

Praktis Belajar

Fisika

untuk Kelas XI
Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam

Aip Saripudin
Dede Rustiawan K.
Aditi Suganda



20



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Praktis Belajar

Fisika

untuk Kelas XI

Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam

Aip Saripudin
Dede Rustiawan K.
Adit Suganda

2



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-Undang

Praktis Belajar Fisika 2

untuk SMA/MA Kelas XI
Program Ilmu Pengetahuan Alam

Penulis : Aip Saripudin
Dede Rustiawan K.
Adit Suganda
Editor : Debby Juwita
Desain kulit : Dasiman
Desain Isi : Yusuf Sobari
Ilustrator : Yudiana
Ukuran Buku : 21,0 x 29,7 cm

320
530.07

AIP AIP Saripudin

p

Praktis Belajar Fisika 2 : untuk Kelas XI Sekolah Menengah Atas /
Madrasah Aliyah Program Ilmu Pengetahuan Alam / penulis, Aip Saripudin,
Dede Rustiawan K, Adit Suganda ; penyunting, Debby Juwita; ilustrator, Yudiana
— Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
viii, 234 hlm. ; illus. ; 30 cm

Bibliografi : hlm. 234

Indeks : hlm. 232

ISBN 978-979-068-812-4 (no. jilid lengkap)

ISBN 978-979-068-814-8

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul

II. Dede Rustiawan K III. Adit Suganda IV. Debby Juwita V. Yudiana

**Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari penerbit Visindo Media Persada**

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2009.

Diperbanyak oleh . . .



Kata Sambutan

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2009, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 Tanggal 25 Juni 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*download*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009
Kepala Pusat Perbukuan

Sekilas Isi Buku

Buku **Praktis Belajar Fisika** untuk Kelas XI ini terdiri atas sembilan bab, yaitu Gerak dalam Dua Dimensi, Gravitasi, Elastisitas dan Gerak Harmonik, Usaha, Energi dan Daya, Momentum dan Impuls, Gerak Rotasi dan Kestimbangan Benda Tegar, Fluida, Teori Kinetik Gas, dan Termodinamika.

Di setiap awal bab disajikan *Advance Organizer* dan **Soal Pramateri**. *Advance Organizer* yang dilengkapi dengan **Gambar Pembuka Bab** berisi contoh-contoh penerapan atau manfaat dalam kehidupan sehari-hari yang dapat merangsang keingintahuan Anda tentang materi yang akan dipelajari. Adapun Soal Pramateri merupakan uji awal pengetahuan umum Anda tentang materi yang akan dipelajari yang dapat mengembangkan kecakapan personal Anda. Untuk membantu Anda memahami materi pelajaran, **Gambar** dan **Ilustrasi** disajikan secara menarik dan faktual. Selain itu, disajikan pula tugas **Kerjakanlah** yang merupakan tugas sederhana berupa soal dan kegiatan ilmiah yang dapat mengembangkan kecakapan sosial dan akademik Anda. Ada pula kegiatan **Mahir Meneliti** dan **Kegiatan Semester** yang perlu Anda kerjakan secara mandiri maupun berkelompok. Kedua kegiatan tersebut dapat menumbuhkan semangat kewirausahaan, etos kerja, semangat inovasi/kreativitas, daya saing, kecakapan sosial, dan dapat mengembangkan kecakapan hidup (*life skill*) Anda.

Di setiap akhir materi pelajaran disajikan **Soal Penguasaan Materi** sebagai bahan evaluasi pemahaman Anda tentang materi yang telah dipelajari, ringkasan materi dalam bentuk **Rangkuman** dan **Peta Konsep**. Selain itu, di setiap akhir bab dan akhir semester disajikan **Evaluasi Materi Bab** dan **Evaluasi Materi Semester**. Adapun di akhir buku terdapat **Evaluasi Materi Akhir Tahun** menguji pemahaman Anda setelah mempelajari materi pelajaran selama satu tahun.

Materi pelajaran dalam buku **Praktis Belajar Fisika** ini juga disertai dengan materi pengayaan, di antaranya:

1. Jangan Lupa

Disajikan untuk mengingat materi yang telah dipelajari sebelumnya yang dapat mengembangkan kecakapan personal Anda.

2. Perlu Anda Ketahui

Berisi informasi yang dapat merangsang keingintahuan Anda sehingga mendorong Anda untuk mencari informasi lebih jauh.

3. Loncatan Kuantum (*Quantum Leap*)

Pengayaan yang bersifat informatif ini disajikan secara bilingual sehingga dapat memperdalam ilmu bahasa Inggris Anda sehingga dapat mengembangkan kecakapan personal Anda.

4. Jelajah Fisika

Jelajah Fisika memberikan informasi seputar Fisika termasuk semangat para tokoh Fisika dalam menemukan/menciptakan karyanya dan teknologi dalam dunia Fisika yang dapat menumbuhkan semangat kewirausahaan, etos kerja serta dapat merangsang keingintahuan Anda.

5. Perlu Anda Ketahui

Berisi informasi yang dapat merangsang keingintahuan Anda sehingga mendorong Anda untuk mencari informasi lebih jauh.

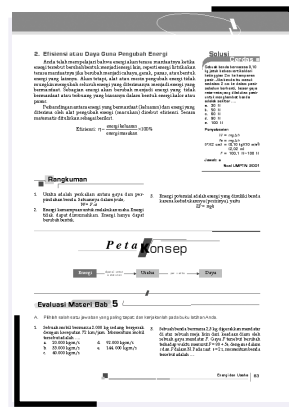
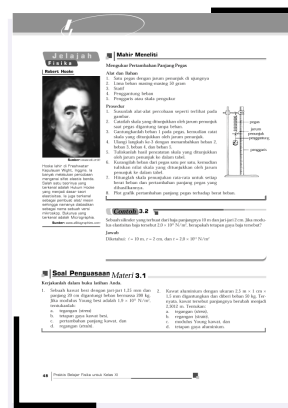
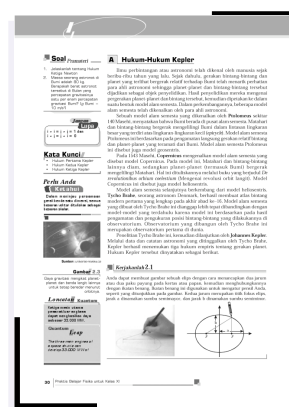
6. Pembahasan Soal SPMB

Pembahasan Soal SPMB membahas soal-soal SPMB yang berkaitan dengan materi yang Anda pelajari.

7. Solusi Cerdas

Merupakan pembahasan soal UAN yang diberikan dengan menggunakan solusi secara praktis dan cepat.

Untuk membantu Anda dalam menggunakan buku **Praktis Belajar Fisika** ini, pada bagian akhir buku ini disajikan **Apendiks**, **Kamus Fisika**, dan **Indeks**.





Kata Pengantar

Sekarang ini, ilmu dan teknologi berkembang dengan pesat. Seiring dengan perkembangan tersebut, Fisika sebagai bagian dari ilmu dan teknologi ikut berkembang pula, baik itu teori maupun penerapannya.

Fisika adalah ilmu dasar teknologi. Fakta-fakta kehidupan, seperti gerak, cahaya, optik, kalor, dan materi lain yang sehari-hari digunakan manusia dipelajari dalam Fisika.

Oleh karena itu, perlu adanya peningkatan kualitas pendidikan Fisika di sekolah agar membentuk manusia yang memiliki daya nalar dan daya pikir yang baik, kreatif, cerdas dalam memecahkan masalah, serta mampu mengomunikasikan gagasan-gagasannya. Pendidikan Fisika harus dapat membantu Anda menyongsong masa depan dengan lebih baik.

Atas dasar inilah, kami menerbitkan buku **Praktis Belajar Fisika** ini ke hadapan Anda, khususnya para siswa Sekolah Menengah Atas. Buku ini menghadirkan aspek kontekstual bagi Anda dengan mengutamakan pemecahan masalah sebagai bagian dari pembelajaran untuk memberikan kesempatan kepada Anda membangun pengetahuan dan mengembangkan potensi diri.

Materi dalam buku ini diharapkan dapat membawa Anda untuk memperoleh pemahaman tentang ilmu Fisika sebagai proses dan produk. Materi pelajaran Fisika yang disajikan bertujuan membekali Anda dengan pengetahuan, pemahaman, dan sejumlah kemampuan untuk memasuki jenjang yang lebih tinggi, serta mengembangkan ilmu Fisika dalam kehidupan sehari-hari.

Oleh karena itu, mendudukkan **Praktis Belajar Fisika** hanya sebatas teori di dalam kelas, akan membuat siswa kurang memahaminya dan menghambat tercapainya tujuan pembelajaran. Melalui buku **Praktis Belajar Fisika** ini, Anda diharapkan dapat menyenangi pelajaran Fisika.

Materi-materi bab di dalam buku ini disesuaikan dengan perkembangan ilmu dan teknologi terkini. Selain itu, buku ini disajikan dengan bahasa yang mudah dipahami dan komunikatif sehingga seolah-olah Anda berdialog langsung dengan penulisnya. Penulisan buku ini diharapkan dapat menjadi salah satu media atau sarana belajar Fisika.

Kami menyadari bahwa penerbitan buku ini tidak akan terlaksana dengan baik tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, dengan hati yang tulus, kami ucapkan terima kasih atas dukungan dan bantuan yang diberikan. Semoga buku ini dapat memberi kontribusi bagi perkembangan dan kemajuan pendidikan di Indonesia.

Jakarta, Mei 2007

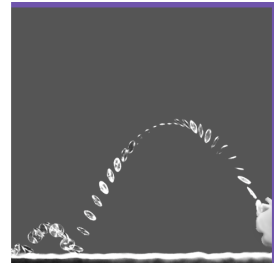
Penerbit

Daftar Isi

Kata Sambutan	iii
Sekilas Isi Buku	v
Kata Pengantar	vi

Semester 1

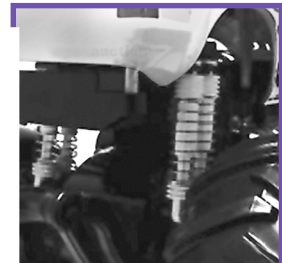
Bab 1	
Gerak dalam Dua Dimensi	1
A. Persamaan Gerak Benda	2
B. Gerak Parabola	14
C. Gerak Melingkar	20
Evaluasi Materi Bab 1	26



Bab 2	
Gravitasi	29
A. Hukum-Hukum Kepler	30
B. Gaya Gravitasi	31
Evaluasi Materi Bab 2	42



Bab 3	
Elastisitas dan Gerak Harmonik	45
A. Sifat Elastis Bahan	46
B. Gerak Harmonik Sederhana	49
Evaluasi Materi Bab 3	65
Kegiatan Semester 1	67



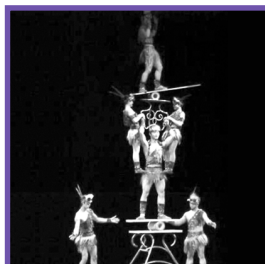
Bab 4	
Usaha, Energi, dan Daya	69
A. Usaha	70
B. Energi	72
C. Daya	80
Evaluasi Materi Bab 4	84



Bab 5	
Momentum dan Impuls	87
A. Momentum dan Impuls	88
B. Hukum Kekekalan Momentum	92
C. Aplikasi Momentum dan Impuls dalam Kehidupan Sehari-hari	95
Evaluasi Materi Bab 5	100
Evaluasi Materi Semester 1	102



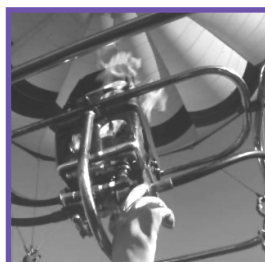
Semester 2



Bab 6	
Gerak Rotasi dan Keseimbangan Benda Tegar	105
A. Kinematika Rotasi	106
B. Momen Gaya dan Momen Inersia	114
C. Dinamika Rotasi	120
D. Keseimbangan Benda Tegar	127
Evaluasi materi Bab 6	138



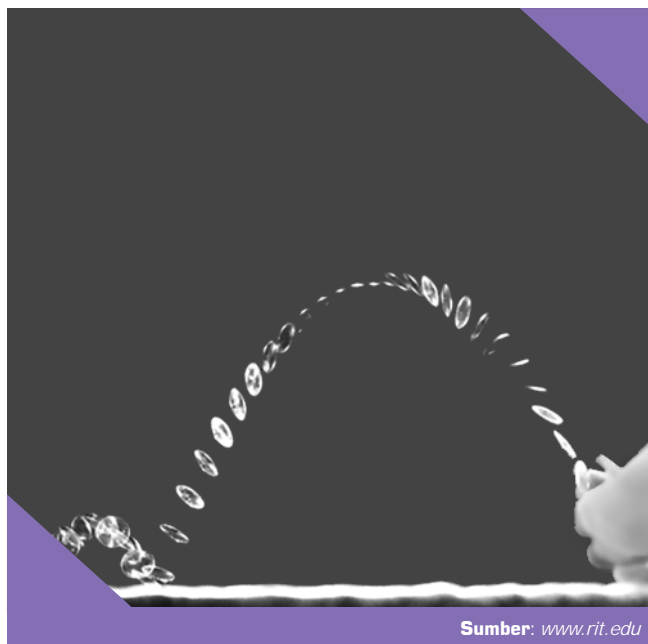
Bab 7	
Fluida	141
A. Fluida Statis	142
B. Fluida Dinamis	157
Evaluasi Materi Bab 7	166
Kegiatan Semester 2	168



Bab 8	
Teori Kinetik Gas	171
A. Persamaan Gas Ideal	172
B. Prinsip Ekuipartisi Energi	179
Evaluasi Materi Bab 8	186



Bab 9	
Termodinamika	189
A. Usaha dan Proses dalam Termodinamika	190
B. Hukum Pertama Termodinamika	196
C. Hukum Kedua Termodinamika	204
Evaluasi Materi Bab 9	209
Evaluasi Materi Semester 2	213
Evaluasi Materi Akhir Tahun	217
Kunci Jawaban	222
Apendiks	225
Kamus Fisika	231
Indeks	232
Daftar Pustaka	234



Sumber: www.rit.edu

B a b 1

Gerak dalam Dua Dimensi

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis gejala alam dan keteraturannya dalam cakupan mekanika benda titik dengan cara menganalisis gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola dengan menggunakan vektor.

Pernahkah Anda menjentikkan uang logam dengan jari Anda? Jika Anda pernah melakukannya dan dapat mengamati bentuk lintasan yang dibentuk saat uang logam itu bergerak, Anda akan dapat melihat bahwa lintasan tersebut berbentuk parabola. Bentuk lintasan uang logam yang berbentuk parabola tersebut dapat difoto menggunakan *stroboscope*, seperti terlihat pada gambar.

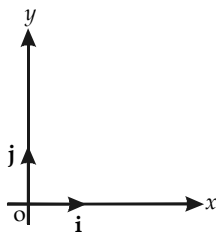
Di Kelas X, Anda telah mempelajari gerak lurus dan gerak melingkar. Dalam materi bab ini, Anda akan mempelajari tentang gerak secara keseluruhan, yaitu gerak lurus, gerak parabola, dan gerak melingkar dengan menggunakan analisis vektor, perhitungan diferensial, dan integral.

Setelah mempelajari materi bab ini, Anda akan memahami bahwa gerak parabola dapat dianalisis melalui perpaduan antara gerak lurus beraturan (GLB) dan gerak lurus berubah beraturan (GLBB) yang arahnya saling tegak lurus. Dapatkah Anda menyebutkan contoh-contoh gerak keseharian lain yang lintasannya berbentuk parabola?

- A. Persamaan Gerak Benda**
- B. Gerak Parabola**
- C. Gerak Melingkar**

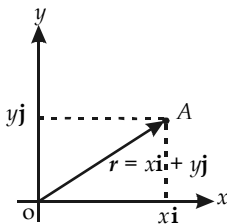
Soal Pramateri

1. Apakah perbedaan antara besaran vektor dan skalar?
2. Sebutkanlah definisi posisi, perpindahan, kecepatan, dan percepatan.
3. Jelaskanlah pengertian kecepatan sudut.



Gambar 1.1

Vektor satuan \mathbf{i} pada arah sumbu- x dan vektor satuan \mathbf{j} pada arah sumbu- y .



Gambar 1.2

Posisi titik A dinyatakan dalam vektor posisi dengan $r_A = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$.

Gambar 1.3

Posisi titik A apabila dinyatakan dalam vektor posisi $r_A = (5\mathbf{i} + 3\mathbf{j})$ cm.

A Persamaan Gerak Benda

Apakah yang dimaksud dengan gerak? Banyak definisi telah dikemukakan oleh para ilmuwan untuk mendeskripsikan gerak. Namun, secara Fisika Anda dapat menyatakan bahwa gerak ditentukan karena adanya kelajuan, kecepatan, dan percepatan benda. Seluruh kajian tentang gerak benda yang Anda pelajari akan berhubungan dengan kedudukan benda, kecepatan, percepatan, dan waktu. Dalam membahas tentang gerak benda, seringkali benda dimisalkan sebagai partikel atau benda titik, yaitu benda yang ukurannya diabaikan dan memiliki massa tetap (konstan). Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan dalam mempelajari gerak benda tersebut. Di Kelas X, Anda telah mempelajari tentang gerak lurus dan gerak melingkar, serta hubungan antara gaya dan percepatan. Dalam bab ini, Anda akan mempelajari materi tentang gerak dengan lebih dalam menggunakan perhitungan vektor, diferensial, dan integral.

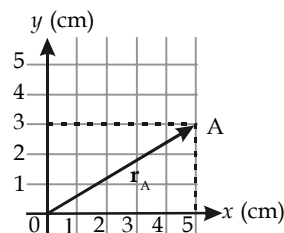
1. Vektor Posisi

Di Kelas X, Anda telah mempelajari bahwa besaran dalam Fisika digolongkan ke dalam dua kelompok, yaitu besaran skalar dan besaran vektor. Besaran skalar adalah besaran yang hanya memiliki nilai saja, sedangkan besaran vektor adalah besaran yang memiliki nilai dan arah. Bandingkanlah kedua pernyataan berikut. Mobil Ali bergerak dengan kecepatan 60 km/jam ke utara. Mobil Budi bergerak dengan kelajuan 60 km/jam. Manakah dari dua pernyataan tersebut yang merupakan besaran vektor? Kecepatan memiliki besar dan arah sehingga disebut sebagai besaran vektor, sedangkan kelajuan hanya memiliki besar saja sehingga disebut sebagai besaran skalar. Apabila benda dianggap sebagai benda titik, atau partikel, posisi benda tersebut pada suatu bidang dapat dinyatakan dengan vektor posisi r , yaitu sebuah vektor yang ditarik dari titik asal sampai ke posisi titik tersebut berada. Vektor posisi r suatu partikel pada bidang xy dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$r = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} \quad (1-1)$$

dengan (x, y) adalah koordinat partikel, sementara \mathbf{i} dan \mathbf{j} adalah vektor satuan yang menyatakan arah pada sumbu- x dan sumbu- y . Vektor satuan memiliki nilai 1 satuan.

Untuk lebih jelasnya, perhatikanlah **Gambar 1.3** berikut.



Posisi partikel A di bidang xy adalah pada $x = 5$ cm dan $y = 3$ cm, atau pada koordinat $(5, 3)$. Vektor posisi partikel A dinyatakan sebagai berikut.

$$r_A = x_A\mathbf{i} + y_A\mathbf{j} = (5\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \text{ cm.}$$

2. Perpindahan

Perpindahan adalah perubahan posisi (kedudukan) suatu benda dalam waktu tertentu. Sebuah partikel berpindah dari titik P ke titik Q menurut lintasan kurva PQ, seperti pada **Gambar 1.4**. Apabila posisi titik P dinyatakan sebagai r_p dan posisi titik Q dinyatakan sebagai r_Q maka perpindahan yang terjadi dari titik P ke titik Q tersebut adalah vektor Δr , yaitu

$$\Delta r = r_Q - r_p \quad (1-2)$$

Persamaan (1-2) jika diubah dalam kalimat dapat dinyatakan bahwa perpindahan suatu benda sama dengan posisi akhir benda dikurangi posisi awal.

Bagaimanakah cara menentukan besar perpindahan yang dilakukan oleh partikel tersebut? Setiap benda membutuhkan waktu untuk berpindah atau mengubah kedudukannya. Dalam kasus perpindahan tersebut, pada saat $t = t_1$ partikel berada di titik P dengan vektor posisinya r_p . Pada saat $t = t_2$, partikel berada di titik Q dengan vektor posisinya r_Q .

Kemudian, apabila $r_p = (x_p \mathbf{i} + y_p \mathbf{j})$ dan $r_Q = (x_Q \mathbf{i} + y_Q \mathbf{j})$, **Persamaan (1-2)** dapat dituliskan menjadi $r_{PQ} = (x_Q \mathbf{i} + y_Q \mathbf{j}) - (x_p \mathbf{i} + y_p \mathbf{j}) = (x_Q - x_p) \mathbf{i} + (y_Q - y_p) \mathbf{j}$. Apabila $x_Q - x_p = \Delta x$ dan $y_Q - y_p = \Delta y$, serta perpindahan yang dilakukan partikel r_{PQ} dinyatakan sebagai Δr , **Persamaan (1-2)** berubah menjadi

$$\Delta r = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} \quad (1-3)$$

Oleh karena besar perpindahan partikel Δr sama dengan panjang vektor Δr maka dapat dituliskan

$$|\Delta r| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (1-4)$$

Arah perpindahan partikel dapat ditentukan dari besar sudut yang dibentuk oleh vektor perpindahan Δr terhadap sumbu- x . Perhatikanlah **Gambar 1.5** berikut.

Apabila sudut yang dibentuk oleh vektor perpindahan Δr terhadap sumbu- x adalah θ , arah perpindahan vektor Δr dinyatakan sebagai

$$\tan \theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-5)$$

Contoh 1.1

Sebuah titik materi bergerak dari titik P (3, 2) ke titik Q (11, 8). Tuliskanlah vektor posisi titik itu ketika berada di titik P dan di titik Q. Hitunglah vektor perpindahan dari titik P ke titik Q serta besar dan arah vektor perpindahan tersebut.

Jawab

Diketahui: koordinat di titik P (3, 2) dan di titik Q (11, 8).

Vektor posisi di titik P (r_p) dan vektor posisi di titik Q (r_Q) adalah

$$r_p = 3\mathbf{i} + 2\mathbf{j}$$

$$r_Q = 11\mathbf{i} + 8\mathbf{j}$$

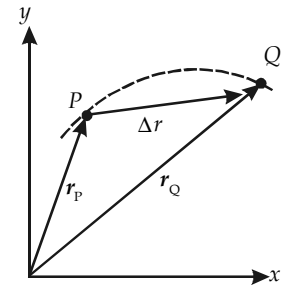
Vektor perpindahan dari titik P ke titik Q adalah Δr yang diperoleh sebagai berikut

$$\Delta r = r_Q - r_p = (11\mathbf{i} + 8\mathbf{j}) - (3\mathbf{i} + 2\mathbf{j})$$

$$\Delta r = 8\mathbf{i} + 6\mathbf{j}$$

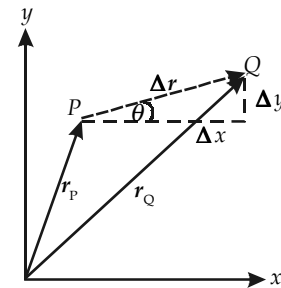
Besar vektor Δr adalah

$$|\Delta r| = \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{100} = 10 \text{ satuan}$$



Gambar 1.4

Garis putus-putus menyatakan lintasan partikel. Perpindahan posisi partikel dari posisi awal di titik P ke posisi titik Q dinyatakan dengan Δr .



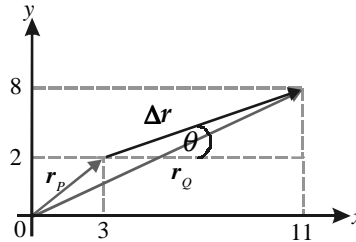
Gambar 1.5

Perpindahan vektor Δr menurut sumbu- x adalah sebesar Δx dan menurut sumbu- y sebesar Δy .



Arah perpindahan vektor itu adalah $\tan \theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{6}{8} = \frac{3}{4}$ sehingga $\theta = 37^\circ$

Jadi, vektor perpindahan adalah $\Delta \mathbf{r} = 8\mathbf{i} + 6\mathbf{j}$, panjang perpindahannya 10 satuan, dan sudut arah perpindahannya 37° terhadap arah sumbu- x positif. Untuk lebih jelasnya, perhatikanlah gambar berikut.

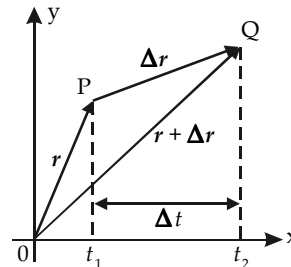


3. Kecepatan Rata-Rata dan Kecepatan Sesaat

Secara matematis, kecepatan didefinisikan sebagai perubahan posisi per satuan waktu. Di Kelas X, Anda telah mempelajari tentang kecepatan yang terbagi atas kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat. Sekarang, Anda akan membahas analisis mengenai kedua jenis kecepatan tersebut ditinjau dari perhitungan vektor.

a. Kecepatan Rata-Rata

Perhatikanlah **Gambar 1.6**. Posisi benda di titik P pada saat t dinyatakan sebagai \mathbf{r} . Kemudian, benda tersebut berpindah selama selang waktu Δt sejauh $\Delta \mathbf{r}$ sehingga pada saat $t + \Delta t$, benda berada di titik Q dengan posisi $\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}$.



Gambar 1.6

Sebuah benda berpindah secara linear dari titik P ke titik Q.

Berdasarkan **Persamaan (1-3)** dapat dituliskan perpindahan posisi benda adalah sebagai berikut.

$$\Delta \mathbf{r} = (\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) - \mathbf{r}$$

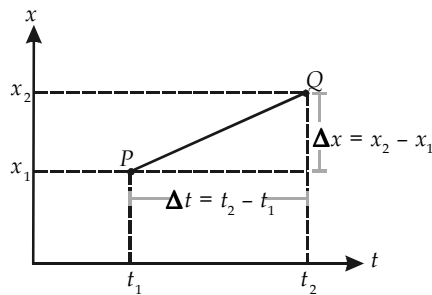
Berdasarkan definisi matematis kecepatan, dapat dituliskan

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) - \mathbf{r}}{(t + \Delta t) - t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-6)$$

dengan $\bar{\mathbf{v}}$ atau $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ disebut kecepatan rata-rata. Kecepatan rata-rata benda dalam arah sumbu- x dan sumbu- y dapat dicari dengan cara memasukkan nilai $\Delta \mathbf{r}$ dari **Persamaan (1-3)** sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j} \quad (1-7)$$

Perhatikanlah **Gambar 1.7**. Gambar tersebut menunjukkan grafik perpindahan benda dari titik P ke titik Q menurut sumbu- x .



Gambar 1.7

Apabila gerak benda hanya pada arah sumbu- x maka kecepatan rata-rata benda \bar{v}_x adalah kemiringan garis yang menghubungkan titik P dengan titik Q, yaitu $\frac{\Delta x}{\Delta t}$.

