ pada kalkulator HP) untuk setiap k .
7. Gambar grafik N rata-rata terhadap k bersama kurva teorinya. Untuk SMA, gambar juga grafik $\ln N$ terhadap k dan tarik garis lurus terbaik.
8. Tentukan waktu paruh: berapa lemparan sampai N turun dari 100 ke 50, dan dari 50 ke 25?

📋 Tabel pengamatan (100 dadu, meluruh jika keluar mata 6)

Lemparan ke- (k)	Sisa N , percobaan 1	Sisa N , percobaan 2	Sisa N , percobaan 3	N rata- rata	N teori = $100 \times$ $(5/6)^k$	$\ln N$ rata- rata
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Grafik

Grafik 1: N rata-rata (sumbu tegak) terhadap k (sumbu mendatar). Gambar titik datamu dan kurva teori dengan warna berbeda. Grafik 2 (SMA): $\ln N$ terhadap k ; tarik satu garis lurus terbaik dan hitung kemiringannya.

Analisis

1. Bagaimana bentuk grafik $N-k$? Apakah berupa garis lurus menurun seperti lilin yang memendek? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti?

Kunci: Grafik berupa kurva yang menurun makin landai (eksponensial), bukan garis lurus. Pada lemparan awal banyak dadu yang meluruh (± 15 dadu), sedangkan di akhir hanya 3–4 dadu, karena yang meluruh selalu sebagian ($\pm 1/6$) dari dadu yang tersisa. Hipotesis "sisa berkurang separuh setiap selang yang sama" terbukti.

2. Dari grafik, tentukan waktu paruh dadu (dalam lemparan) untuk penurunan $100 \rightarrow 50$ dan $50 \rightarrow 25$. Apakah keduanya kira-kira sama? Bandingkan dengan nilai teori $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{-\ln(5/6)} \approx 3,8$ lemparan.

Kunci: Contoh data: N rata-rata tepat 50 pada $k = 4$, lalu 25 pada $k \approx 7,9$ (antara 30,7 dan 24,7). Jadi waktu paruh ± 4 lemparan untuk kedua penurunan, kira-kira sama, dan dekat dengan teori 3,8 lemparan. Selisih kecil wajar karena peluruhan bersifat acak.

3. (SMA) Hitung kemiringan grafik $\ln N-k$. Besaran apa yang ditunjukkannya? Bandingkan dengan $-\ln(5/6) \approx 0,18$ dan dengan peluang $p = 1/6 \approx 0,17$.

Kunci: Kemiringan contoh data $\approx -0,17$ per lemparan, sehingga $\lambda \approx 0,17$ dan $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 4,0$ lemparan. Teori: $\lambda = -\ln(5/6) = 0,182$, sangat dekat dengan peluang $p = 1/6 = 0,167$. Untuk peluang kecil, $\lambda \approx p$: konstanta peluruhan adalah peluang meluruh per satuan waktu.

4. Mengapa jumlah sisa pada percobaan 1, 2, dan 3 berbeda-beda, sedangkan rata-ratanya lebih dekat ke teori? Apa yang akan terjadi pada kemulusan grafik jika kamu memakai 10 dadu, atau 10.000 dadu?

Kunci: Setiap lemparan acak, jadi jumlah dadu yang keluar 6 berfluktuasi. Fluktuasi relatifnya kira-kira $1/\sqrt{N}$: untuk 100 dadu $\pm 10\%$, untuk 10.000 dadu hanya $\pm 1\%$. Merata-ratakan tiga percobaan sama dengan memakai 300 dadu, sehingga lebih dekat ke teori. Dengan 10 dadu grafiknya sangat bergerigi, sedangkan dengan 10.000 dadu hampir semulus kurva teori. Sampel radioaktif sungguhan berisi sekitar 10^{20} inti, jadi kurvanya mulus sempurna.

5. Pada lemparan ke berapa dadu Tarsi meluruh? Bandingkan dengan kelompok lain. Apakah kamu bisa meramalkan kapan sebuah dadu tertentu akan meluruh? Apa artinya bagi satu inti radioaktif?

Kunci: Jawaban bergantung pada percobaan (bisa lemparan ke-1, bisa juga belum meluruh setelah 10 lemparan). Tidak ada yang bisa meramal kapan dadu tertentu meluruh; yang bisa diketahui hanya peluangnya ($1/6$ per lemparan). Begitu pula satu inti radioaktif: waktu peluruhannya acak, tetapi banyak inti bersama-sama mengikuti waktu paruh yang tetap.

6. Seandainya setiap "inti" adalah koin (meluruh jika keluar gambar, peluang $1/2$) atau dadu 20 sisi (peluang $1/20$), bagaimana waktu paruhnya? Jelaskan dengan konstanta peluruhan.

Kunci: Koin: $\lambda = -\ln(1/2) = 0,69$, sehingga $T_{1/2} = 1$ lemparan (setiap lemparan sisanya separuh). Dadu 20 sisi: $\lambda = -\ln(19/20) \approx 0,051$, sehingga $T_{1/2} \approx 13,5$ lemparan. Makin besar peluang meluruh, makin besar λ dan makin pendek waktu paruhnya: $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$.

7. Waktu paruh karbon-14 adalah 5.730 tahun. Gunakan pemahaman dari percobaan ini untuk menjelaskan mengapa karbon-14 tidak dapat dipakai untuk menanggal fosil Sangiran yang berumur lebih dari satu juta tahun.

Kunci: Satu juta tahun sama dengan ± 175 waktu paruh karbon-14, sehingga yang tersisa $(1/2)^{175} \approx 10^{-53}$ bagian: praktis nol, seperti dadu yang sudah habis setelah ratusan lemparan. Batas praktis penanggalan karbon ± 50.000 tahun (± 10 waktu paruh). Untuk Sangiran dipakai isotop berwaktu paruh sangat panjang, misalnya kalium-40 $\rightarrow$ argon-40 ($\pm 1,25$ miliar tahun), pada lapisan abu vulkanik.

8. Sebutkan dua sumber galat dalam percobaanmu dan dua perbedaan antara model dadu dan peluruhan inti sungguhan.

Kunci: Galat: salah menghitung dadu, dadu terpentil atau miring sehingga matanya ragu-ragu, dadu tidak seimbang sempurna, dan jumlah dadu sedikit sehingga fluktuasinya besar. Perbedaan model: inti meluruh kapan saja (waktu mengalir terus), bukan serentak per lemparan; jumlah inti nyata jauh lebih banyak ($\sim 10^{20}$); dan peluruhan inti mengubah inti menjadi unsur lain sambil memancarkan radiasi, sedangkan dadu tidak berubah apa pun.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu tentang pola peluruhan banyak inti dalam satu atau dua kalimat, lengkap dengan persamaan $N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$ dan nilai waktu paruh dadu yang kamu peroleh.

💡 Refleksi

- Saat menunggu dadu Tarsi meluruh, aku merasa ...
- Hal yang masih membingungkanku tentang sifat acak dan waktu paruh adalah ...
- Satu manfaat waktu paruh dalam kehidupan nyata (misalnya di rumah sakit atau di museum) yang ingin kuceritakan kepada keluargaku adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya 100 dadu? Pakai Lab Mini "**Peluruhan dadu: ribuan inti, satu kurva**" di Bab 31 (subbab 31.4). Pilih *Alat undian tiap inti* = "Dadu: meluruh jika keluar 6 (1/6)" dan *Jumlah inti awal* = 100 inti. Klik satu kotak untuk menandai "dadu Tarsi", lalu tekan 🎲 **Lempar sekali** berulang kali dan catat angka *Inti induk tersisa* setiap lemparan sampai lemparan ke-10. Tekan ↺ **Ulang** untuk percobaan 2 dan 3. Untuk pertanyaan 4 dan 6, coba juga 1.600 inti, koin, dan dadu 20 sisi.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b31-4

Contoh data (3 percobaan, masing-masing 100 dadu)

Lemparan ke- (k)	Sisa N, percobaan 1	Sisa N, percobaan 2	Sisa N, percobaan 3	N rata- rata	N teori = $100 \times (5/6)^k$	ln N rata- rata
0	100	100	100	100,0	100,0	4,61
1	87	93	82	87,3	83,3	4,47
2	70	71	67	69,3	69,4	4,24
3	62	58	62	60,7	57,9	4,11
4	50	48	52	50,0	48,2	3,91
5	39	43	43	41,7	40,2	3,73
6	32	40	38	36,7	33,5	3,60
7	28	34	30	30,7	27,9	3,42
8	21	30	23	24,7	23,3	3,21
9	20	27	17	21,3	19,4	3,06
10	17	21	14	17,3	16,2	2,85

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan percobaan & keselamatan	Semua langkah runtut, dadu dihitung teliti setiap lemparan, percobaan diulang 3 kali, dan nampan dipakai sehingga tidak ada dadu yang tercecer.	Langkah benar, tetapi hanya 2 kali pengulangan atau ada beberapa hitungan yang kurang teliti.	Aturan meluruh atau jumlah awal tidak dijaga sama, atau beberapa langkah terlewat.	Percobaan tidak selesai atau dadu berserakan dan tidak dirapikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap; N rata-rata, N teori, dan $\ln N$ dihitung tepat untuk semua lemparan.	Tabel lengkap dengan satu atau dua kesalahan hitung kecil.	Beberapa kolom kosong atau rumus $100 \times (5/6)^k$ salah dipakai.	Data tidak lengkap dan perhitungan tidak dilakukan.
Grafik & analisis	Grafik $N-k$ dan $\ln N-k$ rapi (sumbu, skala, label), waktu paruh dibaca dari grafik, dan kemiringan ditafsirkan sebagai λ .	Grafik benar tetapi penafsiran waktu paruh atau kemiringan kurang lengkap.	Grafik salah skala atau waktu paruh tidak ditentukan.	Grafik tidak dibuat.
Kesimpulan & komunikasi	Kesimpulan tepat (sisa berkurang separuh setiap waktu paruh; peluruhan acak tetapi teratur secara statistik), didukung data, dan dikaitkan dengan penanggalan radiometrik.	Kesimpulan tepat tetapi kurang didukung data.	Kesimpulan sebagian tepat, misalnya masih menganggap peluruhan berkurang dengan laju tetap.	Kesimpulan tidak sesuai data atau tidak ditulis.