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa selama selang waktu Δt , benda berpindah sejauh Δx . Oleh karena itu, kecepatan rata-rata benda dalam arah sumbu- x , yaitu $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ dituliskan dengan lambang \bar{v}_x . Apabila benda tersebut juga berpindah menurut sumbu- y , kecepatan rata-rata benda dalam arah sumbu- y , yaitu $\frac{\Delta y}{\Delta t}$ dituliskan dengan lambang \bar{v}_y . Dengan demikian, kecepatan rata-rata sebuah benda pada bidang xy dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \bar{v}_x \mathbf{i} + \bar{v}_y \mathbf{j} \quad (1-8)$$

Besar kecepatan rata-rata benda dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

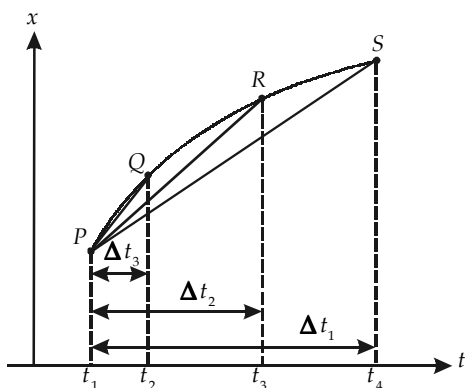
$$|\bar{\mathbf{v}}| = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2} \quad (1-9)$$

b. Kecepatan Sesaat

Kecepatan sesaat suatu benda dapat diketahui dengan cara menghitung kecepatan rata-rata benda tersebut untuk selang waktu yang sangat singkat atau Δt mendekati nol. Penulisiannya secara matematis adalah sebagai berikut.

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-10)$$

Perhatikanlah **Gambar 1.8** berikut.



Perlu Anda

Ketahui

$\frac{dr}{dt}$, $\frac{dx}{dt}$, dan $\frac{dy}{dt}$ disebut

fungsi turunan posisi (r , x , atau y) terhadap waktu t . Rumus fungsi turunan:

$$r = at^n \rightarrow \frac{dr}{dt} = nat^{n-1}$$

contoh:

$$r = 3t^4 \rightarrow \frac{dr}{dt} = (4)(3)(t^{4-1}) = 12t^3$$

Gambar 1.8

Grafik x terhadap t untuk selang waktu Δt yang semakin kecil.



Dari gambar tersebut, dapat Anda lihat bahwa kemiringan garis yang menyatakan kecepatan rata-rata suatu benda akan semakin curam apabila selang waktu perpindahannya semakin kecil. Oleh karena itu, kecepatan sesaat dapat didefinisikan sebagai kemiringan garis tangensial pada titik P , yaitu turunan posisi terhadap waktu.

Pada **Gambar 1.8**, kecepatan sesaatnya secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (1-11)$$

Dalam kajian vektor, kecepatan sesaat benda yang bergerak menurut sumbu- x dan sumbu- y dinyatakan sebagai berikut.

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} \quad (1-12)$$

Oleh karena $\frac{dx}{dt} = v_x$ dan $\frac{dy}{dt} = v_y$ maka **Persamaan (1-12)** dapat dituliskan menjadi

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \quad (1-13)$$

Besarnya kecepatan sesaat atau kelajuan rata-rata benda dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$|\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (1-14)$$

Perhatikanlah **Gambar 1.9**. Dari grafik kecepatan terhadap waktu benda di titik P yang memiliki kecepatan \mathbf{v} , arah kecepatan benda di titik tersebut terhadap sumbu- x dinyatakan dengan θ .

Besar θ secara matematis, dapat diperoleh sebagai berikut

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} \quad (1-15)$$

dengan: $v_x = v \cos \theta$, dan
 $v_y = v \sin \theta$.

Contoh 1.2

Sebuah partikel sedang bergerak pada suatu bidang dengan sumbu koordinat x dan y . Posisi partikel berubah terhadap waktu mengikuti persamaan $\mathbf{r} = (6 + 3t)\mathbf{i} + (8 + 4t)\mathbf{j}$ dengan r dalam meter dan t dalam sekon. Tentukanlah:

- perpindahan partikel dalam selang waktu $t = 0$ hingga $t = 2$ sekon;
- besar kecepatan rata-rata partikel dalam selang waktu $t = 0$ hingga $t = 2$ sekon;
- besar dan arah kecepatan partikel pada saat $t = 2$ sekon.

Jawab

Diketahui: vektor posisi partikel, yaitu $\mathbf{r} = (6 + 3t)\mathbf{i} + (8 + 4t)\mathbf{j}$.

- $t_1 = 0$ sekon adalah $\mathbf{r}_1 = [6 + (3)(0)]\mathbf{i} + [8 + (4)(0)]\mathbf{j} = (6\mathbf{i} + 8\mathbf{j})$ meter.
 $t_2 = 2$ sekon adalah $\mathbf{r}_2 = [6 + (3)(2)]\mathbf{i} + [8 + (4)(2)]\mathbf{j} = (12\mathbf{i} + 16\mathbf{j})$ meter.

Perpindahan partikel dari $t_1 = 0$ sekon hingga $t_2 = 2$ sekon adalah

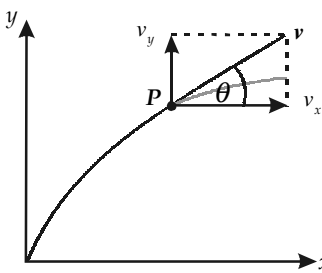
$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (12\mathbf{i} + 16\mathbf{j}) - (6\mathbf{i} + 8\mathbf{j}) = (6\mathbf{i} + 8\mathbf{j}) \text{ meter}$$

Besar vektor $\Delta \mathbf{r}$ adalah

$$\Delta r = |\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{100} = 10 \text{ m.}$$

- Kecepatan rata-rata partikel adalah

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{6\mathbf{i} + 8\mathbf{j}}{2 - 0} = (3\mathbf{i} + 4\mathbf{j}) \text{ m/s}$$



Gambar 1.9

Arah percepatan \mathbf{v} di titik P terhadap sumbu- x positif.

Perlu Anda

Ketahui

Pada buku ini, besaran vektor ditulis dengan huruf tebal dan miring, contohnya: \mathbf{r} , \mathbf{v} , \mathbf{a} . Adapun, vektor satuan ditulis dengan huruf tebal dan tegak, contohnya: \mathbf{i} , \mathbf{j} , dan \mathbf{k} .

Besar kecepatan rata-rata partikel adalah

$$|\bar{v}| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ m/s.}$$

c. Vektor kecepatan partikel sebagai fungsi waktu ditentukan sebagai berikut.

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(6 + 3t) = 3 \text{ m/s}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt}(8 + 4t) = 4 \text{ m/s}$$

Dengan demikian, diperoleh vektor kecepatan sesaat partikel adalah

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} = (3\mathbf{i} + 4\mathbf{j}) \text{ m/s.}$$

Besar kecepatan sesaat partikel adalah

$$|\mathbf{v}| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ m/s.}$$

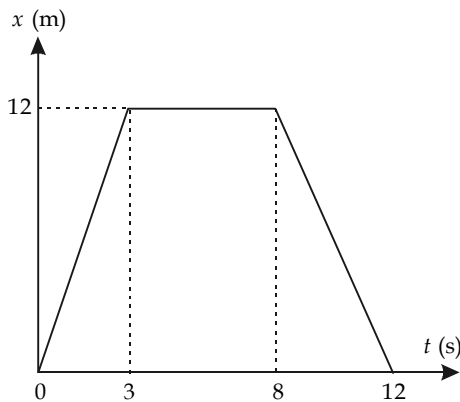
Arah vektor kecepatan sesaat terhadap sumbu- x adalah θ dengan

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{4}{3}$$

$$\theta = 53^\circ.$$

Contoh 1.3

Perhatikan grafik kedudukan (x) terhadap waktu (t) berikut.



Tentukanlah kecepatan rata-rata benda dalam selang waktu:

- antara $t = 0$ sampai $t = 3$ s;
- antara $t = 3$ sampai $t = 8$ s; dan
- antara $t = 8$ sampai $t = 12$ s.

Jawab

Diketahui: grafik $x-t$ dan kecepatan rata-rata $\bar{v} = \frac{\Delta x \mathbf{i}}{\Delta t}$.

- a. Kecepatan rata-rata benda antara $t = 0$ sampai $t = 3$ s adalah

$$\bar{v} = \frac{(12-0)\mathbf{i}\text{m}}{(3-0)\text{s}} = 4\mathbf{i} \text{ m/s}$$

- b. Kecepatan rata-rata benda antara $t = 3$ sampai $t = 8$ s adalah

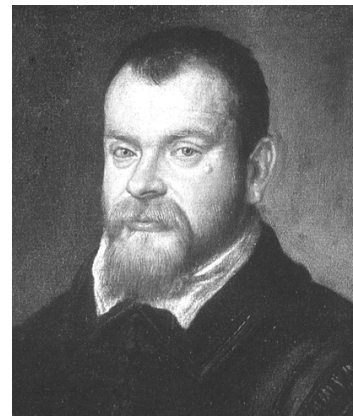
$$\bar{v} = \frac{(12-12)\mathbf{i}\text{m}}{(8-3)\text{s}} = 0\mathbf{i} \text{ m/s}$$

- c. Kecepatan rata-rata benda antara $t = 8$ sampai $t = 12$ s adalah

$$\bar{v} = \frac{(0-12)\mathbf{i}\text{m}}{(12-8)\text{s}} = -3\mathbf{i} \text{ m/s}$$

Jelajah Fisika

Galileo Galilei
(1564–1642)



Galileo lahir di Pisa, Italia. Pada umur 19 tahun, ia mempelajari matematika dan mengembangkan penelitiannya tentang gerak mekanik, terutama mengenai gerak di bidang miring, gerak pendulum, dan gerak jatuh bebas. Saat mengajar di Universitas Padua, ia menjadi penyokong teori Copernicus mengenai sistem Matahari, yang bertentangan dengan teori yang diakui saat itu. Saat menerbitkan karyanya, ia disidang untuk menyangkal hasil penelitiannya, namun ia tetap yakin dengan penelitiannya dan tidak mau menyerah. Setelah ia dijatuhi hukuman tahanan rumah, ia meninggal pada umur 78 tahun. Walaupun begitu, ia menyelesaikan penelitiannya mengenai gerak. Karya tulisnya, kemudian diselundupkan dari Italia dan diterbitkan di Belanda.

Sumber: www.hao.ucar.edu

Perlu Anda

Ketahui

\int adalah lambang integral.
rumus integral:

$$r = \int at^n dt \rightarrow r = \frac{a}{n+1} t^{n+1}$$

contoh:

$$r = \int 4t^3 dt \rightarrow r = \frac{4}{3+1} t^{3+1} = t^4$$

Solusi

Cerdas

Sebuah mobil dengan kecepatan 36 km/jam direm mendadak sehingga terbentuk bekas di jalan sepanjang 20 m. Waktu pengereman yang dibutuhkan sampai mobil tersebut berhenti adalah

- a. 2 s
- b. 4 s
- c. 6 s
- d. 8 s
- e. 10 s

Penyelesaian

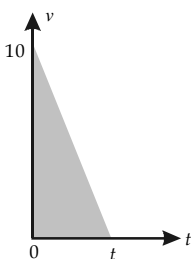
Diketahui: $v_0 = 36 \text{ km/jam}$
 $= 10 \text{ m/s}$

$\Delta r =$ luas segitiga

maka,

$$20 = \left(\frac{1}{2}\right)(t)(10)$$

$$t = 4 \text{ s}$$



Jawab: d

Soal SMPB 2005 Regional III

Gambar 1.10

Luas daerah yang diarsir menyatakan besar perpindahan yang dilakukan benda dalam selang waktu $t = 0$ sampai dengan $t = 2$.

4. Menentukan Posisi dari Fungsi Kecepatan

Fungsi posisi suatu benda, yaitu koordinat benda (x, y) dapat diperoleh dengan cara mengintegalkan persamaan kecepatan benda sebagai fungsi waktu.

Dalam arah sumbu- x , fungsi posisi benda diturunkan sebagai berikut.

$$v_x = \frac{dx}{dt} \text{ atau } dx = v_x dt$$

Posisi x ditentukan dengan

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t v_x dt \Rightarrow x - x_0 = \int_0^t v_x dt$$

$$x = x_0 + \int_0^t v_x dt$$

Dalam arah sumbu- y , fungsi posisi benda diturunkan sebagai berikut.

$$v_y = \frac{dy}{dt} \text{ atau } dy = v_y dt$$

Posisi y ditentukan dengan

$$\int_{y_0}^y dy = \int_0^t v_y dt \Rightarrow y - y_0 = \int_0^t v_y dt$$

$$y = y_0 + \int_0^t v_y dt$$

(x_0, y_0) menyatakan koordinat posisi awal benda, sedangkan (x, y) menyatakan koordinat posisi benda setelah bergerak dalam selang waktu t .

Apabila dituliskan dalam bentuk vektor, posisi benda dapat dituliskan sebagai berikut

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

$$\mathbf{r} = \left(x_0 + \int_0^t v_x dt\right)\mathbf{i} + \left(y_0 + \int_0^t v_y dt\right)\mathbf{j} \quad (1-16)$$

atau

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int \mathbf{v} dt \quad (1-17)$$

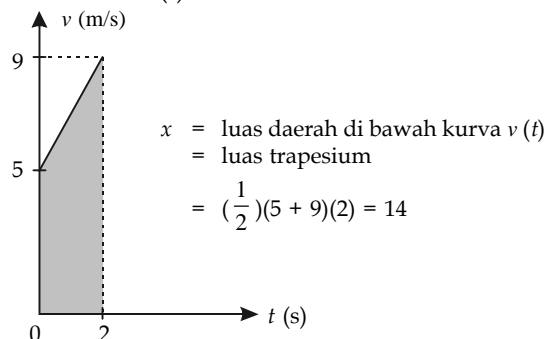
Secara matematis, integral adalah penjumlahan yang kontinu. Dengan demikian, posisi benda dapat ditentukan dengan metode grafik sebagai berikut. Apabila kecepatan sebuah benda dinyatakan dengan persamaan $v_x = 2t + 5$, posisi benda adalah

$$x = \int_0^t (2t + 5) dt = \int_0^t 2t dt + \int_0^t 5 dt = t^2 + 5t \Big|_0^t$$

Misalkan, batas integral adalah dari $t = 0$ sampai dengan $t = 2$. Dengan memasukkan nilai batas integral, didapatkan perpindahan benda adalah

$$x = t^2 + 5t \Big|_0^2 = [2^2 + (5)(2)] - [0^2 + (5)(0)] = 14$$

Cara lain untuk menentukan perpindahan benda adalah dengan menghitung luas daerah di bawah kurva $v(t)$.



Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa besar perpindahan benda sama dengan luas di bawah kurva kecepatan sebagai fungsi waktu $v(t)$. Secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta \mathbf{r} = \int \mathbf{v} dt \quad (1-18)$$

Contoh 1.4

Sebuah benda bergerak pada bidang xy . Pada posisi awal, benda berada pada koordinat $(3,2)$ m. Komponen-komponen kecepatan benda memenuhi persamaan $v_x = 12 + 4t$ dan $v_y = 9 + 3t$ dengan v_x dan v_y dalam m/s, dan t dalam sekon. Tentukanlah:

- persamaan umum vektor posisi benda,
- posisi benda pada saat $t = 3$ sekon, dan
- perpindahan benda antara $t = 1$ sekon dan $t = 3$ sekon.

Jawab

Diketahui: posisi awal benda $(3, 2)$ m, $v_x = 12 + 4t$, dan $v_y = 9 + 3t$.

- Posisi awal benda $(3,2)$ m maka $x_0 = 3$ m dan $y_0 = 2$ m. Dengan demikian, diperoleh

$$\mathbf{r} = (x_0 + \int_0^t v_x dt)\mathbf{i} + (y_0 + \int_0^t v_y dt)\mathbf{j}$$

$$\mathbf{r} = [3 + \int_0^t (12 + 4t)]\mathbf{i} + [2 + \int_0^t (9 + 3t)]\mathbf{j}$$

$$\mathbf{r} = (3 + 12t + 2t^2)\mathbf{i} + (2 + 9t + \frac{3}{2}t^2)\mathbf{j}.$$

- Posisi benda pada saat $t = 3$ sekon adalah
 $x = 3 + (12)(3) + (2)(3^2) = 57$ m

$$y = 2 + (9)(3) + (\frac{3}{2})(3^2) = 42,5$$
 m

Jadi, pada saat $t = 3$ sekon vektor posisi benda dapat dituliskan sebagai $\mathbf{r} = (57\mathbf{i} + 42,5\mathbf{j})$ meter.

- Pada $t_1 = 1$ sekon maka $\mathbf{r}_1 = [3 + (12)(1) + (2)(1^2)]\mathbf{i} + [2 + (9)(1) + (\frac{3}{2})(1^2)]\mathbf{j}$
 $= (17\mathbf{i} + 12,5\mathbf{j})$ meter

Pada $t_2 = 3$ sekon maka $\mathbf{r}_2 = [3 + (12)(3) + (2)(3^2)]\mathbf{i} + [2 + (9)(3) + (\frac{3}{2})(3^2)]\mathbf{j}$
 $= (57\mathbf{i} + 42,5\mathbf{j})$ meter

Perpindahan partikel dari $t_1 = 1$ sekon hingga $t_2 = 3$ sekon adalah

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (57\mathbf{i} + 42,5\mathbf{j}) - (17\mathbf{i} + 12,5\mathbf{j}) = (40\mathbf{i} + 30\mathbf{j})$$
 meter

Besar vektor $\Delta \mathbf{r}$ adalah

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{40^2 + 30^2} = \sqrt{2.500} = 50$$
 meter



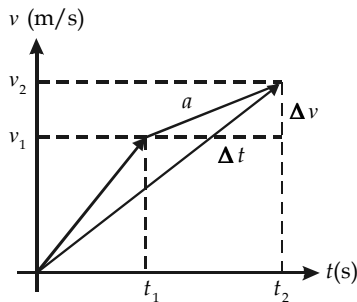
Sumber: Fisika untuk Sains dan Teknik, 1991

Gambar 1.11

Foto dari sebuah apel yang dijatuhkan. Gambar diambil sebanyak 60 kali setiap sekon agar percepatannya dapat diamati. Percepatan apel ditandai dengan jarak antartitik apel yang semakin besar di bagian bawah foto.

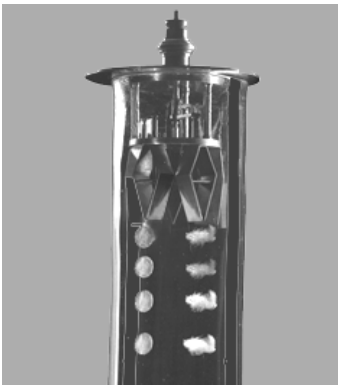
5. Percepatan Rata-Rata dan Percepatan Sesaat

Percepatan adalah perubahan kecepatan per satuan waktu. Perubahan kecepatan per satuan waktu yang bernilai positif disebut percepatan, sedangkan yang bernilai negatif disebut perlambatan. Sebagaimana halnya dengan kecepatan, pembahasan percepatan juga terbagi atas dua, yaitu percepatan rata-rata dan percepatan sesaat.



Gambar 1.12
Grafik percepatan

Jelajah Fisika
Jatuh Bebas



Dahulu orang percaya pada gagasan Aristoteles mengenai benda jatuh, yaitu benda yang lebih berat akan lebih dulu mencapai tanah dibandingkan benda yang lebih ringan. Melalui percobaannya dengan mengukur waktu tempuh bola-bola yang digelindingkan pada suatu bidang miring, Galileo membantah gagasan Aristoteles tersebut. Dari hasil percobaannya, Galileo berkesimpulan bahwa waktu yang dibutuhkan kedua benda jatuh untuk mencapai tanah adalah sama.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

a. Percepatan Rata-Rata

Perhatikanlah **Gambar 1.12**. Grafik kecepatan terhadap waktu pada gambar tersebut menyatakan gerak benda yang berpindah dengan kecepatan tertentu setiap saatnya. Apabila pada saat \$t\$ kecepatan benda adalah \$v\$ dan pada saat \$t + \Delta t\$ kecepatannya \$v + \Delta v\$, percepatan rata-rata benda tersebut (\$\bar{a}\$) dinyatakan sebagai berikut.

$$\bar{a} = \frac{(v + \Delta v) - v}{(t + \Delta t) - t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1-19)$$

Penulisan **Persamaan (1-19)** dalam bentuk vektor dalam arah sumbu-\$x\$ dan sumbu-\$y\$ adalah sebagai berikut.

$$\bar{a} = \frac{\Delta v_x \mathbf{i} + \Delta v_y \mathbf{j}}{\Delta t} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta v_y}{\Delta t} \mathbf{j} \quad (1-20)$$

Oleh karena \$\Delta v_x = \bar{a}_x\$ dan \$\Delta v_y = \bar{a}_y\$, **Persamaan (1-20)** dapat ditulis menjadi

$$\bar{a} = \bar{a}_x \mathbf{i} + \bar{a}_y \mathbf{j} \quad (1-21)$$

Besar percepatan rata-rata dinyatakan sebagai

$$|\bar{a}| = \sqrt{\bar{a}_x^2 + \bar{a}_y^2} \quad (1-22)$$

Arah percepatan rata-rata dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\tan \theta = \frac{\bar{a}_y}{\bar{a}_x} \quad (1-23)$$

b. Percepatan Sesaat

Percepatan sesaat merupakan kecepatan rata-rata untuk selang waktu \$\Delta t\$ yang sangat kecil atau mendekati nol. Secara matematis, persamaannya dituliskan sebagai berikut.

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (1-24)$$

Apabila vektornya disesuaikan menurut arah sumbu-\$x\$ dan sumbu-\$y\$, **Persamaan (1-24)** berubah menjadi

$$a = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} \quad (1-25)$$

Oleh karena \$v = \frac{dr}{dt}\$ maka **Persamaan (1-25)** dapat dituliskan sebagai berikut

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right) = \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} \quad (1-26)$$

Contoh 1.5

Sebuah partikel bergerak dengan fungsi kecepatan \$v(t) = 2t^2 - 3t + 10\$ jika \$v\$ dinyatakan dalam m/s dan \$t\$ dalam sekon, tentukanlah:

- percepatan rata-rata partikel untuk selang waktu \$t = 2\$ sekon sampai \$t = 4\$ sekon,
- percepatan awal partikel, dan
- percepatan partikel pada saat \$t = 6\$ sekon.

Jawab

Diketahui: $v(t) = 2t^2 - 3t + 10$.

- a. Untuk menghitung percepatan rata-rata, tentukan lebih dahulu Δv dan Δt sebagai berikut.

Persamaan umum kecepatan adalah $v(t) = 2t^2 - 3t + 10$ sehingga
 untuk $t_2 = 4$ sekon, $v_2 = 2(4)^2 - 3(4) + 10 = 30$ m/s
 untuk $t_1 = 2$ sekon, $v_1 = 2(2)^2 - 3(2) + 10 = 12$ m/s

Diperoleh $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{30 - 12}{4 - 2} = 9$ m/s².

- b. Persamaan umum percepatan sesaat diperoleh sebagai turunan pertama dari fungsi kecepatan, yaitu

$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} (2t^2 - 3t + 10) = (4t - 3)$ m/s².

Percepatan awal partikel adalah percepatan pada $t = 0$ sehingga
 $a = 4(0) - 3 = -3$ m/s².

- c. Percepatan partikel pada saat $t = 6$ sekon adalah
 $a = 4(6) - 3 = 21$ m/s².

Contoh 1.6

Sebuah mobil bergerak dengan grafik kecepatan (v) terhadap waktu (t) seperti terlihat pada gambar disamping.

Tentukanlah:

- a. percepatan rata-rata benda antara $t = 0$ sekon sampai $t = 4$ sekon, dan
 b. percepatan rata-rata benda antara $t = 4$ sekon sampai $t = 8$ sekon

Jawab

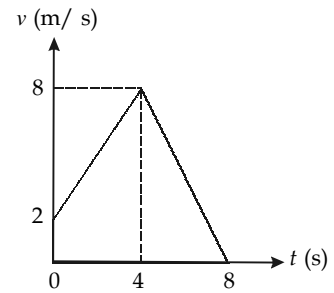
Diketahui: grafik $v - t$.

- a. Percepatan rata-rata benda antara $t = 0$ sampai $t = 4$ sekon, yaitu

$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{8 - 2}{4 - 0} = 1,5$ m/s².

- b. Percepatan rata-rata benda antara $t = 4$ sampai $t = 8$ sekon, yaitu

$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{0 - 8}{8 - 4} = -2$ m/s².



6. Menentukan Kecepatan dari Fungsi Percepatan

Fungsi kecepatan dapat diperoleh dari fungsi percepatan dengan metode integral, yaitu

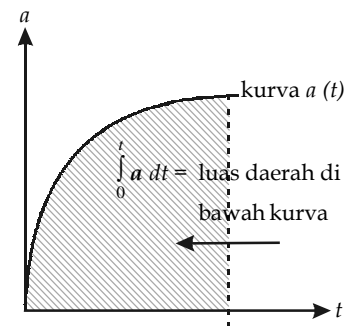
$$v = v_0 + \int_0^t a dt$$

atau

$$v = (v_{0x} + \int a_x dt)\mathbf{i} + (v_{0y} + \int a_y dt)\mathbf{j} \tag{1-27}$$

Secara matematis, integral adalah penjumlahan yang kontinu. Metode yang digunakan untuk memperoleh nilai kecepatan dari fungsi percepatan dapat dilakukan dengan analogi pada cara untuk mendapatkan nilai perpindahan dari fungsi kecepatan. Perhatikan **Gambar 1.13**. Kecepatan partikel secara grafik dapat ditentukan sebagai berikut.

Besar kecepatan = luas daerah di bawah kurva $a(t)$



Gambar 1.13

Luas daerah yang diarsir menyatakan besar kecepatan yang dilakukan benda dalam selang waktu t .



Contoh 1.7

Sebuah benda bergerak dengan kecepatan awal 3 m/s. Jika benda mengalami percepatan $a(t) = (4t - 2) \text{ m/s}^2$, tentukanlah:

- persamaan kecepatan benda, dan
- kecepatan benda pada $t = 2$ sekon.

Jawab

Diketahui: $v_0 = 3 \text{ m/s}$ dan $a(t) = (4t - 2) \text{ m/s}^2$.

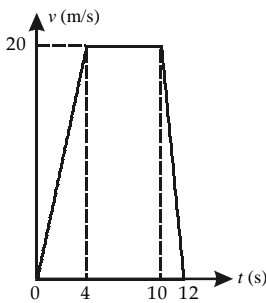
- Kecepatan dapat diperoleh dari fungsi percepatan dengan metode integral.

$$v = v_0 + \int a \, dt = 3 + \int (4t - 2) \, dt = (3 + 2t^2 - 2t) \text{ m/s}^2.$$

- Kecepatan benda pada saat $t = 2$ sekon adalah

$$v = 3 + (2)(2)^2 - (2)(2) = 7 \text{ m/s}.$$

Solusi Cerdas



Sebuah mobil bergerak dengan grafik kecepatan terhadap waktu, seperti terlihat pada gambar. Pada Interval waktu antara 10 sekon hingga 12 sekon, mobil bergerak ...

- lurus diperlambat dengan perlambatan 10 m/s^2
- lurus dipercepat dengan percepatan 10 m/s^2
- lurus dipercepat dengan percepatan 5 m/s^2
- lurus diperlambat dengan perlambatan 10 m/s^2
- lurus beraturan dengan kecepatan tetap sebesar 10 m/s

Penyelesaian

$$t_1 = 10 \rightarrow v_1 = 20 \text{ m/s}$$

$$t_2 = 12 \rightarrow v_2 = 0 \text{ m/s}$$

Dalam selang waktu antara 10 sekon hingga 12 sekon

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{0 - 20}{12 - 10}$$

$$a = -10 \text{ m/s}^2$$

Jawab: a

7. Gerak Lurus Beraturan dan Gerak Lurus Berubah Beraturan

Di Kelas X, Anda telah mengenal dan mempelajari dua jenis gerak lurus, yaitu gerak lurus beraturan (GLB) dan gerak lurus berubah beraturan (GLBB). Pada gerak lurus beraturan, kecepatan gerak benda tetap dan percepatan benda sama dengan nol. Persamaan geraknya diperoleh melalui persamaan

$$v = \frac{ds}{dt} \Rightarrow ds = v \, dt \Rightarrow \int_{s_0}^s ds = \int_{t_0}^t v \, dt$$

Pada GLB, nilai v tetap dan tidak bergantung pada waktu sehingga persamaan dapat dituliskan menjadi

$$\int_{s_0}^s ds = v \int_{t_0}^t dt \Rightarrow s - s_0 = vt$$

Dengan demikian, dapat dituliskan persamaan

$$s = s_0 + vt \quad (1-28)$$

dengan s_0 merupakan jarak tempuh benda pada saat $t = 0$.

Pada gerak lurus berubah beraturan (GLBB), benda bergerak dengan percepatan tetap. Persamaan geraknya diperoleh melalui

$$a = \frac{dv}{dt} \Rightarrow dv = a \, dt \Rightarrow \int_{v_0}^{v_t} dv = \int_0^t a \, dt$$

Pada GLBB, nilai a tetap dan tidak bergantung waktu sehingga persamaan dapat dituliskan menjadi

$$\int_{v_0}^{v_t} dv = a \int_0^t dt \Rightarrow v_t - v_0 = at$$

Dengan demikian, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$v_t = v_0 + at \quad (1-29)$$

atau

$$t = \frac{v_t - v_0}{a} \quad (1-30)$$

Apabila Persamaan (1-29) diintegrasikan, akan diperoleh jarak tempuh benda, yaitu

$$v(t) = \frac{ds}{dt} \Rightarrow ds = v(t) \, dt$$

Oleh karena $v(t) = v_0 + at$ maka

$$\int_{s_0}^s ds = \int_0^t v(t) dt = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

$$s - s_0 = \int_0^t v_0 dt + \int_0^t (at) dt = v_0 \int_0^t dt + a \int_0^t t dt$$

$$s - s_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

(1-31)

Jika $s_0 = 0$, akan diperoleh persamaan

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

(1-32)

Kemudian, jika **Persamaan (1-30)** disubstitusikan ke **Persamaan (1-32)** diperoleh

$$s = v_0 \left(\frac{v_t - v_0}{a} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{v_t - v_0}{a} \right)^2$$

$$s = \left(\frac{v_0 v_t - v_0^2}{a} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{v_t^2 - 2v_t v_0 - v_0^2}{a^2} \right)$$

$$2s = 2 \left(\frac{v_0 v_t - v_0^2}{a} \right) + a \left(\frac{v_t^2 - 2v_t v_0 - v_0^2}{a} \right)$$

$$2as = 2v_0 v_t - 2v_0^2 + v_t^2 - 2v_0 v_t + v_0^2$$

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as$$

(1-33)

Kata Kunci

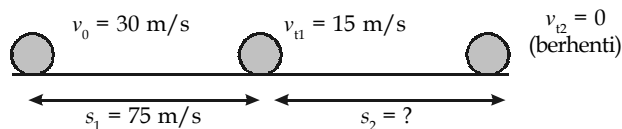
- Vektor posisi
- Vektor kecepatan
- Vektor percepatan
- Gerak lurus beraturan
- Gerak lurus berubah beraturan

Contoh 1.8

Besar kecepatan suatu partikel yang mengalami perlambatan konstan ternyata berubah dari 30 m/s menjadi 15 m/s setelah menempuh jarak sejauh 75 m. Setelah menempuh jarak berapa lagi partikel tersebut berhenti?

Jawab

Diketahui: $v_0 = 30$ m/s, $v_{t1} = 15$ m/s, $v_{t2} = 0$ m/s, dan $s = 75$ m



$$a = \frac{v_{t1}^2 - v_0^2}{2s_1} = \frac{15^2 - 30^2}{2(75)} = -4,5 \text{ m/s}^2.$$

$$s_2 = \frac{v_{t2}^2 - v_{t1}^2}{2a} = \frac{0^2 - 15^2}{2(-4,5)} = 25 \text{ m.}$$

Soal Penguasaan Materi 1.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Seekor semut bergerak dari titik A $(-2, 5)$ ke titik B $(7, -7)$. Tentukanlah:
 - vektor posisi semut itu saat berada di titik A dan di titik B, dan
 - vektor perpindahan dari titik A ke titik B, serta besar vektor perpindahan tersebut.
- Sebuah partikel sedang bergerak pada suatu bidang dengan sumbu koordinat x dan y . Posisi partikel berubah terhadap waktu mengikuti persamaan $r = (3 - 6t + 3t^2)\mathbf{i} + (4 - 8t + 4t^2)\mathbf{j}$ dengan r dalam meter dan t dalam sekon. Tentukanlah:
 - perpindahan partikel dalam selang waktu $t = 2$ sekon sampai dengan $t = 4$ sekon,
 - besar kecepatan rata-rata partikel dalam selang waktu $t = 2$ sekon sampai dengan $t = 4$ sekon, dan
 - besar dan arah kecepatan partikel tersebut pada saat $t = 2$ sekon.
- Sebuah benda bergerak pada bidang xy . Pada saat awal, benda berada di koordinat $(5, 2)$ m komponen-komponen kecepatan benda memenuhi persamaan $v_x = 12 + 3t$ dan $v_y = 16 + 4t$ dengan v_x dan v_y dalam m/s, dan t dalam sekon. Tentukanlah:
 - persamaan umum vektor posisi benda,
 - posisi benda pada saat $t = 2$ sekon, dan
 - perpindahan benda antara $t = 0$ sekon dan $t = 4$ sekon.
- Sebuah partikel bergerak dengan fungsi kecepatan $v(t) = (2,5t - 4)\mathbf{i} + (6t + 3)\mathbf{j}$ dengan v dalam m/s dan t dalam sekon. Tentukanlah:
 - percepatan rata-rata partikel untuk selang waktu $t = 0$ sekon sampai $t = 3$ sekon, dan
 - percepatan benda pada $t = 2$ sekon.
- Benda bergerak dengan kecepatan awal 3 m/s. Jika benda mengalami percepatan $a(t) = (4t - 2)$ m/s², tentukanlah:
 - persamaan kecepatan benda, dan
 - kecepatan benda pada $t = 2$ sekon.

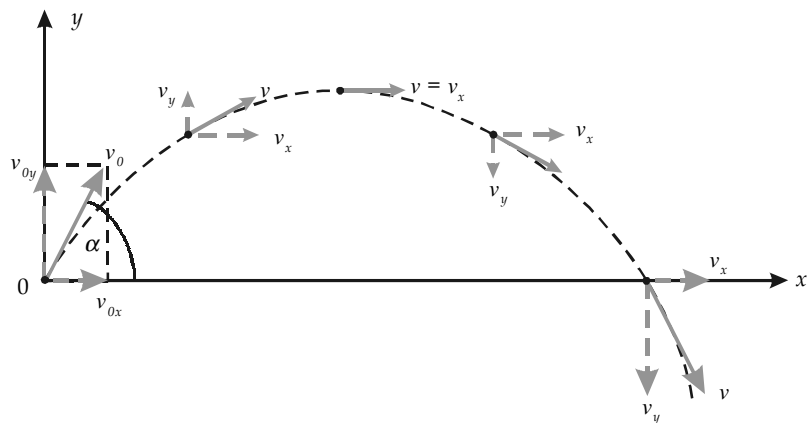
B Gerak Parabola



Gambar 1.14

Lintasan bola basket saat dilemparkan ke dalam ring akan berbentuk parabola.

Perhatikanlah lintasan yang dibentuk oleh bola basket yang dilemparkan ke dalam ring pada **Gambar 1.14**. Lintasan bola basket tersebut berbentuk parabola. Gerak yang lintasannya berbentuk parabola disebut gerak parabola. Contoh umum gerak parabola adalah gerak benda yang dilemparkan ke atas membentuk sudut tertentu terhadap permukaan tanah. Gerak parabola dapat dipandang dalam dua arah, yaitu arah vertikal (sumbu- y) yang merupakan gerak lurus berubah beraturan (GLBB), dan arah horizontal (sumbu- x) yang merupakan gerak lurus beraturan (GLB). Perhatikan **Gambar 1.15** berikut.



Gambar 1.15

Arah gaya pada lintasan gerak parabola.

Gerak pada sumbu- x (horizontal) adalah gerak lurus beraturan karena kecepatan benda di setiap titik bernilai konstan dan berlaku persamaan

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cos \alpha \quad (1-34)$$

Adapun, jarak mendatar yang ditempuh oleh sebuah benda ditentukan oleh persamaan

$$x = v_x t = v_0 \cos \alpha t \quad (1-35)$$

Gerak pada sumbu- y (vertikal) adalah gerak lurus berubah beraturan, karena benda mengalami perubahan kecepatan akibat percepatan gravitasi Bumi. Dalam hal ini, arah gerak benda vertikal ke atas sehingga persamaan kecepatan geraknya pada setiap titik adalah

$$v_y = v_{0y} - gt \quad (1-36)$$

oleh karena $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$, **Persamaan (1-36)** dapat dituliskan menjadi

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt \quad (1-37)$$

Posisi benda pada sumbu- y (menurut ketinggian) dapat dituliskan dengan persamaan berikut

$$y = v_{0y} t - \frac{1}{2} gt^2 \quad (1-38)$$

atau

$$y = v_0 \sin \alpha t - \frac{1}{2} gt^2 \quad (1-39)$$

1. Kecepatan dan Arah Kecepatan Benda di Sembarang Titik

Pada gerak parabola, benda memiliki kecepatan pada komponen sumbu- x dan sumbu- y sehingga besar kecepatan benda di sembarang titik secara matematis, dirumuskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (1-40)$$

Arah kecepatan benda terhadap sumbu mendatar (sumbu- x) dirumuskan sebagai berikut.

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} \quad (1-41)$$

Oleh karena nilai v_x selalu positif maka positif atau negatifnya sudut θ bergantung pada nilai v_y .

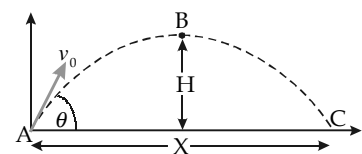
2. Beberapa Persamaan Khusus pada Gerak Parabola

Persamaan-persamaan khusus gerak parabola ini hanya berlaku untuk gerak parabola dengan lintasan dari tanah, kemudian kembali lagi ke tanah seperti pada **Gambar 1.16**.

Pada contoh gerak parabola tersebut, suatu benda bergerak dari titik A dengan kecepatan awal v_0 dan sudut θ . Benda tersebut mencapai titik tertinggi di titik B dan jarak terjauh di titik C.

a. Waktu untuk Mencapai Titik Tertinggi (Titik B)

Pada saat benda yang melakukan gerak parabola mencapai titik tertinggi, kecepatan benda pada komponen vertikal (sumbu- y) $v_y = 0$. Persamaannya adalah sebagai berikut.



Gambar 1.16

Lintasan gerak parabola benda dengan titik tertinggi di B dan titik terjauh di C.



$$\begin{aligned}
 v_y &= v_{0y} - gt_{AB} \\
 0 &= v_0 \sin \alpha - gt_{AB} \\
 gt_{AB} &= v_0 \sin \alpha \\
 t_{AB} &= \frac{v_0 \sin \alpha}{g}
 \end{aligned}
 \tag{1-42}$$

Solusi Cerdas

Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan 60 m/s dan sudut elevasi 30°. Ketinggian maksimum yang dicapai peluru adalah

- 30 m
- 45 m
- 50 m
- 90 m
- 100 m

Penyelesaian

Diketahui: $v_0 = 60 \text{ m/s}$
 $\alpha = 30^\circ$
 $g = 10 \text{ m/s}^2$

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \\
 &= \frac{(60)^2 \sin^2 (30^\circ)}{(2)(10)} \\
 &= \frac{(3.600) \left(\frac{1}{2}\right)^2}{20} \\
 &= 45 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jawab: b

UMPTN 1997 Rayon B

Ketinggian benda di titik tertinggi adalah $H = \frac{1}{2}g(t_{BC})^2$. Sifat simetri grafik parabola memperlihatkan bahwa waktu yang diperlukan benda untuk mencapai titik tertinggi dari posisi awal (t_{AB}), sama dengan waktu tempuh benda dari titik tertinggi ke jarak terjauh (t_{BC}). Dengan demikian, akan diperoleh persamaan

$$t_{AB} = t_{BC} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} = \sqrt{\frac{2H}{g}}
 \tag{1-43}$$

b. Tinggi Maksimum (H)

Tinggi maksimum benda yang melakukan gerak parabola dapat ditentukan dari penurunan **Persamaan (1-43)** sebagai berikut.

$$\frac{v_0 \sin \alpha}{g} = \sqrt{\frac{2H}{g}} \text{ dikuadratkan menjadi } \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g^2} = \frac{2H}{g} \text{ sehingga diperoleh}$$

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}
 \tag{1-44}$$

c. Jarak Terjauh (X)

Waktu tempuh untuk mencapai titik terjauh (titik C) sama dengan dua kali waktu yang diperlukan untuk mencapai titik tertinggi ($t_{AC} = 2 t_{AB}$). Jarak terjauh yang dicapai benda pada sumbu- x (dilambangkan dengan X) adalah

$$X = v_{0x} t_{AC} = v_0 \cos \alpha \cdot 2 \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right) = v_0^2 \cdot 2 \left(\frac{\sin \alpha}{g} \right) \cos \alpha$$

Menurut trigonometri, $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$ sehingga persamaan untuk jarak terjauh yang dapat dicapai benda dapat dituliskan

$$X = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}
 \tag{1-45}$$

Perbandingan antara jarak terjauh (X) dan tinggi maksimum (H) akan menghasilkan persamaan

$$\frac{X}{H} = \frac{\left(\frac{v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} \right)}{\left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \right)} = \frac{4}{\tan \alpha}
 \tag{1-46}$$

Contoh 1.9

Dari titik A di tanah, sebuah bola dilemparkan dengan kecepatan awal 20 m/s dan sudut elevasi 37° ($\sin 37^\circ = 0,6$). Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, hitunglah:

- komponen kecepatan awal dalam arah horizontal dan vertikal,
- kecepatan bola setelah 0,4 sekon,
- posisi bola setelah 0,4 sekon,
- tinggi maksimum yang dapat dicapai bola, dan
- jarak lemparan terjauh yang dicapai bola.

Jawab

Diketahui: $v_0 = 20 \text{ m/s}$, $\alpha = 37^\circ$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- Komponen kecepatan awal
 - Dalam arah horizontal
$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha = (20 \text{ m/s})(\cos 37^\circ)$$
$$= (20 \text{ m/s})(0,8) = 16 \text{ m/s}.$$
 - Dalam arah vertikal
$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha = (20 \text{ m/s})(\sin 37^\circ)$$
$$= (20 \text{ m/s})(0,6) = 12 \text{ m/s}.$$
- Kecepatan bola setelah 0,4 s ($t = 0,4 \text{ s}$)
 - Kecepatan dalam arah horizontal tetap, yaitu
$$v_x = v_{0x} = 16 \text{ m/s}.$$
 - Kecepatan dalam arah vertikal
$$v_y = v_{0y} - gt = 12 \text{ m/s} - (10 \text{ m/s}^2)(0,4 \text{ s}) = 8 \text{ m/s}.$$

Dengan demikian diperoleh

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{16^2 + 8^2}$$
$$= 8\sqrt{5} \text{ m/s}.$$

- Posisi bola setelah 0,4 s
 - Posisi pada arah horizontal
$$x = v_x t = (16 \text{ m/s})(0,4 \text{ s}) = 6,4 \text{ m}.$$
 - Posisi pada arah vertikal

$$y = v_{0y} t - \frac{1}{2} g t^2$$
$$= (12 \text{ m/s})(0,4 \text{ s}) - \left(\frac{1}{2}\right)(10 \text{ m/s}^2)(0,4 \text{ s})^2$$
$$= 5,6 \text{ m}.$$

Dengan demikian, posisi bola setelah 0,4 s berada pada koordinat (6,4 m ; 5,6 m).

- Tinggi maksimum yang dicapai bola

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{(20)^2 (0,6)^2}{2(10)} = 7,2 \text{ m}$$

- Jarak lemparan terjauh yang dicapai bola

$$X = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}$$
$$= \frac{2(20 \text{ m/s})^2 (0,6)(0,8)}{10 \text{ m/s}^2}$$
$$= 38,4 \text{ m}$$

Jelajah Fisika

Lompat Batu Pulau Nias



Penduduk di Pulau Nias memiliki tradisi unik. Seorang pemuda Nias dewasa atau menginjak dewasa harus mampu meloncati batu yang tingginya sekitar 2 meter, sebagai tanda keberanian, kedewasaan, dan kesatriaan. Gerak yang dilakukan oleh pemuda Nias ini merupakan salah satu contoh gerak parabola yang telah dikenal sejak dulu oleh para penduduk Nias. Dalam menyelesaikan tantangan lompat batu ini, peloncat harus memiliki kecepatan awal tertentu, tinggi maksimum, dan rentang maksimum, sebagaimana yang telah Anda pelajari dalam materi gerak parabola.

Sumber: www.geocities.com



Contoh 1.10

Jangan Lupa

dari rumus trigonometri, diketahui

$$\sin^2 \alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

Sebuah benda dilemparkan dari puncak sebuah gedung yang tingginya 40 m. Kecepatan awal benda 20 m/s dengan sudut elevasi 30°. Tentukan jarak terjauh dalam arah mendatar yang dapat dicapai benda, dihitung dari dasar gedung.

Jawab

Diketahui: $h = 40$ m, $v_0 = 20$ m/s, dan $\theta = 30^\circ$.

Perhatikan gambar.

Untuk menentukan jarak terjauh dalam arah mendatar (X), lebih dahulu Anda hitung waktu yang diperlukan benda untuk bergerak dari A ke B. Waktu ini bisa dihitung dari gerak vertikal ke atas (sumbu-y) sebagai berikut:

$$v_{0y} = v_0 \sin 30^\circ = (20 \text{ m/s}) \left(\frac{1}{2} \right) = 10 \text{ m/s}$$

$$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

$$-40 = 10t - \frac{1}{2}(10)t^2; \quad \text{bagi 5}$$

$$-8 = 2t - t^2$$

$$0 = t^2 - 2t - 8$$

$$0 = (t + 2)(t - 4)$$

Diperoleh

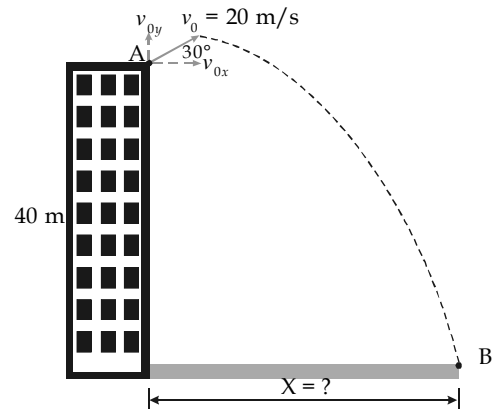
$t = -2$ s (tidak digunakan)

$t = 4$ s

Dari gerak horizontal (sumbu -x), diperoleh

$$x = v_0 t \cos 30^\circ$$

$$= (20 \text{ m/s})(4 \text{ s}) \left(\frac{1}{2}\sqrt{3} \right) = 40\sqrt{3} \text{ m.}$$

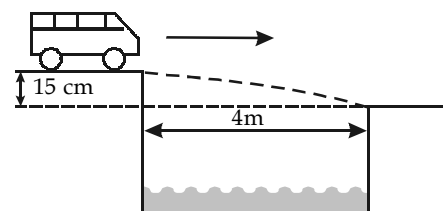


Catatan:

nilai y diambil harga negatif (-40) karena posisi akhir (titik B) berada di bawah posisi asal (titik A).

Contoh 1.11

Sebuah mobil hendak menyeberangi sebuah parit yang lebarnya 4 m. Perbedaan tinggi antara kedua sisi parit itu adalah 15 cm, seperti ditunjukkan pada gambar. Jika percepatan gravitasi 10 m/s², berapakah kelajuan (v) minimum agar penyeberangan mobil dapat tepat berlangsung?



Jawab

Perhatikan kembali gambar. Dari gambar diketahui: $y = 0,15$ m, $x = 4$ m, $v_{0x} = v$, $v_{0y} = 0$, dan $g = 10$ m/s².

Pada kasus tersebut, gerak mobil merupakan perpaduan antara GLB pada arah mendatar dan GLBB (gerak jatuh bebas) dalam arah vertikal. Oleh karena itu, diperoleh

1) Dari gerak jatuh bebas diperoleh waktu untuk tiba di sisi parit bagian bawah sebagai berikut:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \rightarrow t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2(0,15\text{m})}{10\text{m/s}^2}} = 0,173 \text{ s.}$$

2) Dari gerak horizontal diperoleh kelajuan v sebagai berikut

$$X = v_{0x} t = vt \rightarrow v = \frac{X}{t} = \frac{4\text{ m}}{0,173\text{ s}} = 23 \text{ m/s.}$$

Jadi, kelajuan minimum agar penyeberangan mobil dapat tepat berlangsung adalah $v = 23 \text{ m/s}$.

Mahir Meneliti

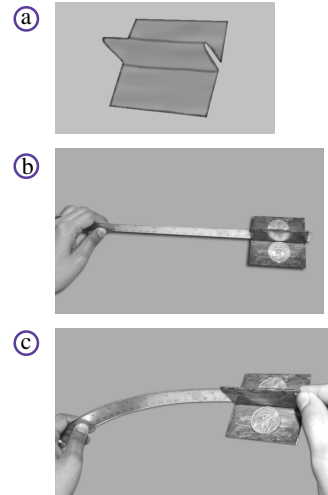
Membandingkan Waktu Tempuh Benda pada Gerak Jauh Bebas dan Gerak Parabola

Alat dan Bahan

1. Penggaris plastik
2. Karton tebal
3. Dua uang logam (koin)
4. Selotip

Prosedur

1. Lipatlah karton tebal menjadi seperti huruf "T" terbalik dan pasang pada penggaris plastik dengan menggunakan selotip. Kemudian, letakkan satu uang logam (koin) di setiap sisi karton. Perhatikanlah gambar.
2. Lengkungkanlah penggaris plastik, kemudian lepaskan. Koin yang berada di depan akan mengalami gerak parabola, sedangkan koin yang berada di belakang akan mengalami gerak jatuh bebas.
3. Dengarkanlah bunyi yang timbul saat kedua koin tersebut jatuh dari penggaris plastik. Apakah yang dapat Anda simpulkan?
4. Diskusikanlah kesimpulan Anda dengan teman sebangku dan guru Fisika Anda.



- (a) Karton tebal yang telah dilipat.
- (b) Lipatan karton tebal yang telah dipasangkan pada penggaris dan ditempati 2 keping uang logam.
- (c) Penggaris yang dilengkungkan sebelum dilepaskan.

3. Persamaan Vektor Gerak Parabola

Menurut analisis vektor, persamaan-persamaan gerak parabola dapat dituliskan sebagai berikut. Vektor posisi pada gerak parabola adalah

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

$$\mathbf{r} = (v_0 \cos \alpha t)\mathbf{i} + (v_0 \sin \alpha t - \frac{1}{2}gt^2)\mathbf{j} \quad (1-47)$$

Vektor kecepatan gerak parabola adalah

$$\mathbf{v} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j}$$

$$\mathbf{v} = (v_0 \cos \alpha)\mathbf{i} + (v_0 \sin \alpha - gt)\mathbf{j} \quad (1-48)$$

Dalam kehidupan sehari-hari, Anda banyak menjumpai contoh gerak melingkar. Bumi berputar mengelilingi Matahari dalam orbit yang mendekati lingkaran, demikian juga satelit-satelit yang bergerak dalam orbit melingkar mengelilingi Bumi.

Mobil yang bergerak mengitari suatu sudut juga bergerak dalam busur melingkar. Kajian tentang gerak melingkar telah Anda pelajari di Kelas X. Dalam subbab ini, pembahasan gerak melingkar akan ditinjau secara umum menggunakan fungsi turunan dan integral.

Contoh 1.12

Posisi peluru yang ditembakkan di atas bidang datar dengan sudut elevasi tertentu dinyatakan oleh persamaan $\mathbf{r} = [80t\mathbf{i} + (60t - 5t^2)\mathbf{j}] \text{ m}$. Jika \mathbf{i} dan \mathbf{j} menyatakan vektor satuan dalam arah x dan y , serta t dalam sekon, tentukanlah:

- a. kecepatan awal peluru,
- b. sudut elevasi tembakan,
- c. kecepatan peluru di titik tertinggi,



- d. waktu untuk mencapai jarak maksimum, dan
e. jarak mendatar maksimum tembakan.

Jawab

Diketahui: $r = [80t\mathbf{i} + (60t - 5t^2)\mathbf{j}] \text{ m}$

- a. Kecepatan awal peluru ($t = 0$),

$$v = \frac{dr}{dt} = 80\mathbf{i} + (60 - 10t)\mathbf{j}$$

Pada $t = 0$ diperoleh

$$v_0 = 80\mathbf{i} + 60\mathbf{j}$$

$$|v_0| = \sqrt{80^2 + 60^2} = 100 \text{ m/s}$$

- b. Sudut elevasi tembakan (α)

$$\tan \alpha = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} = \frac{60}{80} = \frac{3}{4}$$

$$\alpha = 37^\circ$$

- c. Kecepatan peluru di titik tertinggi $v_y = 0$ sehingga peluru hanya memiliki komponen kecepatan sumbu- x

$$v = v_{0x} = 80 \text{ m/s.}$$

- d. Waktu untuk mencapai jarak maksimum (X) diperoleh apabila $y = 0$
($60t - 5t^2$) = 0 dan diperoleh $t = 12$ sekon

- e. Jarak mendatar maksimum tembakan

$$X = v_{0x}t = 80t = (80)(12) = 96 \text{ m.}$$

Kata Kunci

- Gerak parabola
- Tinggi maksimum
- Jarak terjauh

Soal Penguasaan Materi 1.2

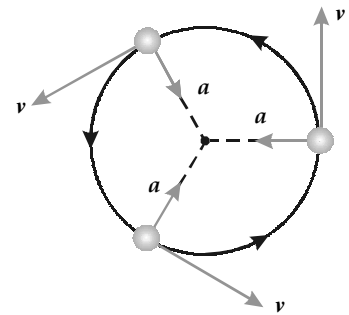
Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Satu peluru ditembakkan dengan kecepatan 100 m/s dan membentuk sudut 37° terhadap arah mendatar. Tentukan:
 - a. waktu untuk mencapai titik tertinggi,
 - b. tinggi maksimum yang dicapai peluru,
 - c. jarak mendatar maksimum yang dicapai peluru, dan
 - d. kecepatan peluru setelah 2 sekon.
2. Posisi peluru yang ditembakkan di atas bidang datar dengan sudut elevasi tertentu dinyatakan oleh persamaan $r = [120t\mathbf{i} + (160t - 5t^2)\mathbf{j}] \text{ m}$. Apabila \mathbf{i} dan \mathbf{j} menyatakan vektor satuan dalam arah x dan y , serta t dalam sekon. Tentukan:
 - a. kecepatan awal peluru,
 - b. sudut elevasi tembakan,
 - c. kecepatan peluru di titik tertinggi,
 - d. jarak mendatar maksimum tembakan, dan
 - e. tinggi maksimum yang dicapai peluru.
3. Dua buah benda dilemparkan dengan kecepatan awal sama besar dan sudut elevasi berbeda, yaitu 30° dan 60° . Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah perbandingan:
 - a. tinggi maksimum yang dicapai kedua benda;
 - b. jarak mendatar terjauh yang dicapai kedua benda.