Nilai akhir = (jumlah skor $\div$ 16) $\times$ 100.

Catatan guru

Satu putaran 10 lemparan dengan 100 dadu memakan ± 8 menit. Bila dadu terbatas, satu kelas cukup memakai 3–4 set yang digilir, atau ganti dengan 100 koin (peluang $1/2$, waktu paruh 1 lemparan; cukup 6–7 lemparan). Kubus kardus kecil yang satu sisinya diberi titik juga bisa dipakai. Tekankan sejak awal bahwa kegiatan ini hanya model dan sama sekali tidak berbahaya. Kumpulkan data semua kelompok di papan tulis: grafik gabungan satu kelas akan tampak jauh lebih mulus. Ini pintu masuk yang bagus untuk membahas statistik dan ketidakpastian.

Physicspedia • LKPD Bab 31 • © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD • Editor: Abdullah Hanif Hidayat • Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Gerbang Logika dari Saklar dan LED: Merakit "Otak" Lampu Taman

Bab 32 · Elektronika & Gerbang Logika

Eksperimen kelompok: merakit rangkaian (inkuiri terbimbing + rekayasa)

SMP kelas 9 dan SMA kelas XII (perhitungan arus untuk SMA)

2 x 45 menit

Model: Inkuiri terbimbing: Tebak – Rakit – Uji – Jelaskan (POE)

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat merakit rangkaian dua saklar dan LED dengan baterai 3 V secara aman.
- Peserta didik dapat menyusun tabel kebenaran dari hasil pengujian dan menamai gerbang logika yang terbentuk (AND, OR, NAND, NOR).
- Peserta didik dapat menghitung arus LED dari tegangan resistor memakai $I = V_R/R$ dan menjelaskan fungsi resistor pelindung.
- Peserta didik dapat merancang rangkaian saklar untuk sistem otomatis sederhana, misalnya penyiram tanaman pintar $P = K \cdot \overline{H}$.

Fenomena



Setelah melihat lampu taman yang menyala sendiri, Raka penasaran: "Gerbang logika di dalam cip itu kecil sekali. Bisa nggak kita bikin sendiri?" Sari sudah menyiapkan dua baterai, sebuah LED merah, dan dua saklar tekan. Kak Nara memberi petunjuk: "Komputer pertama di dunia berpikir dengan saklar dan relai. Cip HP-mu memakai transistor, tetapi idenya sama: saklar yang disusun dengan cerdas. Coba susun dua saklar dengan empat cara, lalu cari tahu gerbang apa yang kalian buat!" Tarsi siap mencatat setiap 0 dan 1.

? Rumusan masalah

Bagaimana cara menyusun dua saklar (seri, paralel, atau sebagai jalan pintas LED) memengaruhi nyala LED, dan gerbang logika apa yang dihasilkan setiap susunan?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Susunan dua saklar (seri, paralel, pintas seri, pintas paralel) dan kombinasi masukan A, B	Keadaan LED (keluaran Y: 1 = nyala, 0 = padam) dan tegangannya	Baterai 3 V, LED merah, dan resistor 150 Ω yang sama

Alat dan bahan

- 2 baterai AA (1,5 V) dan 1 tempat baterai berkabel (total 3 V); jangan memakai adaptor atau listrik PLN
- 1 LED merah 5 mm dan 1 resistor 150 Ω (gelang coklat-hijau-cokelat)
- 2 saklar tekan (*push button*), atau saklar buatan sendiri dari klip kertas dan 2 paku payung pada karton tebal

- 6–8 potong kabel tipis ± 15 cm (kabel jumper), selotip kertas, dan papan proyek (*breadboard*) bila ada
- Multimeter digital (opsional, dipinjam dari laboratorium) untuk mengukur tegangan
- Kertas, pensil, dan tabel kebenaran gerbang logika dari subbab 32.7

Keselamatan

Gunakan **hanya 2 baterai AA (3 V)**. Jangan pernah menyambungkan rangkaian ke stopkontak, adaptor, atau aki. Jangan menghubungkan kutub + dan – baterai langsung dengan kabel (korsleting): kabel bisa panas dan baterai bisa bocor. Pada rangkaian "pintas", resistor $150\ \Omega$ **wajib** tetap terpasang di antara baterai dan saklar. Jika ada kabel atau baterai yang terasa hangat, segera lepaskan baterainya. Kaki LED dan resistor runcing: arahkan menjauhi mata. Jangan mencampur baterai baru dan lama.

Langkah kerja

1. Rakit rangkaian dasar: kutub + baterai $\rightarrow$ resistor $150\ \Omega$ $\rightarrow$ kaki panjang LED (anoda) $\rightarrow$ kaki pendek LED (katoda) $\rightarrow$ kutub – baterai. LED harus menyala. Jika tidak, balik arah LED. Tuliskan hipotesis kelompokmu untuk tiap susunan saklar.
2. **Rangkaian 1 (seri):** putus kabel antara resistor dan LED, lalu sisipkan saklar A dan saklar B berurutan. Uji keempat kombinasi masukan (A dan B ditekan atau tidak). Catat Y: 1 jika LED menyala, 0 jika padam.
3. **Rangkaian 2 (paralel):** pasang saklar A dan B berdampingan di tempat yang sama, sehingga arus bisa lewat salah satunya. Uji empat kombinasi. Jika ada multimeter, ukur tegangan pada LED dan pada resistor untuk setiap baris.
4. **Rangkaian 3 (pintas seri):** kembali ke rangkaian dasar (LED menyala). Sambungkan A dan B secara seri, lalu tempelkan ujung-ujungnya ke kedua kaki LED sebagai "jalan pintas". Pastikan resistor tetap berada di antara baterai dan jalan pintas! Uji empat kombinasi.
5. **Rangkaian 4 (pintas paralel):** ulangi langkah 4, tetapi A dan B dipasang paralel sebagai jalan pintas. Uji empat kombinasi.
6. Bandingkan setiap kolom hasilmu dengan tabel kebenaran di subbab 32.7, lalu tuliskan nama gerbang yang terbentuk.
7. **Tantangan rekayasa:** rakit "penyiram tanaman pintar" $P = K \cdot \overline{H}$: LED (pompa) menyala hanya jika saklar K (tanah kering) ditekan dan saklar H (hujan) tidak ditekan. Petunjuk: pakai satu saklar seri dan satu saklar pintas. Uji empat kombinasinya.
8. Lepaskan baterai, rapikan komponen, dan periksa kembali bahwa tidak ada kabel yang tertinggal tersambung.

Tabel kebenaran hasil percobaan (1 = saklar ditekan atau LED menyala)

Masukan	Rangkaian 1: saklar seri (Y)	Rangkaian 2: saklar paralel (Y)	Rangkaian 3: pintas seri (Y)	Rangkaian 4: pintas paralel (Y)	Rangkaian 2: tegangan LED (V)	Rangkaian 2: tegangan resistor (V)
A = 0, B = 0						
A = 0, B = 1						
A = 1, B = 0						
A = 1, B = 1						

null

Analisis

1. Gerbang logika apa yang terbentuk pada rangkaian 1, 2, 3, dan 4? Jelaskan mengapa saklar seri dan saklar paralel berperilaku seperti gerbang itu. Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Rangkaian 1 = **AND** ($Y = A \cdot B$): arus harus melewati kedua saklar, seperti brankas dua kunci. Rangkaian 2 = **OR** ($Y = A + B$): cukup satu saklar tertutup agar arus punya jalan. Rangkaian 3 = **NAND** dan rangkaian 4 = **NOR**: jalan pintas yang tertutup membuat arus memilih jalan tanpa LED, sehingga keluarannya selalu kebalikan rangkaian 1 dan 2. Itulah arti huruf N ("lalu dibalik").

2. (SMA) Dari data rangkaian 2, hitung arus LED saat menyala memakai $I = V_R/R$. Cocokkan dengan rumus $R = (V_s - V_{LED})/I$ di subbab 32.4. Mengapa resistor tidak boleh dilepas?