C Gerak Melingkar

Di kelas X, Anda telah mempelajari bahwa suatu partikel dikatakan bergerak melingkar beraturan, jika partikel tersebut bergerak dalam lintasan berbentuk lingkaran atau busur lingkaran dengan kelajuan konstan. Walaupun kelajuan partikel tersebut tidak berubah, namun partikel tersebut tetap memiliki percepatan. Mengapa demikian? Anda tentu telah memahami bahwa percepatan partikel (perubahan kecepatan dalam selang waktu tertentu) merupakan perubahan kelajuan partikel tersebut. Namun, Anda tidak boleh lupa bahwa kecepatan merupakan besaran vektor. Oleh karena kecepatan merupakan besaran vektor, perubahan arah kecepatan saja (besar kecepatan tetap) akan menimbulkan percepatan, seperti yang terjadi pada gerak melingkar beraturan.

Perhatikanlah **Gambar 1.17** berikut. Pada gambar tersebut ditunjukkan hubungan antara vektor kecepatan dan percepatan pada gerak melingkar beraturan. Besar kecepatan dan percepatan pada gerak melingkar beraturan tidak berubah-ubah, namun arahnya selalu berubah-ubah setiap saat. Arah kecepatan selalu menyinggung lintasan lingkaran (tangensial terhadap lingkaran), sedangkan percepatan selalu mengarah ke pusat lingkaran sehingga disebut percepatan sentripetal.



Gambar 1.17

Arah vektor kecepatan dan percepatan pada gerak melingkar.

Perhatikanlah **Gambar 1.18**. Suatu partikel yang bergerak melingkar beraturan di titik P dengan jari-jari lingkaran r . Oleh karena arah kecepatan selalu tegak lurus jari-jari r (tangensial terhadap lingkaran), sudut θ yang dibentuk oleh v terhadap garis vertikal di titik P akan sama besar dengan sudut θ yang dibentuk oleh jari-jari r terhadap sumbu- x . Vektor kecepatan di titik P tersebut dapat diuraikan menjadi vektor komponennya menurut sumbu- x dan sumbu- y , seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1.19** berikut. Dengan demikian, dapat dituliskan

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \quad (1-49)$$

atau

$$\mathbf{v} = (-v \sin \theta) \mathbf{i} + (v \cos \theta) \mathbf{j} \quad (1-50)$$

Perhatikan kembali **Gambar 1.18**. Dari gambar tersebut, Anda dapat mengganti $\sin \theta$ dengan $\frac{y_p}{r}$ dan $\cos \theta$ dengan $\frac{x_p}{r}$ sehingga **Persamaan (1-50)** dapat ditulis menjadi

$$\mathbf{v} = \left(-\frac{vy_p}{r} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{vx_p}{r} \right) \mathbf{j} \quad (1-51)$$

Percepatan gerak melingkar beraturan dapat ditentukan dari turunan pertama **Persamaan (1-51)** sebagai berikut.

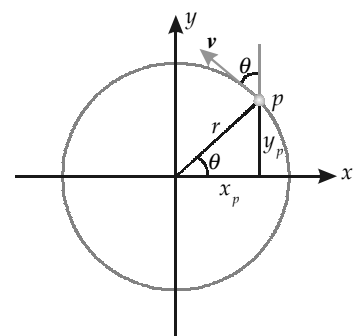
$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d \left(\frac{vy_p}{r} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{vx_p}{r} \right) \mathbf{j}}{dt}$$

$$\mathbf{a} = \frac{\left(-\frac{v}{r} \frac{dy_p}{dt} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{v}{r} \frac{dx_p}{dt} \right) \mathbf{j}}{dt} \quad (1-52)$$

Oleh karena $\frac{dy_p}{dt} = v_y$ dan $\frac{dx_p}{dt} = v_x$ serta $v_x = -v \sin \theta$ dan $v_y = -v \cos \theta$ maka **Persamaan (1-52)** dapat ditulis menjadi

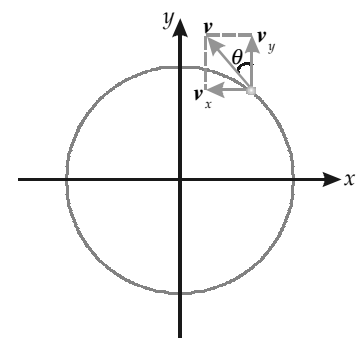
$$\mathbf{a} = \frac{\left(-\frac{v^2}{r} \cos \theta \right) \mathbf{i} + \left(\frac{v^2}{r} \sin \theta \right) \mathbf{j}}{dt} \quad (1-53)$$

Vektor percepatan dan komponen vektornya menurut sumbu- x dan sumbu- y ditunjukkan oleh **Gambar 1.20**. Berdasarkan uraian gambar tersebut, dapat ditentukan besar percepatan sentripetal melalui persamaan berikut.



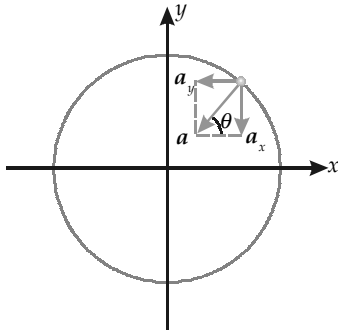
Gambar 1.18

Partikel P bergerak melingkar berlawanan arah jarum jam. Vektor kecepatannya (v) selalu berubah-ubah terhadap waktu, walaupun besar vektor kecepatannya tetap



Gambar 1.19

Kecepatan v dan komponen vektornya menurut sumbu- x dan sumbu- y .



Gambar 1.20
Percepatan a dan komponen vektornya menurut sumbu- x dan sumbu- y .

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \frac{v^2}{r} \sqrt{(\cos \theta)^2 + (\sin \theta)^2}$$

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (1-54)$$

Sedangkan, arah vektor percepatan, ϕ , dapat ditentukan dari persamaan

$$\tan \phi = \frac{a_y}{a_x} = \frac{-\left(\frac{v^2}{r}\right) \sin \theta}{-\left(\frac{v^2}{r}\right) \cos \theta}$$

$$\tan \phi = \tan \theta \quad (1-55)$$

Dari **Persamaan (1-54)** dan **Persamaan (1-55)**, terbukti bahwa percepatan sentripetal $a = \frac{v^2}{r}$ dan arahnya selalu menuju pusat lingkaran ($\phi = \theta$).

Contoh 1.13

Berapakah percepatan sentripetal, dalam satuan g , yang dirasakan oleh seorang pilot yang menerbangkan pesawatnya dengan kelajuan $v = 2.500$ km/jam dalam lintasan lingkaran berjari-jari $r = 5,8$ km?

Jawab

Diketahui: $v = 2.500$ km/jam dan $r = 5,8$ km.

Berdasarkan persamaan percepatan sentripetal, didapatkan

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{(694 \text{ m/s})^2}{5.800 \text{ m}} = 83 \text{ m/s}^2 = 8,5g.$$

Contoh 1.14

Sebuah bola yang terikat bergerak dalam lingkaran horizontal yang berjari-jari 2 m. Bola membuat satu putaran dalam 3 s. Berapakah percepatan sentripetal bola tersebut?

Jawab

Diketahui: $r = 2$ m dan $T = 3$ s.

Untuk menentukan percepatan sentripetal, tentukan kecepatan linear terlebih dahulu dengan cara membagi panjang lintasan dengan waktu yang dibutuhkan untuk menempuh lintasan tersebut. Dalam kasus ini panjang lintasannya berupa keliling lingkaran dengan jari-jari r .

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi(2 \text{ m})}{3 \text{ s}} = 4,19 \text{ m/s}.$$

Jadi, besar percepatan sentripetal bola adalah

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{(4,19 \text{ m/s})^2}{2 \text{ m}} = 8,78 \text{ m/s}^2 = 0,9g.$$

Kata Kunci

- Gerak melingkar beraturan
- Percepatan sentripetal

Contoh 1.15

Sebuah mobil mengelilingi sebuah kurva berjari-jari 30 m. Jika percepatan sentripetal maksimum yang dapat diberikan oleh gesekan roda mobil adalah 5 m/s^2 , berapakah kelajuan maksimum mobil tersebut dalam km/jam?

Jawab

Diketahui: $r = 30 \text{ m}$ dan $a = 5 \text{ m/s}^2$.

$$a = \frac{v^2}{r}$$

$$\begin{aligned} v_{\text{maks}} &= \sqrt{ra_{\text{maks}}} \\ &= \sqrt{(30 \text{ m})(5 \text{ m/s}^2)} \\ &= 12,2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, kelajuan maksimum mobil dalam satuan km/jam adalah

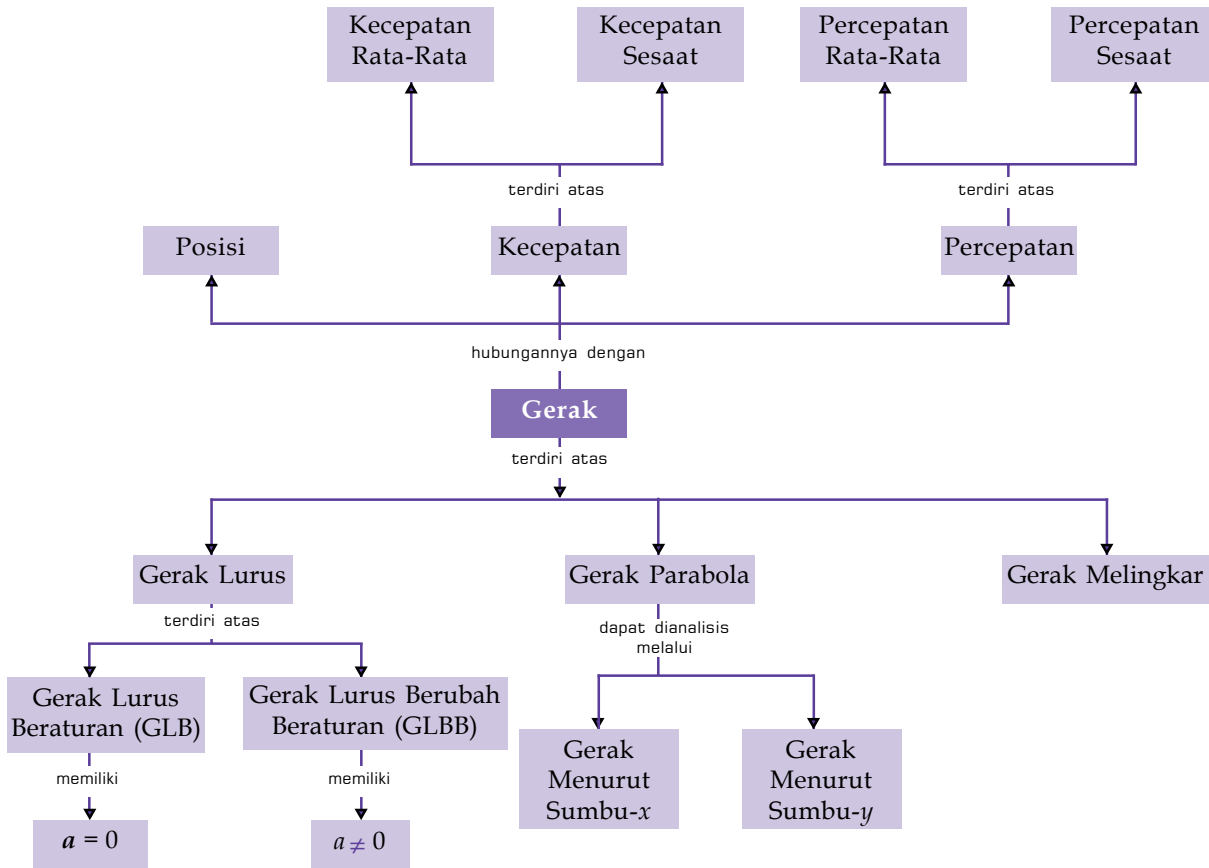
$$(12,2 \text{ m/s}) \left(\frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ jam}} \right) \left(\frac{1 \text{ km}}{1.000 \text{ m}} \right) = 44 \text{ km/jam.}$$

Soal Penguasaan Materi 1.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Orbit Bulan mengelilingi Bumi yang hampir bulat memiliki radius sekitar 384.000 km dan periode selama 27,3 hari. Tentukan percepatan Bulan terhadap Bumi.
- Sebuah batu 200 g diikat pada ujung tali dan diputar menempuh lingkaran horizontal berjari-jari 1,2 m dengan kecepatan putaran 3 putaran setiap sekon. Tentukan tegangan dalam tali itu.
- Jalan datar menikung dengan jari-jari 25 m. jika koefisien gesekan statis antara ban mobil dan permukaan jalan adalah 0,8 dan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, berapakah kecepatan maksimum yang diperkenankan pada tikungan itu?
- Dalam sebuah wahana putar di karnaval, penumpang bergerak dengan laju konstan dalam sebuah lingkaran berjari-jari 5 m. Mereka menyelesaikan satu putaran dalam 4 sekon. Berapakah percepatan penumpang?
- Partikel melakukan gerak melingkar beraturan dengan persamaan kecepatan $v = (-5 \sin \pi t)\mathbf{i} + (5 \cos \pi t)\mathbf{j} \text{ m/s}$. Berapakah besarnya kecepatan partikel tersebut?
- Partikel bergerak melingkar beraturan dengan persamaan kecepatan $v = (-40 \sin 2t)\mathbf{i} + (40 \cos 2t)\mathbf{j} \text{ cm/s}$. Jika jari-jari lintasannya 20 cm, berapakah percepatan partikel tersebut?
- Sebuah titik materi bergerak melingkar dengan kelajuan konstan sebesar 4 m/s dan jari-jari lintasannya 2 m. Tuliskanlah persamaan percepatan yang dialami oleh titik materi itu.
- Sebuah titik materi bergerak melingkar dengan kelajuan konstan mengalami percepatan 8 m/s^2 . Jika jari-jari lintasannya adalah 2 m, tuliskanlah persamaan percepatan yang dialami oleh titik materi itu.
- Percepatan yang dialami oleh suatu benda yang sedang bergerak melingkar dituliskan dalam bentuk $a = (-1,8 \cos 3t)\mathbf{i} + (-1,8 \sin 3t)\mathbf{j} \text{ m/s}^2$. Tentukan:
 - laju angulernya,
 - periode putarannya,
 - percepatan sentripetalnya,
 - jari-jari lintasannya, dan
 - besar kecepatan linearnya.
- Percepatan yang dialami oleh suatu benda yang sedang bergerak melingkar dituliskan dalam bentuk $a = (-4 \cos 4t)\mathbf{i} + (-4 \sin 4t)\mathbf{j} \text{ m/s}^2$. Tentukanlah laju linear benda tersebut.

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Gerak dalam Dua Dimensi, Anda dapat menganalisis gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola dengan menggunakan vektor. Jika Anda belum dapat menganalisis gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola dengan menggunakan vektor, Anda belum menguasai materi bab Gerak dalam Dua Dimensi dengan baik. Rumuskan materi

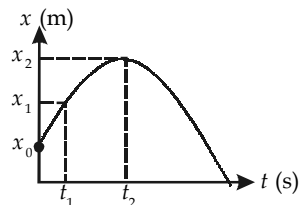
yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 1

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Sebuah titik materi bergerak dari titik C(2, -5) ke titik D(-3, 7). Vektor posisi titik materi itu ketika berada di titik C dan titik D adalah....
 - $r_C = -2i + 5j$ dan $r_D = -3i + 7j$
 - $r_C = -2i + 5j$ dan $r_D = 3i - 7j$
 - $r_C = 2i + 5j$ dan $r_D = 3i + 7j$
 - $r_C = 2i - 5j$ dan $r_D = 3i - 7j$
 - $r_C = 2i - 5j$ dan $r_D = -3i + 7j$
- Seekor semut yang sedang bergerak memiliki koordinat (3, 8)cm pada waktu $t = 0$ dan koordinat (-12, 28)cm pada waktu $t = 5$ sekon. Besar kecepatan rata-rata untuk selang waktu $t = 0$ sampai $t = 5$ sekon adalah
 - 2,5 cm/s
 - 3,0 cm/s
 - 4,0 cm/s
 - 4,5 cm/s
 - 5,0 cm/s
- Sebuah partikel sedang bergerak pada suatu bidang datar dengan sumbu koordinat x dan y . Posisi partikel itu berubah terhadap waktu mengikuti persamaan $r = (5 + 9t)i + (2 + 12t)j$ dengan r dalam meter dan t dalam sekon. Besar kecepatan rata-rata partikel dalam selang waktu $t = 0$ hingga $t = 2$ sekon adalah
 - 9 m/s
 - 12 m/s
 - 15 m/s
 - 18 m/s
 - 21 m/s
- Sebuah benda dilempar vertikal ke atas dengan persamaan lintasan $y = (30t - 5t^2)$ m. Apabila t dalam sekon dan $g = 10$ m/s², ketinggian maksimum yang dapat dicapai benda adalah
 - 15 m
 - 30 m
 - 45 m
 - 60 m
 - 75 m
- Sebuah benda bergerak pada bidang xy . Pada saat awal, benda itu berada pada koordinat (-3, 9) m. Komponen-komponen kecepatan benda memenuhi persamaan $v_x = 9 + 6t$ dan $v_y = 12 + 8t$ dengan v_x dan v_y dalam m/s, dan t dalam sekon. Perpindahan benda antara $t = 0$ sekon dan $t = 2$ sekon adalah
 - 30 m
 - 40 m
 - 50 m
 - 60 m
 - 70 m
- Suatu partikel sedang bergerak sepanjang sumbu- x . Kecepatan partikel sebagai fungsi waktu diberikan oleh persamaan $v = 6 + 12t$, dengan satuan v dalam m/s. Posisi partikel pada $t = 0$ adalah 6 m. Percepatan (m/s²) dan posisi benda (m) tersebut sebagai fungsi waktu adalah
 - $a = 6$ dan $r = 6t + 12t^2$
 - $a = 12$ dan $r = 6 + 6t + 12t^2$
 - $a = 12$ dan $r = 6 + 6t + 6t^2$
 - $a = 6$ dan $r = 6 + 6t + 12t^2$
 - $a = 6$ dan $r = 6 + 12t + 6t^2$

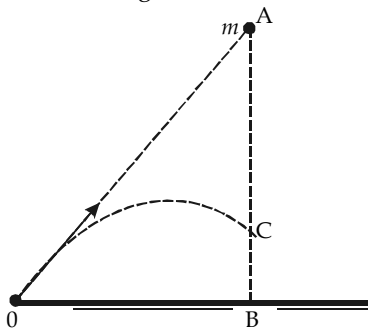
- Grafik berikut menggambarkan posisi x sebagai fungsi waktu t .



Dari grafik tersebut didapatkan kesimpulan berikut.

- Pada saat $t = t_1$, kecepatan benda $v > 0$.
 - Pada saat $t = t_2$, kecepatan benda maksimum.
 - Untuk $t_2 < t < t_3$, kecepatan benda $v < 0$.
 - Perpindahan benda sama dengan luas daerah di bawah kurva.
- Pernyataan yang benar adalah
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4 saja
 - semua benar
- Sebuah benda bergerak dengan persamaan kecepatan awal $v_0 = (8i + 6j)$ m/s. Jika benda mengalami percepatan $a = (8i + 6j)$ m/s² dan persamaan posisi awal benda $r_0 = (i + 2j)$ m, perpindahan benda antara $t = 0$ sampai $t = 6$ sekon adalah
 - 210 m
 - 220 m
 - 230 m
 - 240 m
 - 250 m
 - Made menembakkan peluru dengan kecepatan awal 120 m/s dan sudut elevasi 30°. Jika $g = 10$ m/s², peluru mencapai titik tertinggi setelah
 - 4 s
 - 5 s
 - 6 s
 - 7 s
 - 8 s
 - Ajeng melemparkan sebuah bola dengan sudut elevasi 75°. Agar jarak mendarat yang dicapai bola adalah sejauh 20 m, kecepatan awal pelemparan yang harus diberikan Ajeng adalah
 - 20 m/s
 - 25 m/s
 - 30 m/s
 - 40 m/s
 - 45 m/s
 - Sebuah benda dilemparkan ke atas dengan sudut elevasi α . Kecepatan di setiap titik pada lintasan benda tersebut dapat diuraikan menjadi komponen vertikal dan horizontal, yaitu
 - komponen vertikal berturut-turut makin kecil
 - komponen vertikal berturut-turut tetap
 - komponen horizontal berturut-turut makin besar
 - komponen horizontal berturut-turut tetap
 - komponen horizontal berturut-turut makin kecil, kemudian semakin besar

12. Ukok melemparkan bola ke atas dengan kecepatan awal 40 m/s dan sudut elevasi 30° . Bola akan melayang di udara selama
- 2 s
 - $2\sqrt{3}$ s
 - 4 s
 - $4\sqrt{3}$ s
 - 6 s
13. Asep ingin menembak titik sasaran yang berada beberapa meter di atas tanah dan dalam batas jarak tembak terjauh. Asep membidik sedemikian rupa sehingga titik sasaran berada pada garis perpanjangan laras senapan. Pada kedudukan membidik ini, senapan membentuk sudut miring dengan garis mendatar. Jika peluru ditembakkan, peluru akan ...
- tepat mengenai titik sasaran
 - tidak mengenai titik sasaran, karena peluru lewat di atasnya
 - tidak mengenai titik sasaran, karena peluru lewat di bawahnya
 - peluru mengenai titik sasaran, pada saat peluru melintas turun
 - semakin besar kecepatan peluru, semakin besar jarak antara titik sasaran terhadap lintasan
14. Apabila besar sudut antara arah horizontal dan arah tembak suatu peluru adalah 53° , perbandingan antara jarak tembak dalam arah mendatar dengan tinggi maksimum peluru adalah
- 2 : 3
 - 3 : 4
 - 1 : 3
 - 4 : 3
 - 3 : 1
15. Andi yang bermassa 40 kg duduk di atas atap mobil yang melaju dengan kecepatan 10 m/s. Tinggi titik berat Andi 1,8 m dari tanah dan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Tibatiba, mobil berhenti. Jika Andi dapat dianggap sebagai titik massa pada titik beratnya dan gesekan diabaikan maka Andi akan ...
- tetap berada di atas atap mobil
 - terlempar sejauh 1,8 m di depan mobil
 - terlempar sejauh 6 m di depan mobil
 - terlempar sejauh 10 m di depan mobil
 - terjatuh sejauh 1,8 m di belakang mobil
16. Perhatikanlah gambar berikut ini.



Sebuah benda kecil, m , dijatuhkan dari titik A yang jarak tegak lurus nya 30 m di atas B. Pada saat yang sama, sebuah proyektil ditembakkan dari titik O dengan laju 25 m/s dan diarahkan ke titik A. Titik C berada di ketinggian 10 m di atas B. Jika jarak OB adalah 40 m maka:

- benda m mencapai titik C saat $t = 2$ s;
 - proyektil juga melewati titik C;
 - proyektil mencapai titik tertinggi saat $t = 1,5$ s; dan
 - proyektil mengenai benda m .
- Pernyataan yang benar adalah
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4 saja
 - semua benar
17. Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan awal 20 m/s dari puncak menara setinggi 400 m dengan arah membentuk sudut 30° terhadap garis mendatar. Jarak terjauh peluru tersebut tiba di tanah, apabila dihitung dari dasar menara adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
- 50 m
 - $50\sqrt{2}$ m
 - 100 m
 - $100\sqrt{3}$ m
 - $200\sqrt{3}$ m
18. Sebuah partikel bergerak melingkar dengan kecepatan sudut 180 rpm. Kecepatan putarannya dalam rad/s adalah
- $3,0\pi$
 - 15π
 - $6,0\pi$
 - 60π
 - 12π
19. Sebuah benda berotasi dengan persamaan posisi sudut $\theta = (2t^2 + 4t - 5)$ rad. Kecepatan sudut rata-rata benda tersebut dalam selang waktu $t = 1$ sekon sampai $t = 3$ sekon adalah
- 4 rad/s
 - 6 rad/s
 - 8 rad/s
 - 10 rad/s
 - 12 rad/s
20. Sebuah benda berotasi dengan persamaan posisi sudut $\theta = (3t^2 + 2t + 6)$ rad. Kecepatan sudut benda pada saat $t = 3$ sekon adalah
- 8 rad/s
 - 12 rad/s
 - 16 rad/s
 - 20 rad/s
 - 24 rad/s



B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Sebuah benda dilempar ke udara dengan persamaan kecepatan, $\mathbf{v} = 20\mathbf{i} + (20 - 10t)\mathbf{j}$. Apabila posisi awal benda di titik $(0, 0)$ tentukanlah:
 - vektor posisi benda,
 - posisi benda saat $t = 1$ sekon,
 - waktu yang diperlukan untuk mencapai tinggi maksimum,
 - ketinggian maksimum yang dicapai benda, dan
 - jarak mendatar maksimum yang dapat dicapai oleh benda.
- Sebuah pesawat tempur F-16 menukik ke bawah dengan sudut 37° terhadap arah horizontal dan melepaskan bom dari ketinggian 730 m di atas tanah. Lima sekon kemudian, bom tiba di tanah. Jika besar $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah:
 - laju pesawat tempur saat melepas bom, dan
 - jarak mendatar yang ditempuh bom hingga bom tersebut tiba di tanah?
- Posisi peluru yang ditembakkan di atas bidang datar dengan sudut elevasi tertentu dinyatakan oleh persamaan $\mathbf{r} = [(180t)\mathbf{i} + (240t - 5t^2)\mathbf{j}] \text{ m}$. Jika \mathbf{i} dan \mathbf{j} menyatakan vektor satuan dalam arah x dan y , serta t dalam sekon, tentukanlah:
 - kecepatan awal peluru,
 - sudut elevasi tembakan,
 - kecepatan peluru di titik tertinggi,
 - tinggi maksimum yang dicapai peluru, dan
 - jarak mendatar maksimum tembakan.
- Suatu satelit Bumi bergerak melingkar sejarak 640 km dari permukaan Bumi. Periode satelit itu adalah 98 menit. Hitunglah:
 - kelajuan satelit, dan
 - besarnya percepatan sentripetal satelit.
- Berapakah besar percepatan seorang pelari yang berlari dengan kecepatan 10m/s saat ia melewati tikungan yang berjari-jari 25 m?





2

B a b 2

Gravitasi

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis gejala alam dan keteraturannya dalam cakupan mekanika benda titik dengan cara menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan Hukum-Hukum Newton.

Gambar tersebut merupakan gambar *orrery*, yaitu suatu model mekanik tata surya yang tertata teratur. Semua benda yang berada di alam semesta telah diatur oleh Tuhan Yang Maha Kuasa agar selalu beredar teratur menurut orbitnya masing-masing.

Dalam Fisika, gaya yang berperan penting menjaga keteraturan gerak planet-planet dan interaksi antarbenda ini disebut gaya gravitasi. Gaya gravitasi ini sangat sulit diamati, jika massa objek pengamatannya jauh lebih kecil daripada massa planet-planet. Akibatnya, Anda akan sangat sulit mengetahui berapa besar gaya gravitasi yang terjadi antara Anda dan benda-benda di sekitar Anda. Namun, Anda akan dapat dengan mudah menentukan besar gaya gravitasi yang tercipta antara Bumi dan Bulan. Dalam pembahasan materi Bab 2 ini, Anda akan mempelajari tentang gaya gravitasi dengan lebih rinci, melalui hukum-hukum yang dinyatakan oleh Johannes Kepler dan Isaac Newton.

- A. Hukum-Hukum Kepler**
- B. Gaya Gravitasi**

Soal Pramateri

1. Jelaskanlah tentang Hukum Ketiga Newton
2. Massa seorang astronot di Bumi adalah 80 kg. Berapakah berat astronot tersebut di Bulan yang percepatan gravitasinya satu per enam percepatan gravitasi Bumi? ($g_{\text{Bumi}} = 10 \text{ m/s}^2$)
3. Berdasarkan pemahaman Anda, bagaimanakah bentuk orbit planet tata surya saat mengelilingi Matahari?

A Hukum-Hukum Kepler

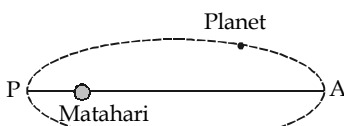
Ilmu perbintangan atau astronomi telah dikenal oleh manusia sejak beribu-ribu tahun yang lalu. Sejak dahulu, gerakan bintang-bintang dan planet yang terlihat bergerak relatif terhadap Bumi telah menarik perhatian para ahli astronomi sehingga planet-planet dan bintang-bintang tersebut dijadikan sebagai objek penyelidikan. Hasil penyelidikan mereka mengenai pergerakan planet-planet dan bintang tersebut, kemudian dipetakan ke dalam suatu bentuk model alam semesta. Dalam perkembangannya, beberapa model alam semesta telah dikenalkan oleh para ahli astronomi.

Sebuah model alam semesta yang dikenalkan oleh **Ptolomeus** sekitar 140 Masehi, menyatakan bahwa Bumi berada di pusat alam semesta. Matahari dan bintang-bintang bergerak mengelilingi Bumi dalam lintasan lingkaran besar yang terdiri atas lingkaran-lingkaran kecil (*epicycle*). Model alam semesta Ptolomeus ini berdasarkan pada pengamatan langsung gerakan relatif bintang dan planet-planet yang teramati dari Bumi. Model alam semesta Ptolomeus ini disebut juga model geosentris.

Pada 1543 Masehi, **Copernicus** mengenalkan model alam semesta yang disebut model Copernicus. Pada model ini, Matahari dan bintang-bintang lainnya diam, sedangkan planet-planet (termasuk Bumi) bergerak mengelilingi Matahari. Hal ini dituliskannya melalui buku yang berjudul *De revolutionibus orbium coelestium* (Menegenai revolusi orbit langit). Model Copernicus ini disebut juga model heliosentris.

Model alam semesta selanjutnya berkembang dari model heliosentris. **Tycho Brahe**, seorang astronom Denmark, berhasil membuat atlas bintang modern pertama yang lengkap pada akhir abad ke-16. Model alam semesta yang dibuat oleh Tycho Brahe ini dianggap lebih tepat dibandingkan dengan model-model yang terdahulu karena model ini berdasarkan pada hasil pengamatan dan pengukuran posisi bintang-bintang yang dilakukannya di observatorium. Observatorium yang dibangun oleh Tycho Brahe ini merupakan observatorium pertama di dunia.

Penelitian Tycho Brahe ini, kemudian dilanjutkan oleh **Johannes Kepler**. Melalui data dan catatan astronomi yang ditinggalkan oleh Tycho Brahe, Kepler berhasil menemukan tiga hukum empiris tentang gerakan planet. Hukum Kepler tersebut dinyatakan sebagai berikut.



Gambar 2.1

Lintasan planet mengitari Matahari berbentuk elips.



Gambar 2.2

Luas juring yang dihasilkan planet dalam mengelilingi Matahari adalah sama untuk selang waktu yang sama.

1. Hukum Pertama Kepler

Setiap planet bergerak pada lintasan elips dengan Matahari berada pada salah satu titik fokusnya.

2. Hukum Kedua Kepler

Garis yang menghubungkan Matahari dengan planet dalam selang waktu yang sama menghasilkan luas juring yang sama.

3. Hukum Ketiga Kepler

Kuadrat waktu edar planet (*periode*) berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak planet itu dari Matahari.

$$T^2 \approx r^3 \rightarrow \frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{r_2^3}{r_1^3} \quad (2-1)$$

dengan: T = periode planet mengelilingi Matahari, dan
 r = jarak rata-rata planet terhadap Matahari.

Johannes Kepler
(1571-1630)

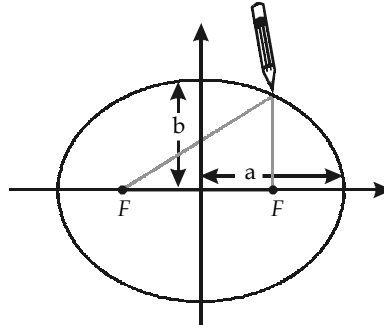
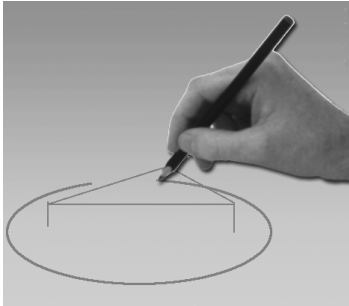


Johannes Kepler adalah seorang pakar matematika dan astronomi yang berasal dari Jerman. Berkat kesungguhannya dalam melakukan penelitian, ia berhasil menemukan Hukum Kepler mengenai bentuk lintasan atau orbit planet-planet.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Kerjakanlah 2.1

Anda dapat membuat gambar sebuah elips dengan cara menancapkan dua jarum atau dua paku payung pada kertas atau papan, kemudian menghubungkannya dengan ikatan benang. Ikatan benang ini digunakan untuk mengatur pensil Anda, seperti yang ditunjukkan pada gambar. Kedua jarum merupakan titik fokus elips, jarak a dinamakan sumbu semimayor, dan jarak b dinamakan sumbu semiminor.



Contoh 2.1

Jika perbandingan jarak planet X ke Matahari dengan jarak Bumi ke Matahari 9 : 1, hitunglah waktu yang dibutuhkan oleh planet X untuk satu kali mengedari Matahari.

Jawab

Diketahui $r_x : r_b = 9 : 1$

$$\left(\frac{T_x}{T_b}\right)^2 = \left(\frac{r_x}{r_b}\right)^3 \rightarrow T_x = T_b \left(\frac{r_x}{r_b}\right) \sqrt{\frac{r_x}{r_b}} = 1 \times \left(\frac{9}{1}\right) \sqrt{\frac{9}{1}} = 27 \text{ tahun}$$

Soal Penguasaan Materi 2.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Jarak rata-rata Jupiter dari Matahari adalah 5,20 satuan astronomi (AU). 1 AU = $1,50 \times 10^{11}$ m adalah jarak rata-rata antara Bumi dan Matahari. Berapakah periode Jupiter?
- Periode Neptunus adalah 164,8 tahun. Berapakah jarak rata-ratanya dari Matahari?

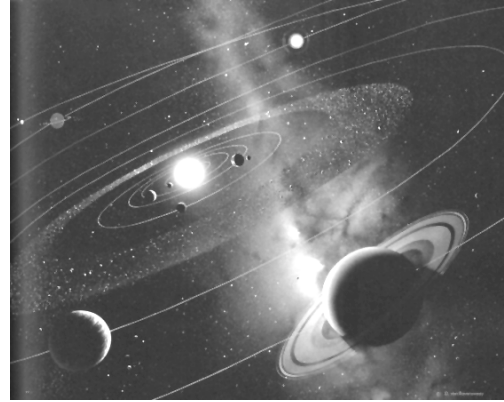
B Gaya Gravitasi

1. Hukum Gravitasi Newton

Gejala munculnya interaksi yang berupa gaya tarik-menarik antarbenda yang ada di alam ini disebut gaya gravitasi. Setiap benda di alam ini mengalami gaya gravitasi. Jika Anda sedang duduk di kursi, sedang berjalan, atau sedang melakukan kegiatan apapun, terdapat gaya gravitasi yang bekerja pada Anda. Gaya gravitasi merupakan gaya interaksi antarbenda. Pernahkah Anda bertanya kenapa gaya gravitasi yang Anda alami tidak menyebabkan benda-benda yang terdapat di sekitar Anda tertarik ke arah Anda, atau sebaliknya? Di alam semesta, gaya gravitasi menyebabkan planet-planet, satelit-satelit, dan benda-benda langit lainnya bergerak mengelilingi Matahari dalam sistem tata surya dalam lintasan yang tetap.

Kata Kunci

- Hukum Pertama Kepler
- Hukum Kedua Kepler
- Hukum Ketiga Kepler



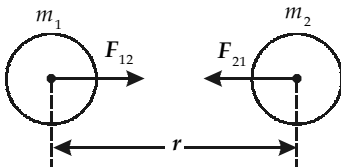
Sumber: universe-review.ca

Gambar 2.3

Gaya gravitasi mengikat planet-planet dan benda langit lainnya untuk tetap beredar menurut orbitnya.

Isaac Newton adalah orang pertama yang mengemukakan gagasan tentang adanya gaya gravitasi. Menurut cerita, gagasan tentang gaya gravitasi ini diawali dari pengamatan Newton pada peristiwa jatuhnya buah apel dari pohonnya. Kemudian, melalui penelitian lebih lanjut mengenai gerak jatuhnya benda-benda, ia menyimpulkan bahwa apel dan setiap benda jatuh karena tarikan Bumi.

Menurut Newton, gaya gravitasi antara dua benda merupakan gaya tarik-menarik yang berbanding lurus dengan massa setiap benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara benda tersebut. Secara matematis, pernyataan mengenai gaya gravitasi tersebut dituliskan sebagai berikut.



Gambar 2.4

Gaya gravitasi F adalah gaya yang ditimbulkan karena adanya dua benda bermassa m yang terpisah sejauh r .

$$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r}$$

$$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r}$$

$$F_{21} = F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (2-2)$$

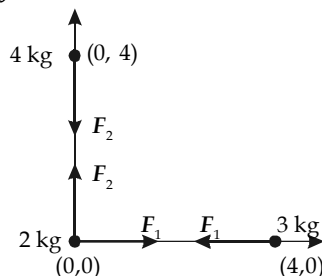
dengan: F = gaya gravitasi (N),
 G = konstanta gravitasi = $6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2$, dan
 r = jarak antara pusat massa m_1 dan m_2 (m).

Contoh 2.2

Tiga benda homogen masing-masing bermassa 2 kg, 3 kg, dan 4 kg, berturut-turut terletak pada koordinat (0, 0), (4, 0), dan (0, 4) dalam sistem koordinat Cartesius dengan satuan meter. Tentukanlah:

- gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 3 kg,
- gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 4 kg, dan
- gaya gravitasi total pada benda 2 kg.

Jawab



Diketahui: $m_1 = 2 \text{ kg}$ di (0, 0), $m_2 = 3 \text{ kg}$ di (4, 0), dan $m_3 = 4 \text{ kg}$ di (0, 4).

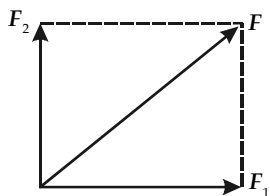
a. Gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 3 kg.

$$\begin{aligned} F_1 &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \\ &= (6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2) \frac{(2\text{kg})(3\text{kg})}{(4\text{m})^2} \\ &= 2,502 \times 10^{-11} \text{ N} \end{aligned}$$

Perlu Anda

Ketahui

Ketika besaran vektor hanya menyatakan nilainya saja, besaran vektor tersebut harus dituliskan secara skalar, seperti terlihat pada contoh soal.



b. Gaya gravitasi antara benda 2 kg dan 4 kg.

$$F_2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2) \frac{(2 \text{ kg})(4 \text{ kg})}{(4 \text{ m})^2}$$

$$= 3,336 \times 10^{-11} \text{ N}$$

c. Gaya gravitasi total pada benda 2 kg. Benda bermassa 2 kg mengalami dua gaya sekaligus, yaitu F_1 dan F_2 , seperti terlihat pada gambar. Gaya gravitasi total pada benda 2 kg adalah resultan gaya F_1 dan F_2 , yaitu

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

$$= \sqrt{(2,502 \times 10^{-11} \text{ N})^2 + (3,336 \times 10^{-11} \text{ N})^2}$$

$$= 4,170 \times 10^{-11} \text{ N}$$

Contoh 2.3

Dua benda masing-masing bermassa 6 kg dan 3 kg berjarak 30 cm. Berapakah besar gaya tarik-menarik antara kedua benda tersebut?

Jawab

Diketahui: $m_1 = 6 \text{ kg}$, $m_2 = 3 \text{ kg}$, dan $r = 30 \text{ cm}$.

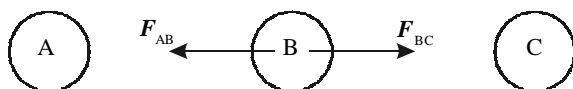
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2 \frac{(6 \text{ kg})(3 \text{ kg})}{(0,3 \text{ m})^2} = 1,334 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Contoh 2.4

Tiga benda masing-masing bermassa $m_A = 4,5 \text{ kg}$, $m_B = 2 \text{ kg}$, dan $m_C = 8 \text{ kg}$ terletak pada satu garis lurus. Berapakah besar gaya gravitasi yang dialami benda B yang terletak di antara benda A dan benda C, jika jarak $AB = 30 \text{ cm}$ dan jarak $BC = 40 \text{ cm}$?

Jawab

Diketahui: $m_A = 4,5 \text{ kg}$, $m_B = 2 \text{ kg}$, $m_C = 8 \text{ kg}$, $r_{AB} = 30 \text{ cm}$, dan $r_{BC} = 40 \text{ cm}$.



$$F_B = F_{BC} - F_{AB} = G \frac{m_B m_C}{r_{BC}^2} - G \frac{m_A m_B}{r_{AB}^2} = 0$$

Sekarang akan ditunjukkan bahwa Hukum Gravitasi Newton menunjuk pada Hukum Ketiga Kepler untuk kasus khusus orbit lingkaran. Sebuah planet yang bergerak mengelilingi Matahari dengan kelajuan dalam orbit berjari-jari lingkaran mendapat gaya tarik dari Matahari yang arahnya ke pusat lingkaran sehingga planet tersebut memiliki percepatan sentripetal.

Sesuai dengan Hukum Kedua Newton tentang gerak, didapatkan persamaan berikut.

$$F = ma$$

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$G \frac{M}{r} = v^2$$

$$G \frac{M}{r} = \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^2$$

Jelajah Fisika

Sir Isaac Newton (1642–1727)



Newton lahir di Woolsthorpe, Lincolnshire pada 25 Desember 1642. Banyak teori yang telah dihasilkannya melalui kerja keras, ketekunan, dan ketelitiannya dalam menyelidiki fenomena yang terjadi di lingkungan sekitarnya. Salah satu teorinya yang paling terkenal adalah teori tentang gerak, yaitu Hukum Newton dan teori tentang gaya gravitasi universal. Bukunya yang sangat terkenal adalah Principia. Ia meninggal di Kensington pada 20 Maret 1727 dan dimakamkan secara kenegaraan di Westminster Abbey.

Sumber: web.hao.ucar.edu



Sumber: *conceptual physics*, 1998

Gambar 2.5

Di luar medan gravitasi Bumi, astronot dapat melayang di angkasa.

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM} \right) r^3 \rightarrow T^2 \sim r^3 \quad \text{atau} \quad \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (2-3)$$

Untuk orbit berbentuk elips, variabel jari-jari diganti dengan jarak rata-rata antara planet dan Matahari.

2. Medan Gravitasi

Medan gravitasi adalah ruang yang masih dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Besar medan gravitasi sama dengan gaya gravitasi setiap satuan massa. Secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$g = \frac{F}{m} \quad (2-4)$$

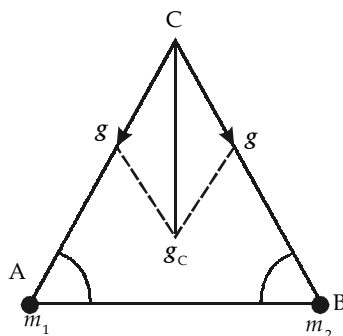
Dengan mengganti nilai F pada **Persamaan (2-4)** dengan persamaan gaya tarik gravitasi **Persamaan (2-2)**, akan diperoleh

$$g = G \frac{m}{r^2} \mathbf{r} \quad (2-5)$$

Kuat medan gravitasi g sering disebut percepatan gravitasi dan merupakan besaran vektor. Apabila medan gravitasi tersebut ditimbulkan oleh lebih dari satu benda, kuat medan yang ditimbulkan oleh gaya-gaya tersebut pada suatu titik harus ditentukan dengan cara menjumlahkan vektor-vektor kuat medannya.

Contoh 2.5

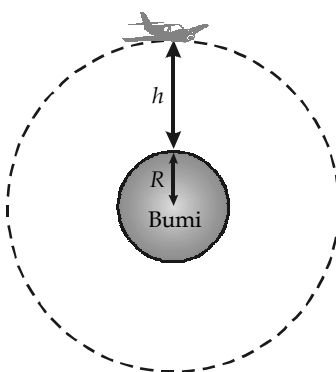
Pada titik sudut A dan titik sudut B dari sebuah segitiga sama sisi ABC disimpan benda bermassa m_1 dan m_2 . Jika $m_1 = m_2$ dan kuat medan gravitasi di titik C oleh salah satu benda adalah g , tentukanlah kuat medan gravitasi di titik C yang disebabkan kedua benda tersebut.



Jawab

Diketahui $m_1 = m_2$ dan ABC = segitiga sama sisi. Medan gravitasi di titik C merupakan resultan dari medan gravitasi yang diakibatkan oleh m_1 dan m_2 , masing-masing sebesar g .

$$\begin{aligned} g_c &= \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + 2g_1g_2 \cos 60^\circ} \\ &= \sqrt{g^2 + g^2 + 2g^2 \left(\frac{1}{2} \right)} \\ &= \sqrt{g^2 + g^2 + g^2} = \sqrt{3g^2} = g\sqrt{3} \end{aligned}$$



Gambar 2.6

Percepatan gravitasi pada ketinggian h di atas permukaan Bumi.

Percepatan gravitasi di permukaan Bumi (jari-jari bumi = R) berbeda dengan percepatan gravitasi pada ketinggian tertentu (h) di atas permukaan Bumi. Jika percepatan gravitasi di permukaan Bumi g dan percepatan gravitasi pada ketinggian h di atas permukaan bumi g_a , maka hubungannya dapat ditentukan dari persamaan :

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad \text{dan} \quad g_a = G \frac{M}{(R+h)^2} \quad (2-6)$$

sehingga menghasilkan persamaan :

$$\frac{g_a}{g} = \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \quad \text{atau} \quad g_a = g \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \quad (2-7)$$

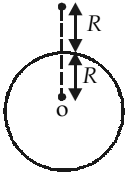
Contoh 2.6

Percepatan gravitasi pada suatu tempat di permukaan Bumi adalah 10 m/s^2 . Tentukanlah percepatan gravitasi di tempat yang memiliki ketinggian R dari permukaan Bumi (R adalah jari-jari bumi).

Jawab

Diketahui: $g_A = 10 \text{ m/s}^2$, dan $h = R$.

Percepatan gravitasi pada ketinggian R di atas permukaan Bumi adalah



$$g_a = g \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 = g \left(\frac{R}{R+R} \right)^2 = g \left(\frac{R}{2R} \right)^2 = \frac{1}{4} g = 2,5 \text{ m/s}^2.$$

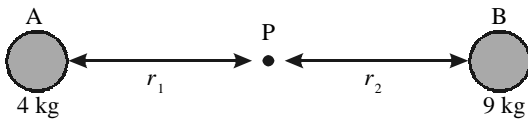
Contoh 2.7

Dua benda bermassa masing-masing 4 kg dan 9 kg terpisah dengan jarak 10 m . Titik P berada pada garis hubung kedua benda. Jika medan gravitasi di titik P adalah nol, tentukanlah jarak titik P dari benda bermassa 4 kg .

Jawab

Diketahui: $m_1 = 4 \text{ kg}$, $m_2 = 9 \text{ kg}$, dan $r = 10 \text{ m}$.

Dari soal dapat digambarkan kedudukan titik P terhadap kedua benda.



Agar medan gravitasi di titik P bernilai nol maka:

$$g_1 = g_2$$

$$G \frac{m_A}{r_1^2} = G \frac{m_B}{r_2^2} \rightarrow G \frac{4 \text{ kg}}{r_1^2} = G \frac{9 \text{ kg}}{(10 - r_1)^2}, \text{ G dicoret dan hasilnya diakarkan sehingga}$$

$$\begin{aligned} \text{diperoleh: } \quad \frac{2}{r_1} &= \frac{3}{10 - r_1} \\ 20 - r_1 &= 3r_1 \\ r_1 &= 5 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Kecepatan Satelit Mengelilingi Bumi

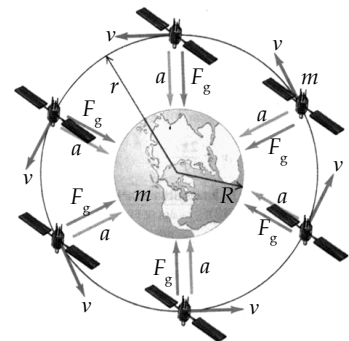
Sebuah satelit berada pada ketinggian h di atas permukaan Bumi yang memiliki jari-jari R . Satelit tersebut bergerak mengelilingi Bumi dengan kecepatan v . Satelit mendapatkan gaya gravitasi sebesar mg_a yang arahnya menuju pusat Bumi, ketika satelit bergerak melingkar mengitari Bumi. Gaya yang bekerja pada sebuah benda yang sedang bergerak melingkar dan arahnya menuju pusat lingkaran disebut gaya sentripetal. Melalui penurunan persamaan gerak melingkar, diperoleh persamaan berikut.

$$m \frac{v^2}{(R+h)} = mg_a$$

$$\frac{v^2}{(R+h)} = g \frac{R^2}{(R+h)^2}$$

Kecepatan satelit mengelilingi Bumi dapat dituliskan dengan persamaan:

$$v = \frac{R}{(R+h)} \sqrt{g(R+h)} \quad (2-8)$$



Gambar 2.7

Gaya gravitasi Bumi menghasilkan percepatan sentripetal yang menahan satelit pada orbitnya.



Substitusikan besar g dari **Persamaan (2-5)** sehingga dihasilkan

$$v = \frac{R}{(R+h)} \sqrt{G \frac{M}{R^2} (R+h)} \quad (2-9)$$

Dengan demikian, kecepatan satelit saat mengelilingi Bumi dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$v = \frac{1}{(R+h)R} \sqrt{GM(R+h)} \quad (2-10)$$

Contoh 2.8

Sebuah satelit mengorbit Bumi pada jarak 3.600 km di atas permukaan Bumi. Jika jari-jari Bumi = 6.400 km, percepatan gravitasi dipermukaan Bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan gerak satelit dianggap melingkar beraturan, hitung kelajuan satelit dalam km/s.

Jawab

Satuan kelajuan yang diharapkan adalah km/s maka percepatan gravitasi di permukaan Bumi g harus diubah dulu dari m/s^2 menjadi km/s^2 dan diperoleh $g = 0,01 \text{ km/s}^2$. Kelajuan satelit mengorbit Bumi dapat dihitung dengan persamaan:

$$v = \frac{R}{(R+h)} \sqrt{g(R+h)}$$

$$v = \frac{6.400 \text{ km}}{(6.400 + 3.600) \text{ s}} \sqrt{(0,01 \text{ km/s}^2)(6.400 + 3.600) \text{ km}}$$

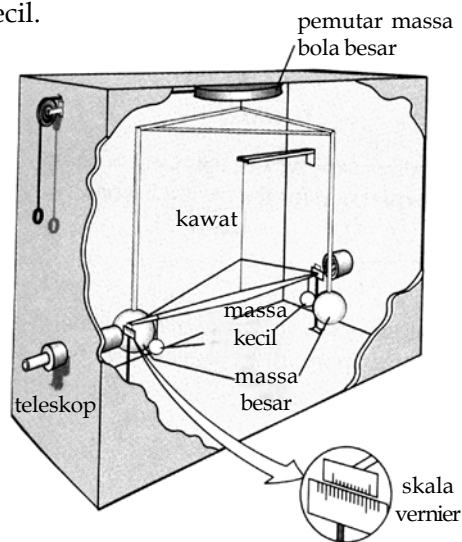
$$v = 6,4 \text{ km/s}$$

Kata Kunci

- Gaya Gravitasi
- Hukum Gravitasi Newton
- Medan Gravitasi
- Percepatan Gravitasi

4. Pengukuran Konstanta Gravitasi Universal

Nilai tetapan semesta G yang sebelumnya tidak dapat ditentukan oleh Newton, ditentukan melalui percobaan yang dilakukan oleh seorang ilmuwan Inggris bernama **Henry Cavendish** pada 1798 dengan ketelitian sebesar 99%. Percobaan yang dilakukan Cavendish menggunakan sebuah neraca yang disebut Neraca Cavendish. Neraca tersebut dapat mengukur besar gaya putar yang diadakan pada lengan gayanya. Gambar berikut adalah sketsa dari peralatan Cavendish yang digunakan untuk mengukur gaya gravitasi antara dua benda kecil.

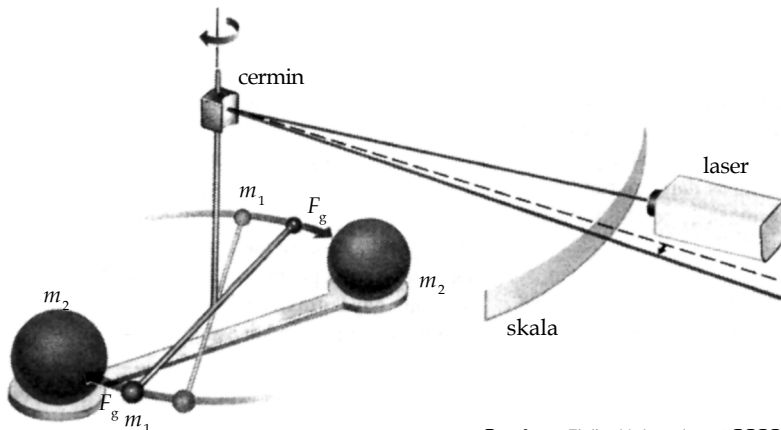


Gambar 2.8

Skema Neraca Cavendish

Sumber: Contemporary College Physics, 1998

Untuk memahami prinsip kerja lengan gaya yang terdapat pada Neraca Cavendish, perhatikanlah **Gambar 2.9** berikut .



Sumber: Fisika Universitas 1,2000

Gambar 2.9

Skema lengan gaya pada neraca Cavendish dan uraian gaya gravitasi yang bekerja pada kedua jenis bola.