Kunci: Contoh data: $V_R = 1,10$ V, sehingga $I = 1,10/150 \approx 0,0073$ A = 7,3 mA. Cek: $R = (3,0 - 1,9)/0,0073 \approx 150 \Omega$, cocok. Tanpa resistor, arus LED melonjak karena LED "rakus" begitu tegangannya sedikit melewati tegangan maju, sehingga LED bisa putus; pada rangkaian pintas, baterai bahkan bisa terhubung singkat.

3. Pada rangkaian 3 dan 4, ketika jalan pintas tertutup dan LED padam, berapa arus yang tetap mengalir dari baterai? Apa artinya bagi pemakaian energi, dan mengapa cip sungguhan tidak membuat gerbang dengan cara "pintas" seperti ini?

Kunci: Saat pintas tertutup, seluruh 3,0 V jatuh di resistor: $I = 3,0/150 = 0,020$ A = 20 mA, hampir tiga kali arus saat LED menyala, padahal LED padam. Daya $P = VI = 3,0 \times 0,020 = 0,06$ W terbuang menjadi kalor di resistor. Cip sungguhan memakai pasangan transistor (CMOS) yang hampir tidak mengalirkan arus saat keluarannya diam, sehingga miliaran gerbang tidak boros energi dan tidak terlalu panas.

4. Bandingkan tegangan LED saat keluaran 1 dan saat keluaran 0. Mengapa komputer cukup membedakan dua tingkat tegangan saja, dan bukan sepuluh tingkat?

Kunci: Saat $Y = 1$, tegangan LED $\pm 1,9$ V; saat $Y = 0$, ± 0 V. Dua keadaan yang sangat berbeda ini mudah dibedakan walau ada gangguan kecil (baterai melemah, kabel panjang). Membedakan sepuluh tingkat tegangan jauh lebih sulit dan mudah salah, seperti membedakan sepuluh tingkat terang senter dari jauh. Karena itu komputer memakai biner.

5. Tuliskan tabel kebenaran penyiram tanaman pintar $P = K \cdot \overline{H}$ hasil rakitanmu. Bagian rangkaian mana yang berperan sebagai gerbang NOT?

Kunci: Saklar K dipasang seri, saklar H dipasang sebagai pintas LED (setelah resistor). Tabel: (K, H) = (0, 0) → 0; (0, 1) → 0; (1, 0) → 1; (1, 1) → 0. Saklar pintas H berperan sebagai gerbang NOT: menekan H justru memadamkan LED.

6. Sebutkan dua kendala atau sumber kesalahan yang kamu alami saat merakit, dan cara mengatasinya.

Kunci: Contoh: LED terpasang terbalik (bias mundur) sehingga tidak pernah menyala, diatasi dengan memeriksa kaki panjang LED; sambungan klip kertas longgar sehingga LED berkedip, diatasi dengan selotip atau papan proyek; baterai lemah sehingga LED redup, diatasi dengan baterai baru; jari menyentuh dua kontak sekaligus sehingga hasil keliru.

7. Cip HP memakai miliaran transistor, bukan saklar tekan. Sebutkan tiga keunggulan transistor sebagai saklar dibanding saklar yang ditekan tangan.

Kunci: Transistor dikendalikan sinyal listrik (tidak perlu ditekan), berukuran sangat kecil (puluhan nanometer) sehingga miliaran muat dalam satu cip, sangat cepat (menyala-mati miliaran kali per detik, saklar tangan $\pm 0,1$ s), hemat energi, dan tidak aus karena tidak ada bagian yang bergerak.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu dalam dua atau tiga kalimat: susunan saklar apa yang menghasilkan AND, OR, NAND, dan NOR, serta mengapa saklar (dan transistor) dapat "berpikir" dengan angka 0 dan 1.

💡 Refleksi

- Momen paling seru saat merakit rangkaian adalah ketika ...
- Bagian yang masih membingungkanku tentang gerbang logika adalah ...
- Alat otomatis di rumah atau sekolahku yang ingin kuselidiki logikanya adalah ...

🖥️ Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak punya komponen? Pakai Lab Mini "**Laboratorium gerbang logika**" di Bab 32 (subbab 32.7). Pilih gerbang AND, OR, NAND, lalu NOR, dan ketuk saklar **A** dan **B** sampai keempat baris tabel kebenaran tercentang; salin hasilnya ke kolom rangkaian 1–4. Untuk kolom tegangan, pakai Rumus Hidup "**Resistor pelindung LED**" di subbab 32.4 dengan $V_s = 3,0$ V dan $V_{LED} = 1,9$ V. Untuk tantangan rekayasa, coba Lab Mini "**Tantangan insinyur: otak lampu taman hemat energi**" di subbab 32.8.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b32-7

 Contoh data (2 baterai AA = 3,0 V, LED merah, R = 150 Ω)

Masukan	Rangkaian 1: saklar seri (Y)	Rangkaian 2: saklar paralel (Y)	Rangkaian 3: pintas seri (Y)	Rangkaian 4: pintas paralel (Y)	Rangkaian 2: tegangan LED (V)	Rangkaian 2: tegangan resistor (V)
A = 0, B = 0	0 (padam)	0 (padam)	1 (nyala)	1 (nyala)	0,00	0,00
A = 0, B = 1	0 (padam)	1 (nyala)	1 (nyala)	0 (padam)	1,90	1,10
A = 1, B = 0	0 (padam)	1 (nyala)	1 (nyala)	0 (padam)	1,90	1,10
A = 1, B = 1	1 (nyala)	1 (nyala)	0 (padam)	0 (padam)	1,90	1,10

 Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Perakitan rangkaian & keselamatan	Keempat rangkaian dan tantangan rekayasa berhasil dirakit, resistor selalu terpasang, tidak ada korsleting, dan komponen dirapikan.	Keempat rangkaian berhasil, tetapi tantangan rekayasa belum selesai.	Hanya sebagian rangkaian yang berhasil atau perlu banyak bantuan.	Rangkaian tidak berhasil dirakit atau aturan keselamatan diabaikan.
Ketepatan data tabel kebenaran	Keempat kolom tabel kebenaran lengkap dan benar; tegangan diukur atau dihitung dengan satuan benar.	Tabel lengkap dengan satu kesalahan baris.	Beberapa baris atau kolom kosong atau tertukar.	Tabel tidak diisi.
Analisis & penalaran	Semua gerbang dinamai tepat dengan alasan (seri = AND, paralel = OR, pintas = dibalik), arus dihitung benar, dan pemborosan pada rangkaian pintas dijelaskan.	Gerbang dinamai tepat tetapi penjelasan atau perhitungan arus kurang lengkap.	Sebagian gerbang dinamai salah atau tanpa alasan.	Analisis tidak dikerjakan.
Rancangan & komunikasi	Rancangan $P = K \cdot \overline{H}$ benar dan diuji, kesimpulan jelas, dan dikaitkan dengan transistor di dalam cip.	Rancangan benar tetapi tidak diuji lengkap, atau kesimpulan kurang jelas.	Rancangan sebagian benar.	Rancangan dan kesimpulan tidak dibuat.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

 Catatan guru

Komponen untuk satu kelompok dapat dibeli di toko elektronik dengan biaya sekitar Rp10.000 (tanpa multimeter). Bila tidak ada saklar tekan, saklar buatan dari klip kertas yang dijepit paku payung di atas karton bekerja dengan baik. Sebelum rangkaian pintas, periksa setiap kelompok: resistor harus berada di antara baterai dan saklar. Jika LED tidak menyala sejak awal, hampir selalu karena terpasang terbalik. Ceritakan bahwa komputer awal (1940-an) memakai ribuan relai dan tabung hampa sebagai saklar, dan bahwa Claude

Shannon (1937) menunjukkan rangkaian saklar dapat menjalankan aljabar Boole. Kegiatan ini sekaligus jembatan ke mapel Koding dan Kecerdasan Artifisial.

Physicspedia · LKPD Bab 32 · © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD · Editor: Abdullah Hanif Hidayat · Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Berlomba dengan Gelombang: Mengukur Waktu Evakuasi dan Membuat Peta Jalur Aman Sekolahku

Bab 33 • Fisika Bumi & Bencana

Proyek mini: pengukuran lapangan + peta evakuasi (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 7–9 dan SMA kelas X

2 × 45 menit (ditambah 1 × 45 menit untuk menyelesaikan peta)

Model: Pembelajaran berbasis proyek (PjBL) dengan inkuiri terbimbing

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengukur kecepatan berjalan dalam beberapa kondisi memakai $v = s/t$ dan menghitung waktu tempuh rute evakuasi.
- Peserta didik dapat menghitung waktu tiba tsunami dari sebuah skenario memakai $v = \sqrt{gh}$ dan membandingkannya dengan waktu evakuasi.
- Peserta didik dapat menilai pilihan jalur evakuasi (horizontal ke tempat tinggi atau vertikal ke gedung kokoh) berdasarkan data.
- Peserta didik dapat menyusun peta jalur evakuasi sekolah yang jelas dan membagikannya kepada warga sekolah.

Fenomena



Setelah latihan sirene di sekolah pesisir, Raka bertanya, "Kak, kalau tsunami beneran datang, kita sempat nggak sampai ke bukit?" Sari langsung mengeluarkan stopwatch: "Jangan ditebak, diukur saja! Berapa cepat kita berjalan, berapa jauh bukitnya, dan berapa lama gelombangnya datang?" Kak Nara mengangguk, "Fisika bisa mengubah rasa cemas menjadi rencana. Kita ukur kecepatan berjalan, hitung waktu tiba gelombang dengan $v = \sqrt{gh}$, lalu kita buat peta jalur aman untuk seluruh sekolah." Tarsi sudah siap dengan spidol hijau.