Dua bola kecil, masing-masing dengan massa m_1 , diletakkan di ujung batang ringan yang digantungkan pada seutas tali halus. Di samping bola-bola kecil tersebut, digantungkan bola-bola besar dengan massa m_2 . Apabila tali penggantung massa m_1 dipuntir dengan sudut sebesar θ dan besar m_2 , m_1 , serta jarak antara kedua massa itu (d) diketahui, besarnya G dapat dihitung.

Beberapa metode dan alat ukur telah dikembangkan oleh para ilmuwan untuk mendapatkan nilai konstanta gravitasi yang lebih akurat. Walaupun G adalah suatu konstanta Fisika pertama yang pernah diukur, konstanta G tetap merupakan konstanta yang dikenal paling rendah tingkat ketelitiannya. Hal ini disebabkan tarikan gravitasi yang sangat lemah sehingga dibutuhkan alat ukur yang sangat peka agar dapat mengukur nilai G dengan teliti. Hingga saat ini , nilai konstanta gravitasi universal G yang didapatkan oleh Cavendish, yaitu $(6,70 \pm 0,48) \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ tidak jauh berbeda dengan nilai G yang didapat oleh para ilmuwan modern, yaitu $6,673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Tabel 2.1 berikut memperlihatkan nilai konstanta gravitasi universal G yang dihasilkan oleh beberapa ilmuwan serta metode yang digunakannya.

Tabel 2.1 Pengukuran G

Pengamat	Tahun	Metode	G ($10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$)
Cavendish	1798	Timbangan torsi, penyimpangan	6,754
Poynting	1891	Timbangan biasa	6,698
Boys	1895	Timbangan torsi, penyimpangan	6,658
Von Eotos	1896	Timbangan torsi, penyimpangan	6,65
Heyl	1930	Timbangan torsi, periode	
		Emas	6,678
		Platinum	6,664
		Kaca	6,674
Zahrandicek	1933	Timbangan torsi, resonansi	6,659
Heyl dan Chrzanowski	1942	Timbangan torsi, periode	6,673
Luter dan Towler	1982	Timbangan torsi, periode	6,6726

Sumber: Fisika Universitas 1, 2000

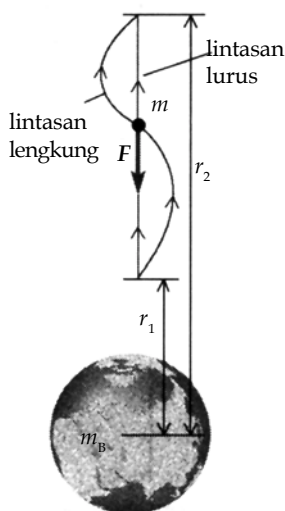
Perlu Anda

Ketahui

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} dr = \int_{r_1}^{r_2} r^{-2} dr$$

$$= -r^{-1} \Big|_{r_1}^{r_2}$$

$$= \left(-\frac{1}{r_2}\right) - \left(-\frac{1}{r_1}\right)$$

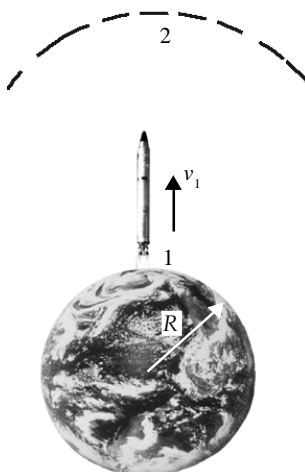


Gambar 2.10

Usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi ketika sebuah benda bergerak dari r_1 ke r_2 . Usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi tersebut adalah sama, tidak bergantung pada bentuk lintasannya (lurus atau lengkung).

Gambar 2.11

Sebuah roket lepas landas dari permukaan Bumi (posisi 1) dengan kecepatan v_1 menuju orbit (posisi 2).



5. Energi Potensial Gravitasi

Gaya gravitasi Bumi yang bekerja pada benda bermassa m yang terletak pada suatu titik di luar Bumi diberikan oleh persamaan $F = -G \frac{Mm}{r^2}$. Tanda negatif menunjukkan bahwa gaya F mengarah ke pusat Bumi. Usaha yang dihasilkan oleh gaya gravitasi jika benda bergerak langsung dari atau menuju pusat Bumi dari $r = r_1$ ke $r = r_2$ diberikan oleh

$$W_{\text{grav}} = \int_{r_1}^{r_2} F_r dr = \int_{r_1}^{r_2} \left(-G \frac{Mm}{r^2}\right) dr = G \frac{Mm}{r_2} - G \frac{Mm}{r_1}$$

Dengan membandingkan persamaan $W_{\text{grav}} = G \frac{Mm}{r_2} - G \frac{Mm}{r_1} = EP_1 - EP_2$ maka definisi yang tepat untuk energi potensial gravitasi adalah

$$EP = -G \frac{Mm}{r} \quad (2-11)$$

Tanda negatif menyatakan bahwa untuk membawa benda bermassa m ke tempat jauh tak terhingga dibutuhkan usaha atau energi sebesar $G \frac{Mm}{r}$.

Contoh 2.9

Dua benda bermassa m dan $3m$ dipisahkan oleh suatu jarak a . Tentukan Energi potensial gravitasi sistem.

Jawab

Diketahui: $m = m$, $M = 3m$, $r = a$

Energi potensial gravitasi

$$EP = -G \frac{Mm}{r} = -G \frac{(3m)(m)}{a} = -3G \frac{m^2}{a}$$

6. Kecepatan Lepas dari Bumi

Apakah mungkin sebuah benda yang digerakkan atau ditembakkan vertikal ke atas tidak kembali ke Bumi? Jika mungkin terjadi, berapa kecepatan minimum benda tersebut saat di tembakkan agar terlepas dari pengaruh gravitasi Bumi? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, perhatikanlah gambar sebuah roket yang sedang lepas landas pada **Gambar 2.11** berikut.

Jika resultan gaya luar yang bekerja pada benda sama dengan nol, energi mekanik benda kekal. Secara matematis, Hukum Kekekalan Energi Mekanik dirumuskan

$$EP_1 + EK_1 = EP_2 + EK_2$$

$$-G \frac{Mm}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = -G \frac{Mm}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (2-12)$$

Agar roket lepas dari pengaruh gravitasi Bumi maka $EP_2 = 0$, sedangkan kecepatan minimum roket diperoleh jika $EK_2 = 0$. Dengan demikian, akan dihasilkan persamaan:

$$-G \frac{Mm}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = 0$$

$$-G \frac{Mm}{R} + \frac{1}{2}mv^2 = 0$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = G \frac{Mm}{R}$$

$$v_{\min} = \sqrt{2G \frac{M}{R}}$$

Oleh karena $g = 2 \frac{M}{R^2}$ maka diperoleh persamaan kecepatan minimum roket agar dapat lepas dari gravitasi Bumi sebagai berikut

$$v_{\min} = \sqrt{2gR} \quad (2-13)$$

dengan r_1 = jarak titik 1 ke pusat massa M , r_2 = jarak titik 2 ke pusat massa M , v_1 = kecepatan benda di titik 1, dan v_2 = kecepatan benda di titik (2). Diasumsikan jarak titik 1 ke pusat massa sama dengan jari-jari Bumi ($r_1 = R$).

Contoh 2.10

Sebuah roket bermassa m ditembakkan vertikal dari permukaan Bumi. Tentukan kecepatan minimum roket ketika ditembakkan agar mencapai ketinggian maksimum R dari permukaan Bumi jika massa Bumi M dan jari-jari Bumi R .

Jawab

Pada saat roket mencapai ketinggian maksimum R , kecepatan roket $v_2 = 0$. Dengan menggunakan persamaan Hukum Kekekalan Energi dan memasukkan harga $v_1 = v$, $v_2 = 0$, $r_1 = R$ dan $r_2 = R + R = 2R$ maka diperoleh

$$-G \frac{Mm}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = -G \frac{Mm}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$-GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$$

$$-GM \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{2R} \right) = \frac{1}{2}(0 - v^2)$$

$$-GM \left(\frac{1}{2R} \right) = -\frac{1}{2}v^2 \text{ atau}$$

$$v^2 = \frac{GM}{R} \text{ sehingga } v = \sqrt{\frac{GM}{R}} \text{ atau } v = \sqrt{gR}$$

Kata Kunci

- Energi Potensial Gravitasi
- Konstanta Gravitasi Universal



Contoh 2.11

Berapakah kecepatan minimum sebuah roket yang diluncurkan vertikal ke atas agar terlepas dari pengaruh gravitasi Bumi?

Jawab

Diketahui: $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$, $M = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$, dan $R = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$.

$$v_{\min} = \sqrt{2GM/R}$$

$$= \sqrt{(2)(6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2) \frac{5,97 \times 10^{24} \text{ kg}}{6,38 \times 10^6 \text{ m}}} = 1,12 \times 10^4 \text{ m/s.}$$

Soal Penguasaan Materi 2.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Tiga benda masing-masing $m_A = 2,5 \text{ kg}$, $m_B = 4 \text{ kg}$, dan $m_C = 6,25 \text{ kg}$ terletak pada satu garis lurus. Jika jarak antara benda A dan C adalah 4 m, berapakah jarak AB dan jarak CD agar besar gaya gravitasi total yang dialami benda B yang terletak di antara benda A dan C sama dengan nol?
- Dua benda yang massanya masing-masing 16 kg dan 36 kg terpisah dengan jarak 50 cm. Titik Z berada pada garis hubung kedua benda. Jika besar medan gravitasi di titik Z tersebut adalah nol, berapakah jarak titik Z tersebut jika diukur dari benda bermassa 36 kg?
- Dua benda angkasa yang bermassa masing-masing m_1 dan m_2 berjarak r satu dengan lainnya sehingga terjadi gaya tarik-menarik sebesar F . Ketika kedua benda tersebut bergerak saling mendekati dan jaraknya berkurang sebesar 25%, hitunglah gaya tarik-menarik antara kedua benda tersebut.

Pembahasan Soal SPMB

Jarak antara Matahari dan Bumi adalah $1,5 \times 10^8 \text{ km}$, sedangkan jarak antara Matahari dan Neptunus adalah $4,5 \times 10^9 \text{ km}$. Periode Neptunus mengelilingi Matahari adalah 165 tahun dan massa Neptunus adalah 18 kali massa Bumi. Jika besar gaya gravitasi pada Bumi oleh Matahari adalah F dan kelajuan Bumi mengelilingi Matahari adalah v , gaya gravitasi pada Neptunus oleh Matahari serta kelajuan Neptunus adalah

- $\frac{F}{10}$ dan $\frac{v}{11}$
- $\frac{F}{50}$ dan $\frac{v}{55}$
- $\frac{F}{50}$ dan $2\frac{v}{11}$
- $3\frac{F}{100}$ dan $3\frac{v}{55}$
- $\frac{F}{100}$ dan $2\frac{v}{55}$

Penyelesaian

Diketahui: $r_B = 1,5 \times 10^8 \text{ km}$, $r_N = 4,5 \times 10^9 \text{ km}$, $r_N = 30 r_B$,

$T_N = 165$ tahun, dan $m_N = 18 m_B$.

Gaya gravitasi pada planet oleh Matahari:

$$F = G \frac{Mm}{R^2} \text{ atau } F \sim \frac{m}{r^2}$$

Perbandingan gaya gravitasi Neptunus dengan Bumi.

$$\frac{F_N}{F} = \frac{m_N R_B^2}{m_B R_N^2} = \frac{18 m_B R_B^2}{m_B (30 R_B)^2} = \frac{18}{900} = \frac{1}{50}$$

$$F_N = \frac{F}{50}$$

Kecepatan orbit planet:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \rightarrow v \sim \frac{r}{T}$$

Perbandingan kecepatan orbit Bumi dengan Neptunus:

$$\frac{v_N}{v} = \frac{r_N T_B}{r_B T_N} = \frac{(30 r_B)(1)}{(r_B)(165)} = \frac{30}{165} = \frac{2}{11}$$

$$v_N = \frac{2}{11} v$$

Jawab: b

UMPTN 2001 - Rayon A

Rangkuman

- Hukum Kepler** menjelaskan tentang mekanika gerak planet-planet
 - Hukum I Kepler**
Setiap planet bergerak pada lintasan elips dengan Matahari berada pada salah satu titik fokusnya.
 - Hukum II Kepler**
Garis yang menghubungkan Matahari dengan planet dalam selang waktu yang sama menghasilkan luas juring yang sama.
 - Hukum III Kepler**
Kuadrat waktu edar planet (periode) berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak planet itu dari Matahari.

$$T^2 \approx r^3 \rightarrow \frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{r_2^3}{r_1^3}$$

- Hukum Gravitasi Newton** dinyatakan sebagai

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{r}$$

- Kuat medan gravitasi** atau percepatan gravitasi

$$g = G \frac{m}{r^2} \mathbf{r}$$

- Kecepatan satelit mengelilingi Bumi** dinyatakan sebagai

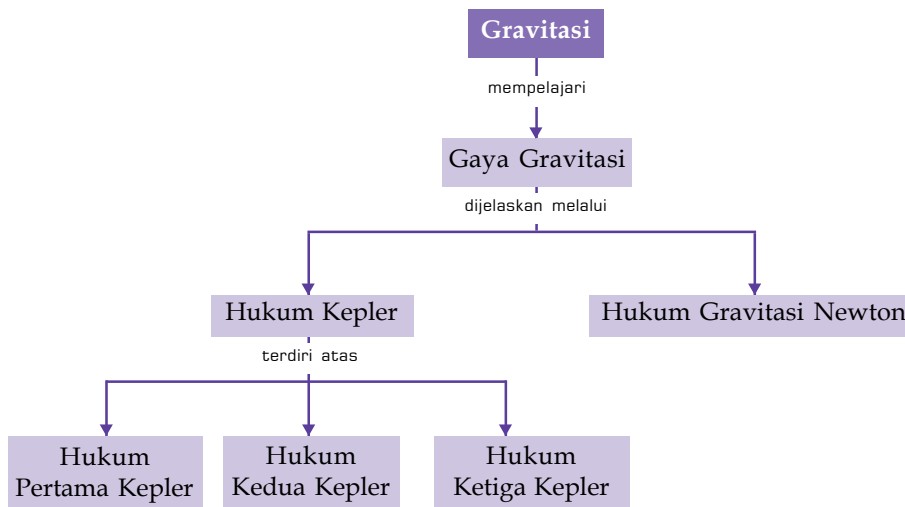
$$v = \frac{1}{(R+h)R} \sqrt{GM(R+h)}$$

- Pengukuran **konstanta gravitasi universal (G)** dilakukan dengan menggunakan neraca Cavendish. Nilai $G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$
- Energi potensial gravitasi** dinyatakan dengan persamaan

$$EP = -G \frac{Mm}{r}$$

- Roket yang bergerak meninggalkan Bumi harus memiliki **kecepatan minimum** $v_{\min} = \sqrt{2gR}$ agar dapat lepas dari medan gravitasi Bumi.

Peta Konsep



Kaji Diri

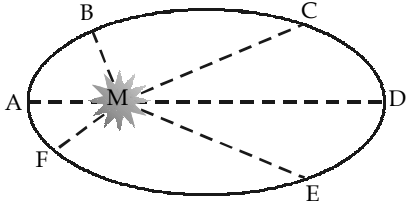
Setelah mempelajari bab Gravitasi, Anda dapat menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan Hukum-Hukum Newton. Jika Anda belum mampu menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan Hukum-Hukum Newton, Anda belum menguasai materi bab

Gaya dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 2

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Perhatikan gambar lintasan planet berikut ini.



Luas bidang yang ditempuh oleh planet dalam selang waktu yang sama adalah...

- AMB dan BMC
 - BMC dan CMD
 - CMD dan DME
 - AMB dan CMD
 - BMC dan DME
2. Dua buah planet, yaitu P dan Q mengorbit Matahari. Apabila perbandingan antara jarak planet P dan planet Q ke Matahari adalah 4 : 9 dan periode planet P mengelilingi Matahari 24 hari, periode planet Q mengelilingi Matahari adalah
- 51 hari
 - 61 hari
 - 71 hari
 - 81 hari
 - 91 hari
3. Dua buah planet A dan B mengorbit Matahari. Apabila perbandingan periode revolusi antara planet A dan planet B mengelilingi Matahari adalah 1 : 8 dan jarak rata-rata planet A ke Matahari a , jarak rata-rata planet B ke Matahari adalah
- $2a$
 - $4a$
 - $6a$
 - $8a$
 - $16a$
4. Jarak rata-rata planet Jupiter dari Matahari adalah 5,2 Satuan Astronomi. Periode Jupiter mengelilingi Matahari adalah
- 3,75 tahun
 - 5,84 tahun
 - 7,52 tahun
 - 9,11 tahun
 - 11,9 tahun
5. Planet X memiliki massa a kali massa Bumi dari jari-jari b kali jari-jari Bumi. Berat suatu benda di planet X dibandingkan beratnya di Bumi menjadi
- ab kali
 - ab^2 kali
 - $\frac{a}{b}$ kali
 - $\frac{a}{b^2}$ kali
 - $\frac{1}{ab}$ kali
6. Seseorang bermassa m berada di permukaan Bumi dengan jari-jari Bumi R dan massa Bumi M . Perbandingan gaya gravitasi yang dialami orang ketika berada di permukaan Bumi dan ketika berada pada jarak R di atas permukaan Bumi adalah
- 1 : 1
 - 1 : 2
 - 2 : 1
 - 1 : 4
 - 4 : 1
7. Benda di permukaan Bumi beratnya 200 N. Kemudian, benda tersebut dibawa ke sebuah planet yang memiliki massa 10 kali massa Bumi, sedangkan jari-jari planet tersebut 2 kali jari-jari Bumi. Berat benda di permukaan planet menjadi
- 25 N
 - 50 N
 - 100 N
 - 250 N
 - 500 N
8. Pada setiap titik sudut segitiga sama sisi dengan panjang sisi a ditempatkan benda masing-masing bermassa m . Jika konstanta gravitasi umum G maka besar gaya gravitasi yang dialami salah satu benda adalah
- $\frac{Gm^2}{a^2}$
 - $\frac{Gm^2}{a^2}\sqrt{2}$
 - $\frac{Gm^2}{a^2}\sqrt{3}$
 - $\frac{2Gm^2}{a^2}$
 - $\frac{Gm^2}{2a^2}\sqrt{3}$
9. Pada titik-titik sudut sebuah bujur sangkar dengan panjang sisi a masing-masing ditempatkan benda bermassa m . Jika besar gaya gravitasi yang dialami oleh salah satu benda sebesar $G\frac{m^2}{a^2}x$ maka besarnya x adalah
- 1,25
 - 1,48
 - 1,62
 - 1,75
 - 1,91
10. Medan gravitasi di suatu tempat yang sangat jauh dari permukaan Bumi besarnya adalah
- nol
 - 0,25 g
 - 0,50 g
 - 0,60 g
 - 0,75 g

11. Dua buah benda masing-masing bermassa 4 kg dan 9 kg terpisah sejauh 10 m. Titik P berada pada garis hubung kedua benda. Jika medan gravitasi di titik P adalah nol, jarak titik P dari benda 4 kg adalah
- 2 m
 - 4 m
 - 5 m
 - 6 m
 - 8 m
12. Diketahui bahwa jari-jari Bumi hampir dua kali dari jari-jari planet Mars, sedangkan massa Mars sekitar 10% dari massa Bumi. Perbandingan medan gravitasi di permukaan Bumi dan Mars adalah
- 2 : 1
 - 1 : 2
 - 5 : 1
 - 1 : 5
 - 5 : 2
13. Jika jari-jari Bumi adalah R , medan gravitasi di permukaan Bumi adalah g , besarnya medan gravitasi pada ketinggian $2R$ dari permukaan Bumi adalah
- $\frac{1}{2}g$
 - $\frac{1}{3}g$
 - $\frac{1}{4}g$
 - $\frac{1}{6}g$
 - $\frac{1}{9}g$
14. Seorang astronot berada pada orbit lingkaran dengan jari-jari R mengitari Bumi. Agar kuat medan gravitasinya menjadi setengah kali semula, jari-jari lingkaran orbit harus menjadi
- $\frac{1}{4}R$
 - $\frac{1}{2}R$
 - $R\sqrt{2}$
 - $2R$
 - $4R$
15. Pada titik-titik sudut sebuah segitiga sama sisi dengan panjang sisi a masing-masing ditempatkan benda bermassa m . Jika konstanta gravitasi umum G , kuat medan gravitasi di pusat segitiga adalah
- $3G\frac{m}{a^2}$
 - $G\frac{m}{3a^2}$
 - $\frac{3}{2}G\frac{m}{a^2}$
 - $\frac{2}{3}G\frac{m}{a^2}$
 - nol
16. Besar energi potensial gravitasi dari sebuah benda bermassa m yang berada pada ketinggian h dari permukaan Bumi jika massa Bumi M dan jari-jarinya R adalah
- $-\frac{GMm}{h}$
 - $+\frac{GMm}{h}$
 - $-\frac{GMm}{R+h}$
 - $\frac{GMm}{R-h}$
 - $-\frac{GMm}{(R+h)^2}$
17. Jika R = jari-jari Bumi, g = percepatan gravitasi di permukaan Bumi, M = massa Bumi, dan m = massa satelit, kecepatan minimum satelit yang diluncurkan dari permukaan Bumi agar satelit mampu mencapai ketinggian $2R$ dari permukaan Bumi adalah
- $\sqrt{\frac{2}{3}}gR$
 - $\sqrt{\frac{3}{2}}gR$
 - \sqrt{gR}
 - $\sqrt{2gR}$
 - $\sqrt{3gR}$
18. Tinjau sebuah benda yang diluncurkan vertikal ke atas. Jika gesekan udara dapat diabaikan, besar kecepatan awal minimum supaya benda tidak kembali ke Bumi ialah v . Jika massa Bumi M , massa benda m , dan jari-jari Bumi R maka v^2 berbanding lurus dengan
- $2RM$
 - $2RMm$
 - $\frac{2R}{M}$
 - $\frac{2m}{R}$
 - $\frac{2M}{R}$
19. Sebuah satelit mengorbit Bumi dengan kelajuan sebesar 6.400 m/s. Jika jari-jari Bumi 6.400 km, percepatan gravitasi di permukaan Bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan gerak satelit dianggap melingkar beraturan, jari-jari orbit satelit tersebut adalah
- 1.000 km
 - 3.600 km
 - 6.400 km
 - 10.000 km
 - 64.000 km
20. Jika diketahui jari-jari Bumi R , massa Bumi M , tetapan gravitasi umum G dan massa sebuah satelit m , satelit tersebut sedang mengorbit Bumi pada ketinggian $0,5R$ dari permukaan Bumi. Kecepatan mengorbit satelit tersebut supaya tetap pada lintasannya yaitu v^2 adalah
- $\frac{GM}{R}$
 - $\frac{2GM}{R}$
 - $\frac{GM}{2R}$
 - $\frac{2GM}{3R}$
 - $\frac{3GM}{2R}$

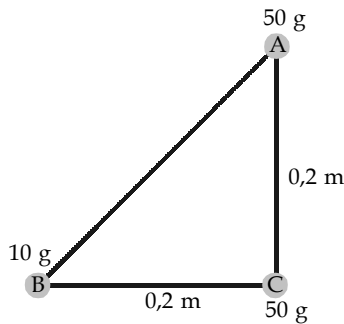


B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

1. Hubungan antara jarak rata-rata planet ke Matahari dan periode revolusi planet mengelilingi Matahari dinyatakan dalam Hukum Ketiga Kepler. Lengkapilah tabel berikut ini dengan menggunakan Hukum Ketiga Kepler.

Planet	Jari-Jari Orbit (m)	Periode Orbit
Merkurius	$5,79 \times 10^{10}$
Venus	224,7 hari
Bumi	$1,50 \times 10^{11}$	365,3 hari
Mars	$2,28 \times 10^{11}$
Uranus	83,75 tahun

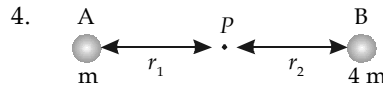
2. Tiga buah bola A, B, dan C ditempatkan pada ujung-ujung segitiga seperti gambar.



Tentukanlah besar gaya gravitasi yang dialami oleh setiap bola.

3. Berapakah kelajuan minimum yang diperlukan oleh sebuah roket yang bergerak lurus ke atas agar dapat mencapai ketinggian di atas Bumi yang besarnya sama dengan jari-jari Bumi dan lepas dari pengaruh gravitasi Bumi ?

($M_{\text{Bumi}} = 5,97 \times 10^{24}$ kg dan jari-jari Bumi = $6,38 \times 10^6$ m)



Dari gambar tersebut, A dan B adalah benda yang masing-masing bermassa m dan $4m$, berjarak 15 cm. Titik P adalah titik yang kuat medan gravitasinya nol. Berapakah r_1 dan r_2 ?

5. Sebuah satelit cuaca bermassa 1.000 kg akan ditempatkan pada orbit lingkaran 300 km di atas permukaan Bumi. Berapakah kelajuan dan periode yang harus dimiliki satelit? Berapa banyak usaha yang harus dilakukan untuk meletakkan satelit ini dalam orbit? Berapa banyak usaha tambahan yang harus dilakukan untuk membuat satelit ini tinggal landas dari Bumi? ($M_{\text{Bumi}} = 5,97 \times 10^{24}$ kg dan jari-jari Bumi = $6,38 \times 10^6$ m)



Sumber: www.apusauction.com.au

B a b 3

Elastisitas dan Gerak Harmonik

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis gejala alam dan keteraturannya dalam cakupan mekanika benda titik dengan cara menganalisis pengaruh gaya pada sifat elastisitas bahan dan hubungan gaya dengan gerak getaran.

Pada saat Anda mengendarai motor atau mobil, pernahkah Anda merasakan guncangan ketika motor atau mobil Anda melewati lubang atau jalan yang tidak rata? Setelah kendaraan melewati lubang atau jalan yang tidak rata, kendaraan akan berguncang atau berayun beberapa kali, kemudian kendaraan Anda akan kembali berjalan dengan mulus. Tahukah Anda, mengapa peristiwa tersebut terjadi?

Pada setiap kendaraan, terdapat sebuah sistem pegas elastis yang berguna untuk memperkecil efek guncangan pada kendaraan, yaitu *shockbreaker*. Tahukah Anda bagaimana prinsip kerja *shockbreaker* tersebut? Dalam hal apa sajakah sifat elastis suatu benda diaplikasikan? Bagaimanakah hubungan antara elastisitas benda dengan gerak harmonik?

Agar dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, pada Bab 3 ini akan dibahas materi tentang elastisitas benda dan gerak harmonik sederhana.

- A. Sifat Elastis Bahan**
- B. Gerak Harmonik Sederhana**

Soal Pramateri

1. Sebuah karet gelang dikatakan sebagai benda elastis. Apakah yang dimaksud dengan elastis?
2. Adik Tini bermain ayunan. Dalam waktu satu menit, Tini menghitung ayunan adiknya tersebut menempuh 30 kali gerakan bolak-balik. Berapakah frekuensi dan periode ayunan tersebut?

A Sifat Elastis Bahan

Pada Subbab A ini, Anda akan mempelajari gaya pemulih pada pegas yang memenuhi Hukum Hooke. Anda juga akan mengetahui bahwa gaya pemulih tersebut timbul akibat sifat pegas yang elastis. Bagaimana sifat elastis benda padat secara Fisika? Tahukah Anda, besaran-besaran yang menentukan elastisitas suatu benda? Agar Anda dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, pelajirlah bahasan materi subbab berikut dengan saksama.

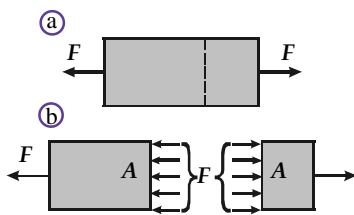
1. Sifat Elastis Benda Padat

Sebuah pegas atau per jika ditarik akan bertambah panjang. Jika ditekan, pegas atau per tersebut akan menjadi lebih pendek. Jika pegas atau per tersebut kemudian dilepaskan, pegas atau per akan kembali ke bentuknya semula. Benda yang memiliki sifat seperti pegas atau per disebut *benda elastis*. Jika benda yang terbuat dari plastisin, lilin, atau tanah liat ditekan, setelah gaya tekan dihilangkan, benda-benda tersebut tidak akan kembali ke bentuk semula. Benda seperti ini disebut *benda plastis*.

Kerjakanlah

Buatlah daftar benda-benda yang bersifat elastis dan plastis yang Anda ketahui. Kemudian, diskusikanlah bersama teman-teman Anda karakteristik setiap jenis benda. Apakah kesimpulan Anda?

Ada dua pengertian dasar dalam mempelajari sifat elastis benda padat, yaitu tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Pembahasan mengenai keduanya diuraikan pada bagian berikut.



Gambar 3.1

Sebuah batang yang mengalami tegangan.

a. Tegangan (*Stress*)

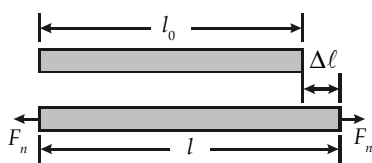
Gambar 3.1a memperlihatkan suatu batang yang luasnya A . Setiap ujung batang tersebut mengalami gaya tarik sebesar F yang sama besar dan berlawanan arah. Batang itu dikatakan mengalami tegangan. Apabila ditinjau sebuah irisan tegak lurus pada panjang batang (garis putus-putus pada **Gambar 3.1a**), tarikan oleh gaya F akan tersebar rata pada luas penampang A , seperti ditunjukkan oleh pada **Gambar 3.1b**. Oleh karena itu, tegangan didefinisikan sebagai perbandingan besar gaya F terhadap luas penampang bidang A . Secara matematis dirumuskan:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3-1)$$

dengan: F = gaya tekan/tarik (N),
 A = luas penampang yang ditekan/ditarik (m^2), dan
 σ = tegangan/stress (N/m^2 atau pascal).

b. Regangan (*Strain*)

Regangan ialah perubahan relatif ukuran atau bentuk benda yang mengalami tegangan. **Gambar 3.2** memperlihatkan sebuah batang yang mengalami regangan akibat gaya tarik F . Panjang batang mula-mula adalah ℓ_0 . Setelah mendapat gaya tarik sebesar F , batang tersebut berubah panjangnya menjadi ℓ . Dengan demikian, batang tersebut mendapatkan pertambahan panjang sebesar $\Delta\ell$, dengan $\Delta\ell = \ell - \ell_0$. Oleh karena itu, regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang benda dan panjang benda mula-mula. Secara matematis dirumuskan:



Gambar 3.2

Regangan sebuah batang sepanjang ℓ adalah $\frac{\Delta\ell}{\ell_0}$.

$$e = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad (3-2)$$

dengan: $\Delta \ell$ = pertambahan panjang (m),
 ℓ_0 = panjang mula-mula (m), dan
 e = regangan (tidak bersatuan).

2. Modulus Elastisitas

Tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu regangan tertentu bergantung pada sifat bahan dari benda yang mendapat tegangan tersebut.

Menurut Hooke, perbandingan antara tegangan dan regangan suatu benda disebut modulus Young atau modulus elastisitas benda tersebut. Secara matematis, modulus elastisitas dirumuskan sebagai berikut.

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta \ell}{\ell}}$$

$$E = \frac{F \ell}{A \Delta \ell} \quad (3-3)$$

dengan satuan E dalam N/m^2 .

Menurut Hukum Hooke (bahasan mengenai Hukum Hooke ini akan Anda pelajari lebih rinci pada subbab B), gaya pemulih pada pegas yang berada di dalam batas elastisnya akan selalu memenuhi persamaan berikut.

$$F = -k \Delta \ell \quad (3-4)$$

dengan: k = tetapan pegas (N/m),
 $\Delta \ell$ = pertambahan panjang pegas (m), dan
 F = gaya yang bekerja pada pegas (N).

Tanda minus (-) **Persamaan (3-4)** menyatakan arah gaya pemulih yang selalu berlawanan dengan pertambahan panjang pegas. Dari **Persamaan (3-3)**,

diperoleh $F = \left(\frac{EA}{\ell} \right) \Delta \ell$. Oleh karena $F = k \Delta \ell$, hubungan antara tetapan pegas dan modulus Young/modulus elastisitas dapat dituliskan sebagai

$$k = \frac{EA}{\ell} \quad (3-5)$$

Tabel 3.1 Modulus Elastisitas (Harga Pendekatan)

Bahan	Modulus Young (E)
Aluminium	$0,7 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Kuningan	$0,91 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Tembaga	$1,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Gelas	$0,55 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Besi	$0,91 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Timah	$0,16 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Nikel	$2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Baja	$2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Tungsten	$3,6 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

Sumber: *College Physics*, 1983

Kata Kunci

- Tegangan
- Regangan
- Modulus elastisitas



Contoh 3.1

Sebuah kawat logam dengan diameter 1,25 mm dan panjangnya 80 cm digantungi beban bermassa 10 kg. Ternyata kawat tersebut bertambah panjang 0,51 mm. Tentukan:

- tegangan (*stress*),
- regangan (*strain*), dan
- modulus Young zat yang membentuk kawat.

Jawab

Diketahui: $d = 1,25 \text{ mm}$, $\ell = 80 \text{ cm}$, $m = 10 \text{ kg}$, dan $\Delta\ell = 0,51 \text{ mm}$.

$$\text{a. Tegangan } (\sigma) = \frac{F}{A} = \frac{mg}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \frac{(10 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)}{\left(\frac{1}{4}\right)(3,14)(1,25 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 8,13 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$\text{b. Regangan } (e) = \frac{\Delta\ell}{\ell} = \frac{5,1 \times 10^{-4} \text{ m}}{0,8 \text{ m}} = 6,375 \times 10^{-4}$$

$$\text{c. Modulus Young } (E) = \frac{\sigma}{e} = \frac{8,13 \times 10^7 \text{ N/m}^2}{6,375 \times 10^{-4}} = 1,28 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

Contoh 3.2

Sebuah silinder yang terbuat dari baja panjangnya 10 m dan jari-jari 2 cm. Jika modulus elastisitas baja tersebut $2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, berapakah tetapan gaya baja tersebut?

Jawab

Diketahui: $\ell = 10 \text{ m}$, $r = 2 \text{ cm}$, dan $t = 2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

$$k = \frac{EA}{\ell} = \frac{E\pi r^2}{\ell} = \frac{(2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2)(3,14)(2 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{10 \text{ m}} = 2,52 \times 10^9 \text{ N/m}$$

Soal Penguasaan Materi 3.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah kawat besi dengan jari-jari 1,25 mm dan panjang 20 cm digantungi beban bermassa 200 kg. Jika modulus Young besi adalah $1,9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, tentukanlah:
 - tegangan (*stress*)
 - tetapan gaya kawat besi,
 - pertambahan panjang kawat, dan
 - regangan (*strain*).
- Kawat aluminium dengan ukuran $2,5 \text{ m} \times 1 \text{ cm} \times 1,5 \text{ mm}$ digantungkan dan diberi beban 50 kg. Ternyata, kawat tersebut panjangnya berubah menjadi 2,5012 m. Tentukan:
 - tegangan (*stress*),
 - regangan (*strain*),
 - modulus Young kawat, dan
 - tetapan gaya aluminium.

B Gerak Harmonik Sederhana

Jika suatu benda bergerak bolak-balik terhadap titik tertentu, gerak benda itu disebut bergetar. Pada subbab ini Anda akan mempelajari jenis getaran yang dinamakan gerak harmonik sederhana. Contoh gerak seperti ini, antara lain gerak benda yang digantungkan pada suatu pegas dan gerak ayunan bandul yang amplitudonya kecil.

Pada gerak harmonik sederhana, benda akan selalu bergerak bolak-balik di sekitar titik kesetimbangannya secara terus-menerus. Dengan demikian, definisi gerak harmonik sederhana adalah gerak bolak-balik benda melalui suatu titik kesetimbangan tertentu dengan banyaknya getaran benda dalam setiap sekon selalu konstan.

1. Gaya Pemulih

Gaya pemulih dimiliki oleh setiap benda elastis yang terkena gaya sehingga benda elastis tersebut berubah bentuk. Gaya yang timbul pada benda elastis untuk menarik kembali benda yang melekat padanya disebut gaya pemulih. Akibat gaya pemulih tersebut, benda akan melakukan gerak harmonik sederhana. Dengan demikian, pada benda yang melakukan gerak harmonik sederhana bekerja gaya pemulih yang selalu mengarah pada titik kesetimbangan benda.

a. Gaya Pemulih pada Pegas

Pegas adalah salah satu contoh benda elastis. Oleh karena sifat elastisnya ini, suatu pegas yang diberi gaya tekan atau gaya regang akan kembali ke keadaan setimbangnya mula-mula apabila gaya yang bekerja padanya dihilangkan. Gaya yang timbul pada pegas untuk mengembalikan posisinya ke keadaan setimbang disebut gaya pemulih pada pegas.

Gaya pemulih pada pegas banyak dimanfaatkan dalam bidang teknik dan kehidupan sehari-hari. Misalnya, pada *shockbreaker* kendaraan dan *springbed*. Di dalam *shockbreaker* terdapat sebuah pegas yang berfungsi meredam getaran saat roda kendaraan melewati jalanan yang tidak rata. Dengan demikian, kendaraan dapat dikendarai dengan nyaman. Demikian juga dengan *springbed*. Pegas-pegas yang tersusun di dalam *springbed* akan memberikan kenyamanan saat Anda tidur di atasnya. Bagaimanakah sifat-sifat gaya pemulih pada pegas ini apabila diuraikan secara Fisika? Agar Anda dapat memahaminya, pelajarilah bahasan materi pada subbab ini.



Sumber: home.tiscali.nl



Sumber: www.roadandtravel.com

Jelajah Fisika

Robert Hooke



Sumber: www.eit.or.th

Hooke lahir di Freshwater Kepulauan Wight, Inggris. Ia banyak melakukan percobaan mengenai sifat elastis benda. Salah satu teorinya yang terkenal adalah Hukum Hooke yang menjadi dasar teori elastisitas. Ia juga terkenal sebagai pembuat alat/ mesin sehingga namanya diabadikan sebagai nama sebuah versi mikroskop. Bukunya yang terkenal adalah *Micrographia*.

Sumber: www.allbiographies.com

Gambar 3.3

Penggunaan sifat elastis pegas pada *springbed* dan *shockbreaker* roda kendaraan.



1) Hukum Hooke

Jika gaya yang bekerja pada sebuah pegas dihilangkan, pegas tersebut akan kembali ke keadaannya semula. Ilmuwan yang pertama-tama meneliti tentang ini adalah **Robert Hooke**. Melalui percobaannya, Hooke menyimpulkan bahwa sifat elastis pegas tersebut ada batasnya dan besar gaya pegas sebanding dengan pertambahan panjang pegas. Agar Anda dapat memahami percobaan yang dilakukan Hooke dengan baik, lakukanlah kegiatan **Mahir Meneliti 3.1**. berikut secara berkelompok.

Mahir Meneliti

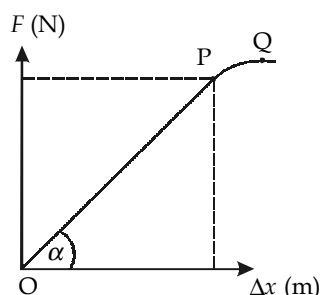
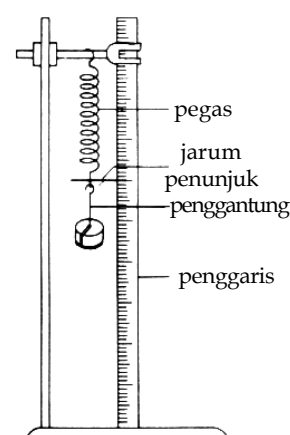
Mengukur Pertambahan Panjang Pegas

Alat dan Bahan

1. Satu pegas dengan jarum penunjuk di ujungnya
2. Lima beban masing-masing 50 gram
3. Statif
4. Penggantung beban
5. Penggaris atau skala pengukur

Prosedur

1. Susunlah alat-alat percobaan seperti pada gambar.
2. Catatlah skala yang ditunjukkan oleh jarum penunjuk saat pegas digantung tanpa beban.
3. Gantungkanlah beban 1 pada pegas, kemudian catat skala yang ditunjukkan oleh jarum penunjuk.
4. Ulangi langkah ke-3 dengan menambahkan beban 2, beban 3, beban 4, dan beban 5.
5. Tuliskanlah hasil pencatatan skala yang ditunjukkan oleh jarum penunjuk ke dalam tabel.
6. Kurangilah beban dari pegas satu per satu, kemudian tuliskan nilai skala yang ditunjukkan oleh jarum penunjuk ke dalam tabel.
7. Hitunglah skala penunjukan rata-rata untuk setiap berat beban dan pertambahan panjang pegas yang dihasilkannya.
8. Plot grafik pertambahan panjang pegas terhadap berat beban.
9. Diskusikan hasil percobaan Anda kemudian laporkan kepada guru.



Gambar 3.4

Grafik hubungan antara gaya dan pertambahan panjang pegas.

Berat Beban (gram)	Penambahan Skala (cm)		Pembacaan Skala Rata-Rata	Pertambahan Panjang Pegas (cm)
	Penambahan Beban	Pengurangan Beban		
.....
.....
.....

Dari percobaan tersebut, Anda dapat menyimpulkan bahwa suatu pegas apabila ditarik dengan gaya tertentu di daerah yang berada dalam batas kelentingannya akan bertambah panjang sebesar Δx . Dari hasil percobaan, juga didapatkan bahwa besar gaya pegas pemulih sebanding dengan pertambahan panjang pegas (Δx). Secara matematis, pernyataan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F = -k \Delta x \quad (3-6)$$

dengan k = tetapan pegas (N/m).

Persamaan (3-6) ini dikenal sebagai Hukum Hooke. Tanda negatif (-) diberikan karena arah gaya pemulih pada pegas selalu berlawanan dengan arah gerak pegas tersebut. Perhatikanlah grafik hubungan antara F dan Δx pada **Gambar 3.4**. Dari titik O sampai dengan titik P, grafik $F-\Delta x$ berbentuk garis lurus. Dalam batasan ini, pertambahan panjang pegas linear dan titik P disebut sebagai batas linearitas pegas. Dari titik P sampai dengan titik Q, pertambahan panjang pegas tidak linear sehingga F tidak sebanding dengan Δx . Namun sampai titik Q ini pegas masih bersifat elastis. Di atas batas elastis ini terdapat daerah tidak elastis (plastis). Pada daerah ini, pegas dapat putus atau tidak kembali ke bentuknya semula, walaupun gaya yang bekerja pada pegas itu dihilangkan. Hukum Hooke hanya berlaku sampai batas linearitas pegas.

Dari grafik $F-\Delta x$ pada **Gambar 3.4** juga dapat ditentukan tetapan pegas (k) pada batas linearitas pegas, yaitu

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \tan \alpha = \text{kemiringan grafik } F(-\Delta x) \quad (3-7)$$

Contoh 3.3

Benda bermassa 4,5 kg digantungkan pada pegas sehingga pegas itu bertambah panjang sebesar 9 cm. Berapakah tetapan pegas tersebut?

Jawab

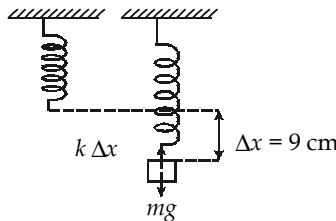
Diketahui: $m = 4,5 \text{ kg}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan $\Delta x = 9 \text{ cm}$.

$$F = k \Delta x$$

$$mg = k \Delta x$$

$$(4,5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = (k)(0,09 \text{ m})$$

$$k = \frac{45 \text{ kg}}{0,09 \text{ m}} = 500 \text{ N/m}$$



Contoh 3.4

Sebuah pegas yang digantungkan vertikal panjangnya 10 cm. Jika pegas diberi beban 1,2 kg, pegas akan bertambah panjang menjadi 19 cm. Berapakah panjang pegas tersebut jika diberi beban 1 kg?

Jawab

Diketahui: $x_1 = 10 \text{ cm}$, $m_1 = 1,2 \text{ kg}$, $x_2 = 19 \text{ cm}$, dan $m_2 = 1 \text{ kg}$.

$$mg = k \Delta x \rightarrow m \propto \Delta x$$

Massa beban (m) berbanding lurus dengan pertambahan panjang (Δx) sehingga diperoleh persamaan

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} \rightarrow \frac{1,2 \text{ kg}}{1 \text{ kg}} = \frac{(19-10) \text{ cm}}{(x-10) \text{ cm}}$$

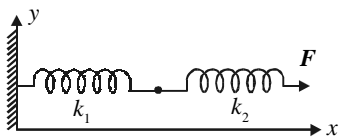
$$x = 17,5 \text{ cm}.$$

Kata Kunci

- Hukum Hooke
- Gaya pegas
- Konstanta pegas

2) Susunan Pegas

Konstanta pegas dapat berubah nilainya, apabila pegas-pegas tersebut disusun menjadi rangkaian. Hal ini diperlukan, jika Anda ingin mendapatkan suatu nilai konstanta pegas untuk tujuan praktis tertentu, misalnya dalam merancang pegas yang digunakan sebagai *shockbreaker*. Besar konstanta total rangkaian pegas bergantung pada jenis rangkaian pegas, yaitu rangkaian pegas seri atau rangkaian pegas paralel.



Gambar 3.5

Rangkaian pegas seri dengan konstanta masing-masing k_1 dan k_2 .

a) Seri/Deret

Perhatikanlah **Gambar 3.5**. Gaya yang bekerja pada setiap pegas adalah sebesar F . Dengan demikian, setiap pegas akan mengalami pertambahan panjang sebesar Δx_1 dan Δx_2 . Pertambahan panjang total kedua pegas adalah $\Delta x_{\text{total}} = \Delta x_1 + \Delta x_2$. Menurut Hukum Hooke, konstanta pegas total rangkaian pegas yang di susun seri tersebut adalah

$$\Delta x_{\text{total}} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2}, \text{ kedua arus dibagi dengan } F,$$

$$\frac{\Delta x_{\text{total}}}{F} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

$$\boxed{\frac{1}{k_{\text{total}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (3-8)$$

Secara umum, konstanta total pegas yang disusun seri dinyatakan dengan persamaan

$$\boxed{\frac{1}{k_{\text{total}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}} \quad (3-9)$$

dengan k_n = konstanta pegas ke-n.

b) Paralel

Gambar 3.6 menunjukkan dua pegas yang dirangkai secara paralel. Jika rangkaian pegas itu ditarik dengan gaya sebesar F , setiap pegas akan mengalami gaya tarik sebesar F_1 dan F_2 , dengan $F_{\text{total}} = F_1 + F_2$. Setiap pegas juga akan mendapat pertambahan panjang sebesar Δx_1 dan Δx_2 . Oleh karena Δx_1 dan Δx_2 , konstanta pegas total untuk rangkaian pegas paralel menurut Hukum Hooke adalah

$$F_{\text{total}} = F_1 + F_2$$

$$F_{\text{total}} = \Delta x (k_1 + k_2)$$

$$\frac{F_{\text{total}}}{\Delta x} = k_1 + k_2$$

$$\boxed{k_{\text{tot}} = k_1 + k_2} \quad (3-10)$$

Secara umum, konstanta total pegas yang dirangkai paralel dinyatakan dengan persamaan

$$\boxed{k_{\text{total}} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n} \quad (3-11)$$

dengan k_n = konstanta pegas ke-n.

Contoh 3.5

Dua pegas identik memiliki tetapan pegas 600 N/m. Tentukanlah konstanta sistem pegas jika:

- disusun seri
- disusun paralel

Jawab

Diketahui: $k_1 = k_2 = 600 \text{ N/m}$.

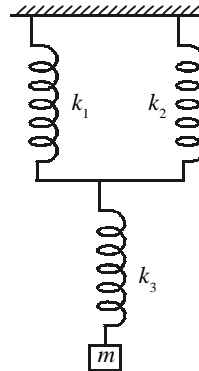
$$\text{a. } \frac{1}{k_{\text{seri}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{600} \text{ N/m} + \frac{1}{600} \text{ N/m} = \frac{2}{600} \text{ N/m} \rightarrow k_{\text{seri}} = 300 \text{ N/m}$$

$$\text{b. } k_{\text{paralel}} = k_1 + k_2 = 600 \text{ N/m} + 600 \text{ N/m} = 1.200 \text{ N/m}$$

Contoh 3.6

Perhatikanlah gambar sistem pegas di samping ini. Jika $k_1 = k_2 = 600 \text{ N/m}$, $k_3 = 1.200 \text{ N/m}$, dan $m = 3 \text{ kg}$, tentukanlah:

- tetapan sistem pegas, dan
- pertambahan panjang sistem pegas.

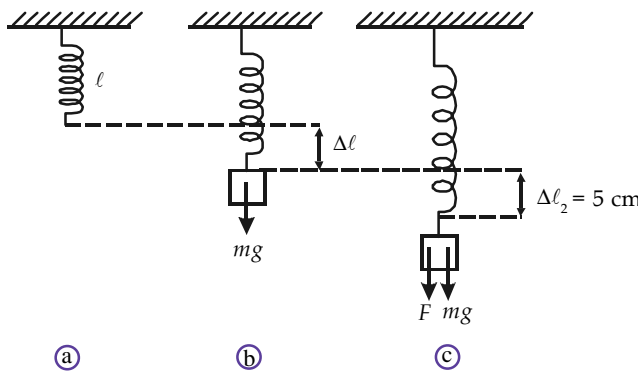


Jawab

Diketahui: $k_1 = k_2 = 600 \text{ N/m}$, $k_3 = 1.200 \text{ N/m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan $m = 3 \text{ kg}$.

- $k_{\text{paralel}} = 600 \text{ N/m} + 600 \text{ N/m} = 1.200 \text{ N/m}$
 $\frac{1}{k_{\text{tot}}} = \frac{1}{1.200} \text{ N/m} + \frac{1}{1.200} \text{ N/m} = \frac{2}{200} \text{ N/m} \rightarrow k_{\text{tot}} = 600 \text{ N/m}$
- $mg = k \Delta x$
 $(3 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = (600 \text{ N/m}) \Delta x$
 $\Delta x = 0,05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$

Perhatikanlah ilustrasi gerakan pegas dan gaya pemulihnya yang diperlihatkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7

- Sebuah pegas digantung tanpa beban.
- Pegas digantung dengan beban sehingga panjang pegas bertambah sebesar $\Delta \ell_1$.
- Pegas digantung dengan beban dan ditarik gaya F sehingga bertambah panjang sebesar $\Delta \ell_2$.

Gambar tersebut memperlihatkan suatu pegas yang konstanta pegasnya k dan panjangnya saat belum digantungi beban adalah ℓ . Setelah benda bermassa m digantungkan pada pegas, seperti pada Gambar 3.7b, pegas bertambah panjang sebesar $\Delta \ell$ dan berada dalam keadaan setimbang. Gaya pemulih yang timbul pada pegas sama dengan berat benda, mg . Apabila pegas yang digantungi beban itu ditarik ke bawah dengan gaya sebesar F , pegas bertambah panjang sebesar $\Delta \ell_2$, seperti terlihat pada Gambar 3.7c. Pada saat ini, gaya pemulih pada pegas memenuhi hubungan sesuai Hukum Hooke $F = -k \Delta \ell$ dengan $\Delta \ell = \Delta \ell_2$.

Contoh 3.7

Pegas yang tergantung tanpa beban panjangnya 25 cm. Kemudian, ujung bawah pegas digantungi beban 100 gram sehingga panjang pegas menjadi 30 cm. Jika beban ditarik ke bawah sejauh 4 cm dan percepatan gravitasi Bumi 10 m/s^2 , tentukan gaya pemulih pada pegas itu.



Jawab

Perhatikanlah gambar.

Diketahui: $y = 25 \text{ cm}$, $y_1 = 30 \text{ cm}$, $y_2 = 4 \text{ cm}$, $m = 100 \text{ g}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Pada posisi gambar (b):

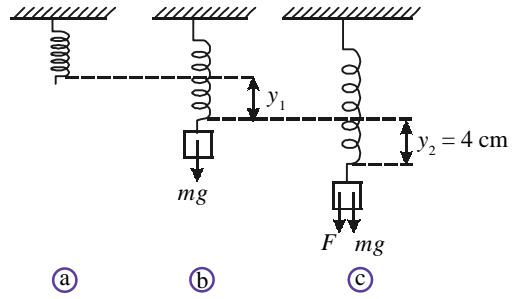
$$mg = ky_1$$

$$(0,1 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = k(0,05 \text{ m})$$

$$k = 20 \text{ N/m}$$

Pada posisi gambar (c):

$$F = ky_2 = (20 \text{ N/m})(0,04 \text{ m}) = 0,8 \text{ N}$$



b. Gaya Pemulih pada Ayunan Matematis

Ayunan matematis atau ayunan sederhana merupakan suatu partikel massa yang tergantung pada suatu titik tetap pada seutas tali, di mana massa tali dapat diabaikan dan tali tidak dapat bertambah panjang. Contoh ayunan matematis ini adalah jam bandul.

Perhatikanlah **Gambar 3.8**. Sebuah beban bermassa m tergantung pada seutas kawat halus kaku sepanjang ℓ dan massanya dapat diabaikan. Apabila bandul itu bergerak vertikal dengan membentuk sudut θ , seperti terlihat pada **Gambar 3.8b**, gaya pemulih bandul tersebut ialah $mg \sin \theta$. Secara matematis dapat dituliskan

$$F = -mg \sin \theta \tag{3-12}$$

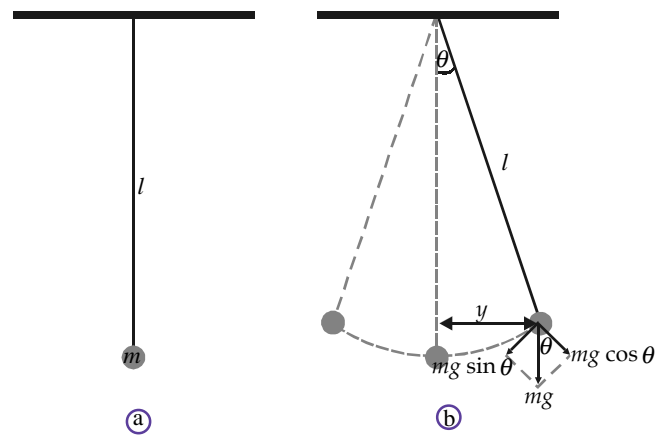
Oleh karena $\sin \theta = \frac{y}{\ell}$, **Persamaan (3-12)** dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F = -mg \left(\frac{y}{\ell} \right)$$

Gambar 3.8

- (a) Sebuah bandul digantungkan pada kawat halus sepanjang ℓ .
- (b) Kemudian, bandul disimpangkan sejauh θ sehingga gaya pemulih bandul adalah

$$F = -mg \sin \theta = -mg \left(\frac{y}{\ell} \right)$$



Contoh 3.8

Sebuah ayunan sederhana memiliki panjang tali = 40 cm dengan beban = 100 gram. Tentukanlah besar gaya pemulihnya jika benda disimpangkan sejauh 4 cm dan percepatan gravitasi di tempat itu = 10 m/s².