? Rumusan masalah

Berapa waktu yang dibutuhkan warga sekolah untuk mencapai tempat aman, faktor apa yang paling memengaruhinya, dan apakah waktu itu cukup dibandingkan waktu tiba tsunami dalam sebuah skenario?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Kondisi berjalan (santai, cepat, membawa tas, rombongan satu kelas)	Waktu tempuh lintasan 50 m dan kecepatan berjalan v	Lintasan datar yang sama sepanjang 50 m, siswa yang sama untuk tiga kondisi pertama, cara mengukur waktu yang sama

Alat dan bahan

- Meteran gulung 50 m (atau tali rafia 50 m yang sudah ditandai setiap 5 m) dan kapur atau selotip untuk garis start dan finis
- Stopwatch di HP (minimal 2 buah, untuk start dan finis)

- 1 tas berisi ± 5 kg barang siaga (botol air, makanan, senter, pakaian), ditimbang dengan timbangan badan atau timbangan dapur
- Denah sekolah atau peta daring/cetak lingkungan sekitar, kertas karton A3, spidol warna (hijau untuk jalur, merah untuk bahaya)
- Penghitung langkah di HP atau meteran beroda (bila ada) untuk mengukur panjang rute
- Kalkulator HP

⚠ Keselamatan

Semua pengukuran dilakukan **berjalan** di halaman atau lapangan sekolah, tidak berlari, dan tidak di jalan raya. Jangan menyusuri rute yang menyeberang jalan, sungai, atau pantai tanpa didampingi guru atau petugas: cukup tandai di peta. Di tangga dan koridor, berjalan tertib dan berpegangan. Bawa air minum dan topi bila panas. Tas ± 5 kg hanya dibawa oleh siswa yang sehat dan bersedia. Kegiatan ini adalah latihan kesiapsiagaan: jika ada teman yang pernah mengalami bencana dan merasa tidak nyaman, ia boleh memilih peran pencatat atau pembuat peta.

📋 Langkah kerja

1. Tandai lintasan datar sepanjang $s = 50$ m di lapangan dengan meteran dan kapur. Tulis hipotesis kelompokmu: kondisi mana yang paling lambat?
2. Seorang siswa berjalan santai dari start ke finis. Dua pencatat menekan stopwatch saat ia melewati garis start dan garis finis. Ulangi 3 kali (t_1, t_2, t_3).
3. Ulangi langkah 2 untuk jalan cepat (tanpa berlari), lalu jalan cepat sambil membawa tas siaga ± 5 kg.
4. Bersama guru, seluruh kelas berjalan berbaris dua-dua melewati lintasan. Ukur waktu siswa **paling belakang** dari garis start sampai garis finis. Ulangi 3 kali.
5. Saat latihan sirene (atau aba-aba guru), ukur juga waktu dari bunyi sirene sampai siswa terakhir keluar dari kelas dan berkumpul di gerbang. Inilah waktu reaksi dan keluar kelas.
6. Hitung t rata-rata, kecepatan $v = s/t$, dan waktu tempuh rute evakuasi D/v untuk setiap kondisi. Panjang rute D dari gerbang sekolah ke tempat aman terdekat diukur dengan penghitung langkah atau peta daring (contoh: 900 m).
7. Hitung waktu tiba tsunami untuk skenario di pertanyaan 3, lalu bandingkan dengan waktu evakuasi total (waktu keluar kelas + D/v).
8. Buat peta evakuasi di karton A3: arah utara, jalur utama dan cadangan (panah hijau), titik kumpul dan tempat tinggi atau gedung evakuasi, titik bahaya (kaca, tiang listrik, pohon besar, jembatan), lokasi tas siaga, serta waktu tempuh hasil ukuranmu.

📋 Tabel pengamatan (lintasan $s = 50$ m; panjang rute evakuasi $D = \dots$ m)

Kondisi berjalan	Panjang lintasan s (m)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$v = s/t$ (m/s)	Waktu tempuh rute D (menit)
Jalan santai (sendiri)							
Jalan cepat (sendiri)							
Jalan cepat + tas siaga ± 5 kg							
Rombongan satu kelas berbaris (siswa paling belakang)							

Grafik

Grafik jarak dari gerbang (sumbu tegak, m) terhadap waktu sejak sirene (sumbu mendatar, menit) untuk rombongan kelas: garis mendatar selama waktu keluar kelas, lalu garis lurus naik dengan kemiringan v rombongan sampai D . Gambar garis tegak "tsunami tiba" pada waktu hasil pertanyaan 3, lalu tandai selisih waktunya.

Analisis

1. Urutkan kecepatan berjalan dari yang tercepat sampai yang terlambat. Faktor apa yang paling memperlambat evakuasi? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Contoh data: jalan cepat 1,91 m/s, jalan cepat + tas 1,74 m/s, jalan santai 1,35 m/s, rombongan kelas 1,05 m/s. Yang paling memperlambat adalah bergerak sebagai rombongan besar (antrean, saling menunggu), bukan beban tas ± 5 kg yang hanya mengurangi kecepatan $\pm 9\%$. Jadi latihan berbaris yang tertib sangat penting.

2. Jika waktu keluar kelas 2,5 menit, berapa waktu evakuasi total rombongan kelasmu sampai ke tempat aman (rute D)?

Kunci: Waktu tempuh rute 900 m: $900/1,05 \approx 856$ s $\approx 14,3$ menit. Total $2,5 + 14,3 \approx 16,8$ menit sejak sirene.

3. Skenario latihan: sumber tsunami berjarak 110 km dari pantai. Sejauh 100 km pertama laut sedalam 2.000 m, dan 10 km terakhir rata-rata sedalam 50 m. Dengan $v = \sqrt{gh}$ dan $g = 9,8$ m/s², kapan tsunami tiba? Berapa waktu cadangan rombonganmu?

Kunci: Laut dalam: $v_1 = \sqrt{9,8 \times 2000} = 140$ m/s, $t_1 = 100\,000/140 \approx 714$ s. Laut dangkal: $v_2 = \sqrt{9,8 \times 50} \approx 22,1$ m/s, $t_2 = 10\,000/22,1 \approx 452$ s. Total ≈ 1166 s $\approx 19,4$ menit. Waktu cadangan rombongan hanya $19,4 - 16,8 \approx 2,6$ menit: terlalu tipis. Dengan jalan cepat yang tertib ($\approx 1,9$ m/s), totalnya $2,5 + 7,9 = 10,4$ menit, sehingga cadangannya ± 9 menit. Pelajaran: mulai bergerak segera dan berlatih agar waktu keluar kelas makin singkat.

4. Sebuah gedung beton tiga lantai yang kokoh berjarak 250 m dari sekolah. Hitung waktu evakuasi vertikal rombongan ke gedung itu. Dalam keadaan apa pilihan ini lebih tepat daripada berjalan ke bukit?

Kunci: $250/1,05 \approx 238$ s $\approx 4,0$ menit, ditambah 2,5 menit keluar kelas dan ± 1 menit naik tangga: $\pm 7,5$ menit. Evakuasi vertikal lebih tepat jika sumber gempa dekat sehingga tsunami bisa tiba dalam hitungan menit (seperti Teluk Palu 2018), atau jika tempat tinggi terlalu jauh. Syaratnya gedung kokoh (tidak rusak oleh gempa), cukup tinggi (lantai 3 ke atas), dan tangganya mudah dicapai.

5. Mengapa evakuasi dianjurkan dengan berjalan kaki, bukan naik motor atau mobil? Mengapa kita tetap tidak boleh berlari di tangga dan koridor?

Kunci: Saat banyak orang mengungsi bersamaan, jalan cepat macet; kendaraan terjebak dan menghalangi pejalan kaki, sedangkan pejalan kaki bisa memakai jalan setapak menuju tempat tinggi. Berlari di tangga atau koridor yang ramai membuat orang mudah jatuh dan terinjak, sehingga justru memperlambat semua orang. Berjalan cepat dan tertib adalah cara tercepat untuk rombongan.

6. Kaitkan hasilmu dengan patokan 20-20-20 dan tanda alam tsunami. Mengapa warga pantai tidak boleh menunggu sirene berbunyi?

Kunci: Patokan 20-20-20: gempa terasa ± 20 detik atau lebih $\rightarrow$ tsunami bisa tiba dalam ± 20 menit (bahkan lebih cepat) $\rightarrow$ menuju tempat setinggi ± 20 m. Skenario ini memberi ± 19 menit, sesuai patokan itu. Sirene bisa terlambat atau mati karena listrik padam, dan jika sumbernya dekat tsunami bisa tiba sebelum peringatan resmi tersebar. Tanda alam (gempa kuat atau lama, air laut surut, gemuruh) adalah peringatan tercepat, jadi langsung bergerak.

7. Sebutkan dua sumber ketidakpastian dalam pengukuranmu dan dua ketidakpastian dalam skenario tsunami.

Kunci: Pengukuran: waktu reaksi saat menekan stopwatch ($\pm 0,2$ s), lintasan uji datar padahal rute nyata menanjak atau berbelok, kondisi nyata bisa malam, hujan, atau panik, dan panjang rute dari peta daring kurang teliti. Skenario: letak dan kedalaman sumber tidak pasti, kedalaman laut dipakai rata-rata, dan tinggi gelombang di pantai bergantung pada bentuk teluk. Karena itu perlu cadangan waktu yang lebar.

8. Apa saja yang harus ada pada peta evakuasi yang baik, dan bagaimana cara kelompokmu membagikannya kepada warga sekolah dan keluarga?

Kunci: Peta yang baik memuat arah utara dan skala, jalur utama dan jalur cadangan (panah hijau), titik kumpul dan tempat tinggi atau gedung evakuasi beserta perkiraan ketinggiannya, titik bahaya (kaca, kabel, pohon, jembatan, sungai), lokasi tas siaga dan kotak P3K, waktu tempuh hasil ukur, serta nomor darurat (112 dan BPBD setempat). Peta dipasang di setiap kelas, dibagikan lewat grup kelas, dijelaskan saat upacara, dan diuji dalam latihan rutin bersama keluarga.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu dalam dua atau tiga kalimat: berapa waktu evakuasi sekolahmu, faktor apa yang paling menentukan, dan rencana apa yang paling aman berdasarkan data (sertakan $v = s/t$ dan $v = \sqrt{gh}$).

💡 Refleksi

- Setelah menghitung sendiri waktu evakuasi, perasaanku tentang bencana berubah menjadi ...
- Satu hal yang akan kusampaikan kepada keluargaku tentang jalur evakuasi dan tas siaga adalah ...
- Bagian proyek yang paling bermakna bagiku adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak bisa mengukur di lapangan? Pakai Lab Mini "**Perjalanan tsunami: dari laut dalam ke pantai**" di Bab 33 (subbab 33.5). Atur *Kedalaman laut dalam* ke 2.000, 4.000, dan 6.000 m, tekan ► **Jalankan**, lalu catat angka *Perkiraan tiba di pantai* dan perhatikan perubahan kecepatan serta tinggi gelombang saat mendekati pantai. Untuk kecepatan berjalan, pakai data contoh: jalan santai $\pm 1,35$ m/s, jalan cepat $\pm 1,9$ m/s, dan rombongan kelas $\pm 1,05$ m/s. Lalu kerjakan pertanyaan 2–6 dan buat peta evakuasi dari denah sekolah.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b33-7

 Contoh data ($s = 50$ m, $D = 900$ m, waktu keluar kelas 2,5 menit)

Kondisi berjalan	Panjang lintasan s (m)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t rata-rata (s)	$v = s/t$ (m/s)	Waktu tempuh rute D (menit)
Jalan santai (sendiri)	50	36,8	37,9	36,2	37,0	1,35	11,1
Jalan cepat (sendiri)	50	26,1	26,9	25,6	26,2	1,91	7,9
Jalan cepat + tas siaga ± 5 kg	50	28,7	29,4	28,2	28,8	1,74	8,6
Rombongan satu kelas berbaris (siswa paling belakang)	50	47,2	48,9	46,6	47,6	1,05	14,3

 Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Pelaksanaan pengukuran & keselamatan	Lintasan diukur teliti, setiap kondisi diulang 3 kali, semua berjalan tertib tanpa berlari, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Pengukuran lengkap tetapi ada kondisi yang tidak diulang.	Beberapa kondisi tidak diukur atau lintasan tidak sama.	Pengukuran tidak selesai atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan data & perhitungan	Tabel lengkap; $v = s/t$, waktu tempuh rute, dan waktu tiba tsunami dihitung tepat dengan satuan benar.	Perhitungan benar dengan satu atau dua kesalahan kecil.	Satuan tertukar (detik dan menit, km dan m) atau rumus salah dipakai.	Perhitungan tidak dilakukan.
Analisis & pengambilan keputusan	Membandingkan waktu evakuasi dengan waktu tiba tsunami, memilih jalur terbaik dengan alasan berbasis data, dan menyebut ketidakpastian.	Perbandingan benar tetapi alasan pemilihan jalur kurang lengkap.	Perbandingan sebagian benar.	Analisis tidak dikerjakan.
Peta evakuasi & komunikasi	Peta jelas, lengkap (arah utara, jalur utama dan cadangan, titik kumpul, bahaya, waktu tempuh), dan ada rencana nyata untuk membagikannya.	Peta jelas tetapi ada satu unsur penting yang hilang.	Peta sulit dibaca atau beberapa unsur hilang.	Peta tidak dibuat.

Nilai akhir = (jumlah skor $\div$ 16) $\times$ 100.

 Catatan guru

Koordinasikan dengan kepala sekolah agar pengukuran rombongan dilakukan bersamaan dengan simulasi evakuasi resmi; BPBD setempat sering bersedia membantu. Untuk sekolah yang jauh dari pantai, ganti skenario tsunami dengan skenario gempa: tempat aman adalah lapangan terbuka yang jauh dari gedung, dan yang dibandingkan adalah waktu keluar gedung bertingkat. Sampaikan dengan nada tenang bahwa tujuan kegiatan adalah merencanakan, bukan menakut-nakuti; mintalah izin orang tua bila kegiatan keluar lingkungan sekolah. Peka terhadap siswa yang pernah mengalami bencana. Peta terbaik dapat dipajang di dinding sekolah.

Detektif Watt: Audit Energi Rumahku dan Jejak Karbonnya

Bab 34 • Energi Terbarukan & Perubahan Iklim

Proyek mini: audit energi rumah (penyelidikan data)

SMP kelas 8–9 dan SMA kelas X

2 × 45 menit + tugas rumah 2 hari

Model: Pembelajaran berbasis proyek (PjBL) dengan inkuiri terbimbing

Nama Kelas Kelompok Tanggal

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengumpulkan data daya (watt) dan lama pemakaian alat listrik di rumah secara aman.
- Peserta didik dapat menghitung energi listrik (kWh), biaya, dan jejak karbon setiap alat memakai $E = nPt$.
- Peserta didik dapat membandingkan hasil hitungan dengan pembacaan meteran PLN dan menjelaskan penyebab perbedaannya.
- Peserta didik dapat merancang aksi hemat energi yang terukur dan mengomunikasikannya kepada keluarga.

Fenomena



Token listrik di rumah Sari habis lebih cepat daripada biasanya. Raka langsung menuduh, "Pasti gara-gara setrika! Dayanya kan paling besar." Sari tidak mau menebak: "Ayo kita jadi detektif watt. Catat semua alat, dayanya, dan berapa jam menyala." Kak Nara menambahkan, "Ingat, energi itu daya dikali waktu. Alat kecil yang menyala seharian bisa jadi tersangka utama. Setiap kWh juga punya jejak karbon dari PLTU." Tarsi sudah siap memotret label-label di belakang alat.

Rumusan masalah

Alat listrik mana yang paling banyak memakai energi di rumahku setiap bulan, dan berapa energi, biaya, serta CO₂ yang dapat dihemat dengan mengubah kebiasaan?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Jenis alat (daya P), jumlahnya n , dan lama pemakaian t per hari	Energi per bulan (kWh), biaya (rupiah), dan jejak karbon (kg CO ₂)	Tarif listrik (Rp1.445/kWh), faktor emisi (0,8 kg CO ₂ /kWh), dan periode 30 hari yang sama

Alat dan bahan

- Lembar daftar alat listrik di rumah (atau di satu ruang kelas) dan alat tulis
- Kamera HP untuk memotret label daya (stiker atau pelat) pada alat
- Meteran listrik PLN di rumah (hanya dibaca angkanya: kWh pascabayar atau sisa kWh token prabayar)
- Kalkulator HP dan kertas berpetak untuk diagram batang
- Tabel perkiraan daya alat dari guru (untuk alat yang labelnya hilang)

Keselamatan

Mintalah izin dan pendampingan orang tua. **Hanya membaca** angka di layar meteran: jangan membuka kotak meteran, MCB, atau panel listrik, dan jangan menyentuh kabel yang terkelupas. Jangan mencabut steker dengan tangan basah atau dengan menarik kabelnya. Minta bantuan orang dewasa untuk melihat label di belakang alat yang berat (kulkas, mesin cuci); jangan menggesernya sendiri. Jangan mematikan kulkas yang berisi makanan.

Langkah kerja

1. Tulis hipotesis kelompokmu: alat mana yang menurutmu paling boros energi dalam sebulan, dan mengapa?
2. Bersama orang tua, daftar semua alat listrik di rumah. Catat jumlahnya dan daya pada labelnya dalam watt (W). Potret labelnya. Jika label tidak ada, pakai tabel perkiraan dari guru.
3. Wawancarai anggota keluarga: berapa jam rata-rata setiap alat menyala dalam sehari? Catat di tabel.
4. Hitung energi per hari $E = n \times P \times t$ (Wh), energi per bulan ($\times 30 \div 1000$, dalam kWh), biaya ($\times \text{Rp}1.445$), dan CO_2 ($\times 0,8$ kg). Jumlahkan semuanya pada baris Total.
5. Uji hitunganmu dengan meteran PLN: catat angka meteran pada jam yang sama dua hari berturut-turut. Selisihnya adalah energi yang benar-benar terpakai dalam 24 jam.
6. Bandingkan energi per hari hasil hitungan dengan hasil meteran, lalu catat dugaan penyebab perbedaannya.
7. Gambar diagram batang energi per bulan untuk setiap alat, diurutkan dari yang terbesar.
8. Rancang tiga aksi hemat energi yang benar-benar bisa dilakukan keluargamu. Hitung penghematannya dalam kWh, rupiah, dan kg CO_2 per bulan, lalu sampaikan kepada keluarga atau kelas.

Tabel audit energi (1 bulan = 30 hari; tarif Rp1.445/kWh; 0,8 kg CO_2 /kWh)

Alat listrik	Jumlah n	Daya label P (W)	Lama menyala t (jam/hari)	Energi per hari $E = n \cdot P \cdot t$ (Wh)	Energi per bulan (kWh)	Biaya per bulan (Rp)	CO_2 per bulan (kg)
Lampu							
Kipas angin							
TV							
Rice cooker (memasak)							
Rice cooker (mode hangat)							
Kulkas							
Pompa air							
Setrika							
Pengisi daya HP							
Alat lain: ...							
Total							

Grafik

Diagram batang energi per bulan (kWh, sumbu tegak) untuk setiap alat (sumbu mendatar), diurutkan dari yang terbesar. Beri warna berbeda untuk alat yang lama menyala (lebih dari 8 jam per hari).

Analisis

1. Menurut hitunganmu, alat mana yang paling banyak memakai energi dalam sebulan? Apakah alat itu juga yang dayanya paling besar? Apakah hipotesismu terbukti?

Kunci: Contoh data: menurut daya label, kulkas paling boros (64,80 kWh per bulan, $\pm 45\%$ total), disusul kipas angin dan rice cooker mode hangat (masing-masing 21,60 kWh). Setrika dan rice cooker saat memasak dayanya paling besar (350 W), tetapi hanya 5,25 kWh per bulan karena dipakai sebentar. Hipotesis "alat berdaya terbesar pasti paling boros" tidak terbukti: energi bergantung pada daya *dan* lama pemakaian.

2. Berapa total energi listrik rumahmu per bulan, biayanya, dan jejak karbonnya? Bandingkan dengan tagihan atau pembelian token listrik keluargamu.

Kunci: Contoh data: 4 789 Wh per hari $\approx 4,79$ kWh, sehingga 143,67 kWh per bulan, biaya $\approx$ Rp207.600, dan jejak karbon ≈ 115 kg CO₂ per bulan ($\pm 1,4$ ton per tahun).

3. Bandingkan energi per hari hasil hitungan dengan hasil pembacaan meteran selama 24 jam. Mengapa keduanya berbeda? Alat mana yang paling mungkin menyebabkan perbedaan itu?

Kunci: Contoh: meteran mencatat $\pm 3,6$ kWh dalam 24 jam, lebih kecil daripada hitungan 4,79 kWh. Penyebab utamanya kulkas: kompresornya hidup-mati sehingga hanya bekerja $\pm 40\%$ waktu ($\pm 0,9$ kWh per hari, bukan 2,16 kWh). Selain itu, daya label adalah daya maksimum, lama pemakaian hanya perkiraan, sedangkan daya siaga (TV, charger) yang tidak dihitung sedikit menambah pemakaian.

4. Mengapa rice cooker dalam mode hangat (40 W) bisa memakai energi lebih banyak daripada saat memasak (350 W)? Jelaskan dengan $E = Pt$.

Kunci: Energi = daya $\times$ waktu. Mode hangat: $40 \times 18 = 720$ Wh per hari. Memasak: $350 \times 0,5 = 175$ Wh per hari. Walaupun dayanya kecil, mode hangat menyala sangat lama sehingga energinya ± 4 kali energi memasak.

5. Rancang tiga aksi hemat energi untuk rumahmu. Hitung penghematannya dalam kWh, rupiah, dan kg CO₂ per bulan dan per tahun. Berapa persen dari total?

Kunci: Contoh rencana: mematikan mode hangat (hemat 720 Wh per hari), mengurangi pemakaian dua kipas 2 jam per hari ($2 \times 45 \times 2 = 180$ Wh), dan mengurangi TV 2 jam per hari (120 Wh). Total 1.020 Wh per hari = 30,6 kWh per bulan ($\pm 21\%$ dari total), hemat $\pm$ Rp44.200 dan $\pm 24,5$ kg CO₂ per bulan, atau ± 294 kg CO₂ per tahun, setara serapan ± 13 pohon dewasa.

6. Seandainya keenam lampu LED 9 W diganti lampu pijar 60 W yang sama terangnya, berapa tambahan energi, biaya, dan CO₂ per bulan? Mengapa LED jauh lebih hemat?

Kunci: Tambahan energi $(60 - 9) \times 6 \times 6 = 1\,836$ Wh per hari = 55,1 kWh per bulan, sehingga biaya bertambah $\pm$ Rp79.600 dan CO₂ bertambah ± 44 kg per bulan. Untuk terang yang sama, LED butuh daya ± 6 –7 kali lebih kecil karena lampu pijar mengubah sebagian besar energinya menjadi kalor, bukan cahaya.

7. Sebutkan sumber ketidakpastian dalam audit ini, baik dari data alat maupun dari angka tarif dan faktor emisi.

Kunci: Ketidakpastian: lama pemakaian berdasarkan ingatan, daya label berbeda dengan daya nyata (terutama kulkas, AC, dan kipas yang kecepatannya diatur), daya siaga tidak tercatat, tarif berbeda menurut golongan daya rumah, faktor emisi $0,8 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ adalah rata-rata nasional (lebih kecil jika rumah memakai PLTS atap), dan pemakaian bulan berbeda-beda.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu dalam dua atau tiga kalimat: alat apa yang paling menentukan pemakaian energi rumahmu, mengapa energi bergantung pada daya *dan* waktu ($E = Pt$), dan aksi apa yang paling efektif.

💡 Refleksi

- Hal yang paling mengejutkanku dari audit energi rumahku adalah ...
- Kebiasaan hemat energi yang mulai kulakukan minggu ini adalah ...
- Satu ide hemat energi untuk sekolahku adalah ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Tidak bisa mengaudit rumah? Pakai Lab Mini "**Rumah hemat energi: kWh, rupiah, dan CO_2** " di Bab 34 (subbab 34.6). Tekan 🏠 **Rumah boros**, lalu catat energi per bulan setiap alat dari diagram batangnya ke tabel. Setelah itu ubah satu per satu: ganti lampu menjadi LED, setel AC ke 26°C , matikan mode hangat rice cooker, dan cabut charger. Catat persentase *Hemat vs rumah boros* setiap kali, dan cari kombinasi yang mencapai misi hemat 50%. Kamu juga bisa mencoba widget **Janji aksi minggu ini** di subbab 34.8.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b34-6

 Contoh data audit rumah Sari (meteran PLN mencatat ±3,6 kWh dalam 24 jam)

Alat listrik	Jumlah n	Daya label P (W)	Lama menyala t (jam/hari)	Energi per hari $E = n \cdot P \cdot t$ (Wh)	Energi per bulan (kWh)	Biaya per bulan (Rp)	CO ₂ per bulan (kg)
Lampu LED	6	9	6	324	9,72	14.045	7,78
Kipas angin	2	45	8	720	21,60	31.212	17,28
TV LED 32 inci	1	60	5	300	9,00	13.005	7,20
Rice cooker (memasak)	1	350	0,5	175	5,25	7.586	4,20
Rice cooker (mode hangat)	1	40	18	720	21,60	31.212	17,28
Kulkas satu pintu	1	90	24	2.160	64,80	93.636	51,84
Pompa air	1	125	1	125	3,75	5.419	3,00
Setrika	1	350	0,5	175	5,25	7.586	4,20
Pengisi daya HP	3	10	3	90	2,70	3.902	2,16
Total	—	—	—	4.789	143,67	207.603	114,94

 Rubrik penilaian

Aspek	4 • Sangat baik	3 • Baik	2 • Cukup	1 • Perlu bimbingan
Pengumpulan data & keselamatan	Semua alat terdata lengkap dengan foto label dan lama pemakaian, meteran dibaca dua kali pada jam yang sama, dan aturan keselamatan dipatuhi.	Data hampir lengkap; satu atau dua alat memakai perkiraan tanpa alasan.	Banyak alat terlewat atau meteran tidak dibaca.	Data tidak dikumpulkan atau keselamatan diabaikan.
Ketepatan perhitungan	Energi per hari, kWh per bulan, biaya, dan CO ₂ dihitung tepat dengan satuan benar, termasuk baris Total.	Perhitungan benar dengan satu atau dua kesalahan kecil.	Satuan tertukar (Wh dan kWh) atau beberapa perhitungan salah.	Perhitungan tidak dilakukan.
Analisis & diagram	Diagram batang rapi dan berurutan; perbedaan hitungan dan meteran dijelaskan dengan alasan fisika (kompresor kulkas, daya label, siaga).	Diagram benar tetapi penjelasan perbedaan kurang lengkap.	Diagram salah skala atau perbedaan tidak dijelaskan.	Diagram dan analisis tidak dibuat.
Rencana aksi & komunikasi	Tiga aksi realistis dengan penghematan terhitung (kWh, rupiah, CO ₂) dan bukti sudah disampaikan kepada keluarga.	Tiga aksi dengan perhitungan, tetapi belum disampaikan.	Aksi kurang realistis atau tanpa perhitungan.	Rencana aksi tidak dibuat.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Hormati privasi keluarga: siswa tidak wajib menunjukkan tagihan listrik, dan audit boleh dilakukan pada ruang kelas atau ruang guru sebagai gantinya. Sediakan tabel perkiraan daya untuk alat tanpa label (misalnya kipas angin 35–50 W, TV LED 40–80 W, kulkas satu pintu 70–100 W, setrika 300–400 W, AC ½ PK ±400 W, AC 1 PK ±750 W). Bila rumah memakai AC, biasanya AC menjadi alat paling boros; ini bahan diskusi yang baik. Hubungkan hasil dengan Lab Mini rumah hemat energi dan widget Janji aksi di subbab 34.8. Hasil audit kelas dapat dijadikan kampanye hemat energi sekolah.

Physicspedia • LKPD Bab 34 • © 2026 dr. Rachmat Hidayat, M.Sc, PhD • Editor: Abdullah Hanif Hidayat • Boleh diperbanyak untuk pembelajaran nonkomersial.

Jurnal Bulan Dua Minggu: Mengamati Fase Bulan dan Membuat Model Berskala Bumi–Bulan

Bab 35 • Astrofisika & Alam Semesta

Proyek pengamatan langit + model berskala (inkuiri terbimbing)

SMP kelas 7–9 dan SMA kelas X (dapat disederhanakan untuk SD kelas 6)



2 minggu pengamatan (± 10 menit setiap 2 hari) + 2 × 45 menit di kelas

Model: Inkuiri terbimbing berbasis pengamatan (discovery learning) dan proyek model

Nama _____ Kelas _____ Kelompok _____ Tanggal _____

Tujuan pembelajaran

- Peserta didik dapat mengamati dan mencatat bentuk Bulan, bagian terangnya, dan jarak sudutnya dari Matahari secara teratur selama dua minggu.
- Peserta didik dapat menentukan laju pergeseran Bulan (derajat per hari) dari grafik dan memperkirakan lamanya satu siklus fase.
- Peserta didik dapat menjelaskan fase Bulan dengan model lampu–bola–kepala, serta alasan gerhana tidak terjadi setiap bulan.
- Peserta didik dapat membuat model berskala Bumi–Bulan dan menafsirkan perbandingan ukuran serta jaraknya.

Fenomena



Menjelang Ramadan, Raka melihat bulan sabit yang sangat tipis di langit barat setelah magrib. "Kok bentuknya seperti perahu? Kemarin malah nggak kelihatan sama sekali," katanya heran. Sari ingat penjelasan Kak Nara bahwa awal bulan Hijriah ditentukan dengan hisab dan rukyatul hilal. "Kalau begitu, gerak Bulan pasti teratur. Kita bisa mengukurnya sendiri!" Kak Nara menantang mereka menjadi astronom selama dua minggu: cukup dengan mata, kepalan tangan, dan jurnal. Tarsi yang matanya besar paling bersemangat.

? Rumusan masalah

Bagaimana bentuk Bulan, bagian terangnya, dan jarak sudutnya dari Matahari berubah dari hari ke hari, dan berapa lama satu siklus fase Bulan?

Hipotesis (tebakan) kelompok kami:

Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
Waktu: hari ke-sejak bulan baru	Fase dan bagian terang Bulan (%), jarak sudut Bulan–Matahari θ , serta tinggi Bulan saat Matahari terbenam	Jam pengamatan (segera setelah Matahari terbenam), tempat pengamatan, dan cara mengukur (kepalan tangan pada lengan lurus)

Alat dan bahan

- Buku jurnal atau lembar pengamatan, pensil, dan penghapus
- Tanganmu sendiri sebagai "busur": kepalan tangan pada lengan lurus $\approx 10^\circ$ (kalibrasi dengan busur derajat di kelas)

- Jam HP dan aplikasi kompas HP (atau patokan arah Matahari terbenam)
- Untuk model fase di kelas: senter LED atau lampu meja, bola sterofoam ± 5 cm yang ditusuk pensil atau tusuk sate
- Untuk model berskala: bola plastik atau jeruk berdiameter ± 13 cm (Bumi), bola kecil berdiameter $\pm 3,5$ cm (Bulan), meteran 5 m
- Kertas berpetak dan penggaris untuk grafik

Keselamatan

Jangan pernah menatap Matahari, baik langsung, lewat teropong, maupun lewat kamera HP: retina bisa rusak tanpa terasa sakit. Mulailah mengamati **setelah** Matahari terbenam dan ukur jarak sudut dari titik tempat Matahari terbenam. Amati dari halaman rumah atau sekolah yang aman, bukan dari atap atau tepi jalan raya, dan ditemani orang dewasa bila hari sudah gelap. Pakai lotion antinyamuk. Untuk model di kelas, gunakan senter LED, bukan lilin atau lampu halogen yang panas.

Langkah kerja

1. Cari tanggal bulan baru (ijtimak) terdekat di kalender Hijriah atau informasi resmi BMKG. Rencanakan pengamatan setiap 2 hari mulai hari ke-2 sampai hari ke-14. Tulis hipotesis kelompokmu: mengapa bentuk Bulan berubah?
2. Di kelas, kalibrasi tanganmu: pada lengan lurus, satu kepalan menutupi $\pm 10^\circ$ (cek dengan busur derajat dan papan tulis).
3. Pada hari pengamatan, segera setelah Matahari terbenam, catat jam dan cari Bulan. Gambar bentuknya di jurnal dan perkirakan persentase bagian yang terang.
4. Ukur jarak sudut θ dari titik tempat Matahari terbenam ke Bulan dengan menumpuk kepalan tangan (jumlah kepalan $\times 10^\circ$). Catat juga tinggi Bulan dari ufuk dan arahnya (barat atau timur).
5. Jika langit mendung, tulis "tertutup awan" dan amati pada hari berikutnya. Jangan mengarang data.
6. Di kelas yang digelapkan, buat model fase: senter di satu sisi ruangan sebagai Matahari, bola sterofoam di ujung pensil sebagai Bulan, dan kepalamu sebagai Bumi. Putar badan perlahan dan cocokkan bentuk terang bola dengan sketsa di jurnalmu.
7. Buat model berskala: letakkan bola ± 13 cm (Bumi) dan bola $\pm 3,5$ cm (Bulan) berjarak $\pm 3,9$ m. Sorot dengan senter dari jauh dan coba buat "gerhana". Lalu angkat bola Bulan ± 34 cm (setara kemiringan orbit 5°) dan amati bayangannya.
8. Gambar grafik θ terhadap hari ke- dan grafik bagian terang terhadap hari ke-. Tarik garis lurus terbaik pada grafik θ .

Jurnal pengamatan Bulan (amati segera setelah Matahari terbenam)

Hari ke- (sejak bulan baru)	Jam pengamatan	Nama fase dan sketsa	Bagian terang (%)	Jarak sudut Bulan-Matahari θ (°)	Tinggi dan arah Bulan saat Matahari terbenam
2					
4					
6					
8					
10					
12					
14					

Grafik

Grafik 1: jarak sudut θ (sumbu tegak) terhadap hari ke- (sumbu mendatar); tarik garis lurus terbaik dan hitung kemiringannya (derajat per hari). Grafik 2: bagian terang (%) terhadap hari ke-.

Analisis

1. Bagaimana bentuk dan bagian terang Bulan berubah selama dua minggu? Ke arah mana sisi terangnya selalu menghadap? Apakah hipotesis kelompokmu terbukti?

Kunci: Contoh data: dari sabit sangat tipis ($\pm 5\%$ terang) pada hari ke-2, bagian terang bertambah terus sampai hampir purnama ($\pm 100\%$) pada hari ke-14. Sisi terang selalu menghadap ke arah Matahari terbenam (barat, agak ke bawah), sehingga di dekat khatulistiwa sabit tampak seperti perahu. Hipotesis "fase disebabkan bayangan Bumi" tidak terbukti: bagian gelap hanyalah sisi Bulan yang tidak tersinari Matahari.

2. Hitung kemiringan grafik θ -hari. Dengan laju itu, berapa hari yang dibutuhkan Bulan untuk kembali ke posisi bulan baru (360°)? Bandingkan dengan panjang bulan Hijriah.

Kunci: Kemiringan contoh data $\approx (170^\circ - 25^\circ)/(14 - 2) \approx 12^\circ$ per hari. Satu siklus $\approx 360^\circ/12^\circ \approx 30$ hari, dekat dengan nilai sebenarnya 29,5 hari (bulan sinodis). Karena itu bulan Hijriah panjangnya 29 atau 30 hari.

3. Bandingkan perkiraan bagian terangmu dengan model $\frac{1}{2}(1 - \cos \theta) \times 100\%$ untuk hari ke-8 dan hari ke-12. Apakah cocok?

Kunci: Hari ke-8: $\theta \approx 100^\circ$, model $\frac{1}{2}(1 - \cos 100^\circ) = \frac{1}{2}(1 + 0,17) \approx 59\%$; perkiraan mata 55%. Hari ke-12: $\theta \approx 145^\circ$, model $\frac{1}{2}(1 + 0,82) \approx 91\%$; perkiraan 90%. Cocok dalam batas ketelitian mata (± 5 -10%).

4. Dari model lampu-bola-kepala, di mana posisi Bulan saat purnama dan saat bulan baru? Mengapa fase Bulan bukan disebabkan oleh bayangan Bumi?

Kunci: Purnama: Bulan berada di belakang kepala, berseberangan dengan lampu (Bumi di antara Matahari dan Bulan), sehingga seluruh sisi terangnya menghadap kita. Bulan baru: Bulan berada di arah lampu, sehingga sisi terangnya membelakangi kita. Fase terjadi setiap hari karena sudut pandang kita terhadap sisi terang Bulan berubah. Bayangan Bumi hanya mengenai Bulan saat gerhana Bulan, dan tepinya melengkung besar, tidak seperti batas fase.

5. Dari model berskala, mengapa gerhana Matahari dan gerhana Bulan tidak terjadi setiap bulan, padahal bulan baru dan purnama terjadi setiap bulan?

Kunci: Dalam model berskala, Bulan sangat kecil ($\pm 3,5$ cm) dan jauh ($\pm 3,9$ m, sekitar 30 kali diameter Bumi). Orbit Bulan miring $\pm 5^\circ$, sehingga pada jarak 3,9 m Bulan bisa berada ± 34 cm di atas atau di bawah garis Matahari–Bumi, jauh lebih besar daripada jari-jari bola Bumi (6,5 cm). Bayangan pun biasanya meleset. Gerhana hanya terjadi bila bulan baru atau purnama jatuh di dekat garis simpul orbit.

6. Bulan terbit dan terbenam ± 50 menit lebih lambat setiap hari. Jelaskan dengan hasil pertanyaan 2 dan laju rotasi Bumi 15° per jam.

Kunci: Setiap hari Bulan bergeser $\pm 12^\circ$ ke timur. Bumi berputar 15° per jam, sehingga Bumi perlu tambahan $12/15 = 0,8$ jam ≈ 48 menit untuk "menyusul" Bulan. Contoh: hari ke-2 Bulan terbenam ± 19.40 , sedangkan hari ke-14 Bulan baru terbit ± 17.20 dan terbenam menjelang pagi.

7. Pada hari ke-1 setelah bulan baru, berapa kira-kira jarak sudut dan bagian terang hilal? Mengapa hilal sulit dilihat, dan mengapa Indonesia memakai kriteria tinggi hilal minimal 3° dan elongasi minimal $6,4^\circ$?

Kunci: Pada hari ke-1, $\theta \approx 12^\circ$ dan bagian terangnya $\frac{1}{2}(1 - \cos 12^\circ) \approx 1\%$: sangat tipis, rendah di ufuk barat, dan harus terlihat di langit senja yang masih terang, sering terhalang awan atau kabut. Jika ijtima terjadi hanya beberapa jam sebelum magrib, elongasinya bisa kurang dari $6,4^\circ$ dan tingginya kurang dari 3° , sehingga hilal hampir mustahil terlihat. Kriteria berbasis hisab ini membantu memperkirakan kapan hilal mungkin terlihat, dan hisab maupun rukyat sama-sama berdasar fisika gerak Bulan dan Matahari.

8. Sebutkan tiga sumber ketidakpastian dalam pengamatanmu dan cara memperbaikinya.

Kunci: Contoh: lebar kepala berbeda-beda tiap orang ($\pm 8\text{--}12^\circ$), sehingga perlu dikalibrasi; perkiraan persentase terang dengan mata kurang teliti, sehingga sebaiknya dibandingkan dengan gambar acuan; jam pengamatan tidak sama persis; awan dan polusi cahaya; gerak Bulan tidak tepat seragam ($11\text{--}15^\circ$ per hari karena orbitnya lonjong); dan tinggi Bulan tidak selalu sama dengan θ karena kemiringan ekliptika. Perbaiki: pengamat dan tempat tetap, kalibrasi tangan, foto dengan HP, dan gabungkan data satu kelas.

✓ Kesimpulan

Tuliskan kesimpulanmu dalam dua atau tiga kalimat tentang penyebab fase Bulan, laju pergeseran Bulan, dan panjang satu siklus fase, lengkap dengan angka hasil pengamatanmu.

💬 Refleksi

- Momen paling berkesan saat menatap langit sore adalah ...
- Hal yang masih membuatku penasaran tentang Bulan adalah ...
- Pengamatan langit ini mengubah caraku melihat kalender Hijriah dan pranata mangsa karena ...

💻 Tidak punya alat? Pakai versi virtual

Langit mendung terus atau polusi cahaya kota terlalu terang? Pakai Lab Mini "**Fase Bulan, gerhana, dan pasang surut: seret Bulan!**" di Bab 35 (subbab 35.1). Atur slider *Posisi Bulan* ke $24^\circ, 49^\circ, 73^\circ, 98^\circ, 122^\circ, 146^\circ$, dan 171° ($\pm 12,2^\circ$ untuk setiap hari: hari ke-2, 4, ..., 14), lalu catat *Fase*, *Umur Bulan*, *Bagian terang*, dan *Terbit sekitar* ke tabel. Untuk pertanyaan 5, matikan dan nyalakan *Orbit Bulan miring $\pm 5^\circ$* sambil menggeser *Bulan ke-*. Untuk model berskala, gunakan juga Lab Mini "**Tata surya berskala: zoom, seret, dan kirim kilatan cahaya**" di subbab 35.2.

Versi interaktif: aurumgen.my.id/physicspedia#b35-1

 Contoh data (pengamat di dekat khatulistiwa, bulan baru pada hari ke-0)

Hari ke- (sejak bulan baru)	Jam pengamatan	Nama fase dan sketsa	Bagian terang (%)	Jarak sudut Bulan-Matahari θ (°)	Tinggi dan arah Bulan saat Matahari terbenam
2	18.05 WIB	sabit awal (sangat tipis, seperti perahu)	5	25	$\pm 25^\circ$ di atas ufuk barat
4	18.05 WIB	sabit awal	15	50	$\pm 50^\circ$ di atas ufuk barat
6	18.05 WIB	sabit awal (tebal)	35	75	$\pm 75^\circ$ di atas ufuk barat
8	18.05 WIB	cembung awal (baru lewat separuh)	55	100	$\pm 80^\circ$ di atas ufuk timur
10	18.05 WIB	cembung awal	75	120	$\pm 60^\circ$ di atas ufuk timur
12	18.05 WIB	cembung awal (hampir bulat)	90	145	$\pm 35^\circ$ di atas ufuk timur
14	18.05 WIB	hampir purnama	100	170	$\pm 10^\circ$ di atas ufuk timur

Rubrik penilaian

Aspek	4 · Sangat baik	3 · Baik	2 · Cukup	1 · Perlu bimbingan
Ketekunan pengamatan & keselamatan	Ketujuh pengamatan dilakukan tepat waktu (atau hari mendung dicatat jujur), tidak pernah menatap Matahari, dan didampingi orang dewasa saat gelap.	Lima atau enam pengamatan lengkap.	Tiga atau empat pengamatan, atau beberapa data tampak tidak diamati sendiri.	Pengamatan tidak dilakukan atau keselamatan diabaikan.
Kualitas jurnal & data	Sketsa jelas dan konsisten, jam, persentase terang, θ , serta tinggi dan arah Bulan tercatat lengkap dengan satuan.	Jurnal lengkap dengan beberapa kekurangan kecil.	Banyak kolom kosong atau sketsa tidak sesuai.	Jurnal tidak diisi.
Grafik & analisis	Grafik rapi, kemiringan $\pm 12^\circ$ per hari dihitung, periode $\pm 29,5\text{--}30$ hari disimpulkan, dan data dibandingkan dengan model $\frac{1}{2}(1 - \cos \theta)$.	Grafik benar tetapi perhitungan periode atau perbandingan model kurang lengkap.	Grafik salah skala atau periode tidak ditentukan.	Grafik tidak dibuat.
Model & komunikasi	Model fase dan model berskala dibuat dan dipakai menjelaskan fase serta jarang gerhana dengan tepat; kesimpulan jelas.	Model dibuat tetapi penjelasannya kurang lengkap.	Hanya satu model yang dibuat atau penjelasan keliru sebagian.	Model tidak dibuat.

Nilai akhir = (jumlah skor ÷ 16) × 100.

Catatan guru

Mulailah proyek tepat setelah awal bulan Hijriah (cek ijtima di kalender atau informasi BMKG) agar pengamatan hari ke-2 sampai ke-14 jatuh di sore hari yang mudah diamati. Pada musim hujan, gabungkan data seluruh kelas atau lengkapi dengan versi virtual. Pengamatan ini juga bisa dilanjutkan pagi hari untuk fase akhir (hari ke-16 sampai ke-28). Bahas rukyatul hilal dengan hormat sebagai tradisi ilmiah dan keagamaan. Bila memungkinkan, ajak siswa mengikuti siaran pengamatan observatorium (misalnya Bosscha) atau kegiatan komunitas astronomi setempat.