Jawab

Diketahui: $\ell = 40 \text{ cm}$, $m = 100 \text{ g}$, $y = 4 \text{ cm}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$

$$\text{Besar gaya pemulih pada ayunan adalah } F = mg \sin \theta = mg \left(\frac{y}{\ell} \right)$$

$$= (0,1 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) \left(\frac{4 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} \right) = 0,1 \text{ N.}$$

Contoh 3.9

Sebuah ayunan sederhana mempunyai panjang tali 30 cm dengan beban 200 gram. Berapa jauh benda harus disimpangkan agar besar gaya pemulihnya 0,4 N?

Jawab

Diketahui: $\ell = 30$ cm, $m = 200$ g, dan $F = 0,4$ N.

Besar gaya pemulih pada ayunan adalah

$$F = mg \sin \theta = mg \left(\frac{y}{\ell} \right)$$

$$0,4 \text{ N} = (0,2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) \left(\frac{y}{0,3} \right) \text{ m} \rightarrow 0,4 \text{ N} = \frac{2y}{0,3} \text{ m}$$

$$y = 0,06 \text{ m} = 6 \text{ cm.}$$

2. Persamaan Gerak Harmonik Sederhana

a. Persamaan Simpangan Gerak Harmonik Sederhana

Persamaan gerak harmonik sederhana didapatkan dari proyeksi gerak melingkar beraturan pada sumbu- x atau sumbu- y . Perhatikanlah **Gambar 3.9** yang memperlihatkan sebuah kereta mainan sedang bergerak melingkar di jalurnya. Dalam hal ini, kereta mainan tersebut bergerak melingkar beraturan dan bayangan kereta mainan yang terbentuk akibat cahaya lampu yang diarahkan padanya akan bergerak bolak-balik.

Perhatikanlah **Gambar 3.10**. Apabila kereta mainan itu diumpamakan sebagai titik P yang bergerak melingkar beraturan dengan kecepatan tetap v_0 dan jari-jari lingkaran $R = x_0$, titik P tersebut akan bergerak bolak-balik di antara $+x_0$ dan $-x_0$. Posisi titik P menurut sumbu- x dinyatakan sebagai

$$x = x_0 \cos \theta \quad (3-13)$$

Di kelas X, Anda telah mempelajari bahwa periode (T) adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu putaran penuh. Oleh karena $\theta = 2\pi$ maka waktu yang dibutuhkan oleh titik P untuk bergerak dari titik $+x_0$ hingga ke posisinya digambar adalah

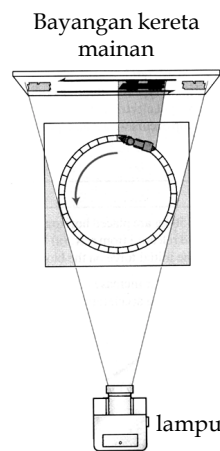
$$t = \left(\frac{\theta}{2\pi} \right) T \quad (3-14)$$

Dengan demikian, hubungan antara sudut dan waktu dapat juga dituliskan sebagai

$$\theta = \left(\frac{2\pi}{T} \right) t \quad (3-15)$$

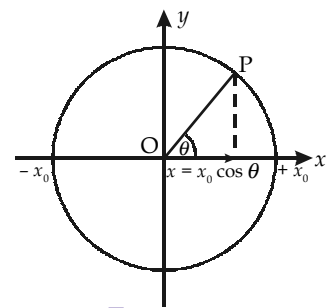
Apabila **Persamaan (3-15)** disubstitusikan ke **Persamaan (3-14)** didapatkan

$$x = x_0 \cos \theta = x_0 \cos \left(\frac{2\pi}{T} \right) t \quad (3-16)$$



Gambar 3.9

Rangkaian alat sederhana yang memperlihatkan hubungan antara GMB dan gerak harmonik sederhana. Saat kereta mainan bergerak di jalur melingkar dengan kecepatan tetap, bayangannya akan bergerak harmonik sederhana.



Gambar 3.10

Proyeksi titik P yang bergerak melingkar beraturan pada sumbu- x adalah $x_0 \cos \theta$.



Anda telah mengetahui bahwa frekuensi berbanding terbalik dengan periode ($f = \frac{1}{T}$). Dengan demikian, **Persamaan (3-16)** dapat ditulis sebagai

$$x = x_0 \cos 2\pi ft \quad (3-17)$$

Oleh karena $\frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega$ (kecepatan sudut), **Persamaan (3-16)** dan **Persamaan (3-17)** dapat dituliskan

$$x = x_0 \cos \omega t \quad (3-18)$$

dengan: x = simpangan getaran benda (m),

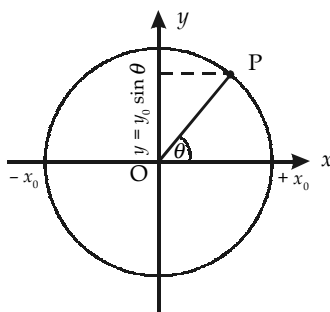
x_0 = jari-jari lingkaran atau amplitudo atau simpangan terjauh getaran benda (m),

ω = kecepatan sudut (rad/s), dan

t = waktu getar (sekon).

Persamaan-persamaan yang telah diuraikan, yaitu **Persamaan (3-13)** sampai **Persamaan (3-18)** menyatakan gerak melingkar benda yang diproyeksikan terhadap sumbu- x . Apabila gerak melingkar benda diproyeksikan menurut sumbu- y , persamaan posisi benda dinyatakan sebagai $y = y_0 \sin \theta$ sehingga diperoleh persamaan simpangan gerak harmonik sederhana

$$y = y_0 \sin \omega t \quad (3-19)$$



Gambar 3.11

Proyeksi titik P terhadap sumbu- y adalah $y = y_0 \sin \theta$

Gambar 3.11 memperlihatkan hubungan antara simpangan (y) terhadap waktu (t) dari persamaan simpangan $y = A \sin \omega t$. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai simpangan (y_{maks}) = A , yaitu amplitudo simpangan tersebut.

b. Persamaan Kecepatan Gerak Harmonik

Anda telah mempelajari bahwa kecepatan adalah turunan pertama dari fungsi posisi. Hal ini juga dalam gerak harmonik. Kecepatan gerak harmonik. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$v = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} (A \sin \omega t)$$

$$v = A \omega \cos \omega t \quad (3-20)$$

dengan: A = amplitudo/simpangan maksimum getaran (m),

ω = kecepatan sudut (rad/s), dan

t = waktu getar (sekon).

Apabila persamaan simpangan gerak harmonik dinyatakan dalam arah sumbu- x , persamaan kecepatan gerak harmoniknya adalah

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} (A \cos \omega t)$$

$$v = -A \omega \sin \omega t \quad (3-21)$$

Nilai kecepatan maksimum untuk **Persamaan (3-20)** dan **(3-21)** diperoleh saat nilai $\cos \omega t$ atau $\sin \omega t = 1$ sehingga didapatkan nilai kecepatan maksimum gerak harmonik adalah

$$v_{\text{maks}} = A \omega \quad (3-22)$$

Oleh karena $\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$ dan $A^2 \cos^2 \omega t = A^2 - A^2 \sin^2 \omega t$, kecepatan getar dapat juga dihitung dengan rumus lain, yaitu

$v = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos \omega t = \sqrt{A^2 - A^2 \sin^2 \omega t} = \sqrt{A^2 - y^2}$ sehingga diperoleh:

$$v = \omega \sqrt{A^2 - y^2} \quad (3-23)$$

c. Persamaan Percepatan Gerak Harmonik

Persamaan percepatan gerak harmonik dapat ditentukan dari turunan pertama persamaan kecepatan gerak harmonik terhadap waktu. Secara matematis, penulisannya adalah sebagai berikut.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} (A \omega \cos \omega t)$$

$$a = -A \omega^2 \sin \omega t \quad (3-24)$$

Oleh karena $A \sin \omega t = y$, persamaan percepatan gerak harmonik dapat dituliskan menjadi

$$a = -\omega^2 y \quad (3-25)$$

Nilai percepatan maksimum untuk **Persamaan (3-24)** diperoleh saat $\sin \omega t = 1$ sehingga nilai percepatan maksimum gerak harmonik dinyatakan sebagai

$$a_{\text{maks}} = -A \omega^2 \quad (3-26)$$

Tanda negatif (-) pada persamaan percepatan gerak harmonik menunjukkan bahwa arah percepatan gerak selalu menuju ke titik kesetimbangannya, yaitu $y = 0$.

Contoh 3.10

Sebuah titik materi melakukan gerak harmonik dengan amplitudo 5 cm. Berapakah simpangannya pada saat sudutnya 30° ?

Jawab

Diketahui: $A = 5$ cm dan $\theta = 30^\circ$.

$$y = A \sin \omega t = 5 \sin 30^\circ = (5 \text{ cm}) \left(\frac{1}{2} \right) = 2,5 \text{ cm.}$$

Contoh 3.11

Sebuah benda bermassa 2 gram digetarkan menurut persamaan $y = 0,05 \sin 300t$ (semua satuan dalam SI). Tentukan kecepatan dan percepatan benda pada saat $t = 0,6$ s.

Jawab

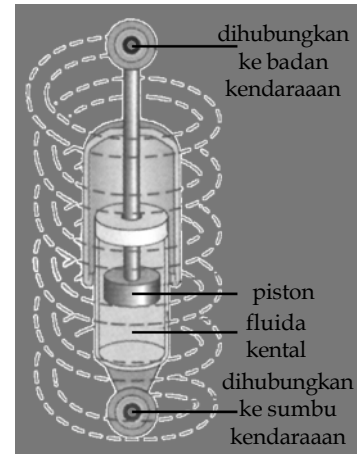
Diketahui: $m = 2$ g, $y = 0,05 \sin 300t$, dan $t = 0,6$ s.

$$\text{Kecepatan: } v = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos \omega t = (300)(0,05)(\cos 300)(0,6) = 15 \cos 180^\circ = -15 \text{ m/s.}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \omega^2 A \sin \omega t = (300)^2(0,05)(\sin 300)(0,6) = (300)^2(0,05) \sin 180^\circ = 0.$$

Jelajah Fisika

Shockbreaker



Pegas dan fluida kental yang terdapat pada *shockbreaker* kendaraan menimbulkan efek redaman terhadap gerak harmonik yang terjadi saat kendaraan berguncang. Redaman ini dibutuhkan agar kendaraan tidak berosilasi selamanya.

Sumber: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 2000



Jelajah Fisika

Jam Pendulum



Sumber: www.rusticwood.com

Pendulum yang terdapat pada jam merupakan salah satu contoh gerak harmonik. Ayunan matematis pendulum tersebut berfungsi untuk mengatur gerak jarum jam. Anda pun dapat merancang jam pendulum Anda sendiri dengan memanfaatkan bahan-bahan yang terdapat di sekitar lingkungan Anda dan memahami konsep gerak harmonik sederhana ini.

Contoh 3.12

Sebuah partikel bergetar harmonik dengan periode 5 sekon dan amplitudo 7,5 cm. Berapakah kelajuan partikel pada saat berada 4,5 cm dari titik setimbangnya?

Jawab

Diketahui: $T = 5$ sekon, $A = 7,5$ cm, dan $y = 4,5$ cm.

$$v = \omega \sqrt{A^2 - y^2} = (2\pi \text{ rad/s}) \sqrt{7,5^2 \text{ cm} - 4,5^2 \text{ cm}} = 12\pi \text{ cm/s}$$

Contoh 3.13

Sebuah titik melakukan gerak harmonik sederhana dengan periode $T = 60$ ms. Berapakah waktu minimum yang diperlukan titik agar simpangannya sama dengan setengah amplitudonya?

Jawab

Diketahui $T = 60$ ms.

Gunakan persamaan simpangan untuk menentukan waktu t agar $y = \frac{1}{2} A$.

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} t \rightarrow \frac{1}{2} A = A \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

Harga $2\pi \text{ rad} = 360^\circ$ sehingga

$$\sin (360^\circ) \left(\frac{t}{T} \right) = \frac{1}{2} \text{ atau } (360^\circ) \left(\frac{t}{T} \right) = 30^\circ \Rightarrow t = \left(\frac{30^\circ}{360^\circ} \right) (T) = \left(\frac{30^\circ}{360^\circ} \right) (60 \text{ ms}) = 5 \text{ ms}$$

Waktu minimum yang diperlukan titik agar simpangannya $= \frac{1}{2}$ amplitudo adalah 5 milisekon.

Contoh 3.14

Sebuah gerak harmonik sederhana memiliki amplitudo $A = 6$ cm. Berapakah simpangan getarnya ketika kecepatannya $\frac{1}{2}$ kali kecepatan maksimum?

Jawab

Diketahui: $A = 6$ cm dan $v = \frac{1}{2} v_m$.

Kecepatan maksimum adalah $v_m = \omega A$. Dengan demikian, akan diperoleh

$$v = \omega \sqrt{A^2 - y^2} \rightarrow \frac{1}{2} v_m = \omega \sqrt{A^2 - y^2}$$

$$\frac{1}{2} \omega A = \omega \sqrt{A^2 - y^2} \rightarrow \left(\frac{1}{2} A \right)^2 = A^2 - y^2$$

$$y^2 = A^2 - \frac{1}{4} A^2 = \frac{3}{4} A^2 \rightarrow y = \frac{1}{2} \sqrt{3} A$$

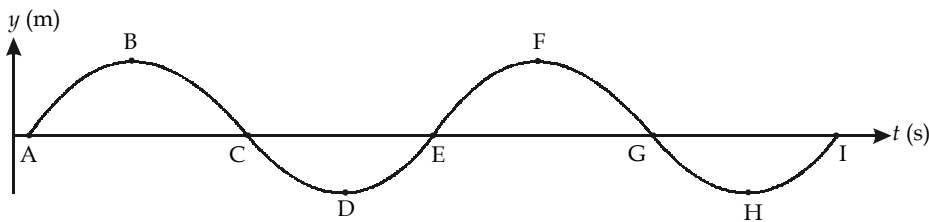
$$= \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right) (6 \text{ cm}) = 3\sqrt{3} \text{ cm}$$

Simpangan getar pada saat $v = \frac{1}{2} v_m$ adalah $3\sqrt{3}$ cm.

3. Fase dan Sudut Fase Gerak Harmonik Sederhana

Pada persamaan gerak harmonik sederhana dikenal beberapa istilah, seperti fase dan sudut fase. Secara fisis, fase adalah kedudukan suatu benda dilihat dari arah getar dan simpangannya pada suatu saat tertentu. Secara matematis, pernyataan ini dituliskan

$$\phi = \frac{t}{T} = ft \text{ (tanpa satuan)} \quad (3-27)$$



Gambar 3.12

Sebuah gelombang sinus dengan simpul-simpulnya pada titik A, C, E, G, dan I, serta titik-titik puncaknya pada titik B, D, F, dan H.

Perhatikanlah **Gambar 3.12**. Titik A dan titik E serta titik B dan titik F dikatakan memiliki fase yang sama karena simpangannya sama dan arah getarnya sama. Syarat agar dua titik memiliki fase yang sama adalah:

$$\Delta\theta = n \cdot 2\pi ; n = 0, 1, 2, \dots \text{ atau}$$

$$\Delta\phi = n \quad ; n = 0, 1, 2, \dots$$

Titik A dan titik C, titik B dan titik D dikatakan berlawanan fase karena arah getarnya berlawanan. Syarat agar dua titik memiliki fase yang berlawanan adalah

$$\Delta\theta = (2n + 1)\pi ; n = 0, 1, 2, \dots \text{ atau}$$

$$\Delta\phi = (2n + 1) \quad ; n = 0, 1, 2, \dots$$

Apabila fase dan sudut fase getaran gerak harmonik diperhitungkan, akan didapatkan sebuah persamaan umum gerak harmonik sederhana yang dituliskan sebagai berikut.

$$y = A \sin(\omega t + \theta_0) \quad (3-28)$$

dengan θ_0 = sudut fase awal getaraan (rad).

Oleh karena itu, dari **Persamaan (3-28)** dapat dinyatakan sudut fase

$$\theta = \omega t \text{ rad} = \frac{2\pi}{T} t \text{ rad} \quad (3-29)$$

Contoh 3.15

Dua buah titik partikel melakukan gerak harmonik sederhana pada satu garis lurus. Kedua titik partikel awalnya bergerak dari titik kesetimbangan pada saat dan arah yang sama. Periode masing-masing titik partikel adalah $T_1 = \frac{1}{3}$ sekon dan $T_2 = \frac{1}{4}$ sekon. Tentukan:

- sudut fase θ_1 dan θ_2 ,
- fase ϕ_1 dan ϕ_2 , dan
- beda fase $\Delta\phi$ kedua titik partikel setelah bergerak selama $t = \frac{1}{12}$ sekon.

Jawab

Diketahui: $T_1 = \frac{1}{3}$ sekon dan $T_2 = \frac{1}{4}$ sekon.

- Ambil sudut fase awal $\theta_0 = 0$ karena kedua partikel pada awalnya berada pada titik kesetimbangan:

$$\theta_1 = \omega_1 t = \frac{2\pi}{T_1} t = 2\pi \left(\frac{\frac{1}{12}}{\frac{1}{3}} \right) = 0,5\pi \text{ rad} = 90^\circ$$

$$\theta_2 = \omega_2 t = \frac{2\pi}{T_2} t = 2\pi \left(\frac{\frac{1}{12}}{\frac{1}{4}} \right) = \frac{2}{3}\pi \text{ rad} = 120^\circ$$



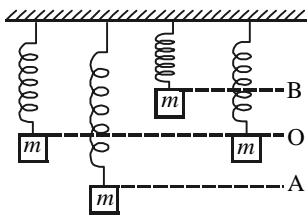
b. Fase getaran dihitung sebagai berikut:

$$\varphi_1 = \frac{t}{T_1} = \frac{12}{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1}{12}\right)\left(\frac{3}{1}\right) = \frac{1}{4}, \varphi_2 = \frac{t}{T_2} = \frac{12}{\frac{1}{4}} = \left(\frac{1}{12}\right)\left(\frac{4}{1}\right) = \frac{1}{3}$$

c. Beda fase kedua titik partikel adalah $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{1}{3} - \frac{1}{4} = \frac{1}{12}$

4. Periode dan Frekuensi Gerak Harmonik Sederhana

Setiap benda yang melakukan gerak harmonik sederhana memiliki besaran periode dan frekuensi. Berikut akan dibahas periode dan frekuensi pada getaran pegas dan ayunan sederhana.



Gambar 3.13

Suatu pegas melakukan gerak harmonik di sekitar titik setimbangnya.

a. Periode dan Frekuensi pada Getaran Pegas

Perhatikanlah **Gambar 3.13**. Periode (T) adalah waktu yang dibutuhkan pegas untuk melakukan satu kali gerak bolak-balik dari $O - A - O - B - O$, sedangkan frekuensi (f) adalah kebalikan dari periode.

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad (3-30)$$

$$T = \frac{1}{f} \text{ (sekon)} \quad (3-31)$$

Periode dan frekuensi getaran pegas diperoleh dari persamaan gaya pemulih dan Hukum Kedua Newton tentang gerak, yaitu

$$F = -ky = ma$$

Oleh karena pada gerak harmonik $y = A \sin \omega t$ dan $a = -\omega^2 y$, persamaan dituiskan menjadi

$$\begin{aligned} -kA \sin \omega t &= m(-\omega^2 y) \\ k &= m\omega^2 = m(2\pi f)^2 \end{aligned}$$

sehingga diperoleh persamaan:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-32)$$

dan

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ (sekon)} \quad (3-33)$$

dengan: m = massa beban pegas (kg), dan
 k = konstanta pegas (N/m).

Contoh 3.16

Sebuah pegas yang panjangnya 16 cm digantungkan vertikal. Kemudian, ujung bawahnya diberi beban 100 gram sehingga panjangnya bertambah 4 cm. Beban ditarik 3 cm ke bawah, kemudian dilepas hingga beban bergetar harmonik. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$. tentukan:

- tetapan pegas, dan
- periode dan frekuensi getarannya.

Jawab

Diketahui: $\ell = 16 \text{ cm}$, $m = 100 \text{ g}$, dan $y = 4 \text{ cm}$.

$$a. \quad mg = ky \rightarrow k = \frac{mg}{y} = \frac{(0,1\text{kg})(10\text{m/s}^2)}{0,04\text{m}} = 25 \text{ N/m}$$

b. Periode getaran: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,1\text{kg}}{25\text{N/m}}} = 0,4 \text{ s}$
 frekuensi getaran: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ Hz}$

b. Periode dan Frekuensi pada Ayunan Sederhana

Periode ayunan adalah waktu yang dibutuhkan ayunan itu untuk melakukan satu kali gerak bolak-balik dari titik $P - O - Q - O - P$, seperti terlihat pada **Gambar 3.14**. Sama halnya dengan getaran pada pegas, periode dan frekuensi pada ayunan sederhana diperoleh dari persamaan gaya pemulih dan Hukum Kedua Newton, yaitu

$$-mg \sin \theta = ma$$

$$-mg \left(\frac{y}{\ell} \right) = m(-\omega^2 y)$$

$$\frac{g}{\ell} = (2\pi f)^2$$

sehingga diperoleh persamaan periode dan frekuensi pada ayunan sederhana sebagai berikut.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}} \text{ (Hz)} \quad (3-34)$$

dan

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \text{ (sekon)} \quad (3-35)$$

dengan: ℓ = panjang tali (m), dan
 g = percepatan gravitasi (m/s^2).

Contoh 3.17

Sebuah ayunan sederhana melakukan gerak harmonik sederhana dengan panjang tali 40 cm. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah periode dan frekuensi ayunan tersebut.

Jawab

Diketahui: $\ell = 40 \text{ cm}$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{0,4\text{m}}{10\text{m/s}^2}} = 2\pi \sqrt{0,04 \text{ s}^2} = 0,4\pi \text{ s} = 1,256 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,256 \text{ s}} = 0,8 \text{ Hz}$$

Contoh 3.18

Beban 100 gram digantungkan pada sebuah ayunan sederhana, kemudian disimpangkan sehingga bergerak bolak-balik dengan frekuensi 5 Hz. Jika panjang tali ayunan tersebut dikurangi sebesar $\frac{3}{4}$ -nya, tentukanlah frekuensinya.

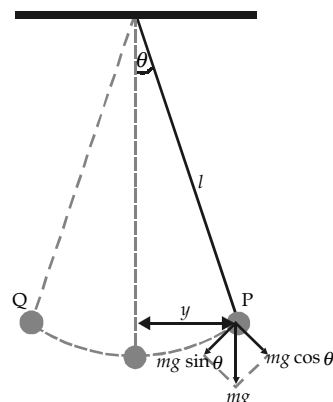
Jawab

Diketahui: $m = 100 \text{ g}$, $f = 5 \text{ Hz}$, dan $\ell_2 = \frac{3}{4} \ell_1$.

Hubungan frekuensi dan panjang tali dirumuskan

Kata Kunci

- Gaya pemulih
- Gerak harmonik
- Fase
- Sudut fase
- Periode
- Frekuensi



Gambar 3.14

Ayunan bandul sederhana yang bergetar harmonik di sekitar titik kesetimbangannya.



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}} \rightarrow f \approx \frac{1}{\sqrt{\ell}}$$

sehingga diperoleh persamaan

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{\ell_1}{\ell_2}}$$

$$\frac{f_2}{5} = \sqrt{\frac{\ell}{\frac{1}{4}\ell}} \rightarrow f_2 = 10 \text{ Hz}$$

Contoh 3.19

Sebuah ayunan sederhana membuat 30 ayunan dalam 1 menit. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan $\pi^2 = 10$, berapakah panjang tali ayunan tersebut?

Jawab

Diketahui: banyak ayunan = 30, $t = 1$ menit, $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan $\pi^2 = 10$.
Frekuensi ayunan adalah banyaknya ayunan setiap sekon sehingga

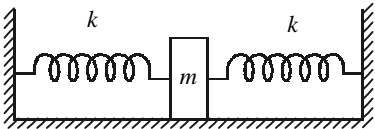
$$f = \frac{30 \text{ ayunan}}{60 \text{ detik}} = \frac{1}{2} \text{ Hz}$$

Frekuensi ayunan untuk menentukan panjang tali ℓ adalah $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}$

$$\text{sehingga } \ell = \frac{g}{4\pi^2 f^2} = \frac{10 \text{ m/s}^2}{(4)(10) \left(\frac{1}{2} \text{ Hz}\right)^2} = 1 \text{ meter}$$

Soal Penguasaan Materi 3.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah pegas digantungkan pada langit-langit lift. Pada ujung bebasnya digantungkan beban dengan massa 100 gram. Pada saat lift diam, pegas bertambah panjang sebesar 10 cm. Diketahui $g = 10 \text{ m/s}^2$. Berapakah pertambahan panjang pegas itu apabila:
 - lift bergerak ke bawah dengan percepatan sebesar 2 m/s^2 , dan
 - lift bergerak ke atas dengan percepatan sebesar 2 m/s^2 ?
- 

Dari gambar tersebut, jika $k = 200 \text{ N/m}$, tentukanlah gaya yang dibutuhkan untuk mendorong m ke kanan sejauh 5 cm.
- Pegas yang tergantung tanpa beban panjangnya 20 cm. Kemudian, ujung bawah pegas digantungi beban 100 gram sehingga panjang pegas menjadi 24 cm. Jika beban ditarik ke bawah sejauh 5 cm dan percepatan gravitasi Bumi 10 m/s^2 , tentukan gaya pemulih pada pegas itu.
- Ayunan sederhana dengan panjang tali 25 cm digantungi beban m gram. Jika benda disimpangkan sejauh 4 cm maka besar gaya pemulihnya sebesar 0,08 N. Berapakah m ?
- Sebuah benda bermassa 5 gram digetarkan menurut persamaan $y = 0,06 \sin 200t$ (semua satuan dalam SI). Tentukanlah kecepatan dan percepatan benda pada saat $t = 0,15$ sekon.
- Satu titik materi melakukan gerak harmonik dengan amplitudo 7,5 cm. Berapakah simpangannya saat sudut fasenya 37° ?
- Periode suatu bandul adalah 0,5 sekon. Tentukanlah periode bandul tersebut jika panjang bandul ditambah 44% dari panjang semula.

Pembahasan Soal *SPMB*

Pada getaran harmonik, jika massa beban yang digantung pada ujung bawah pegas 1 kg, periode getarannya 2 sekon. Jika massa beban ditambah menjadi 4 kg, periode getaran menjadi

- $\frac{1}{4}$ sekon
- $\frac{1}{2}$ sekon
- 1 sekon
- 4 sekon
- 8 sekon

Penyelesaian

Getaran harmonik pada pegas

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \rightarrow T \approx \sqrt{m}$$

Dengan demikian

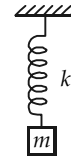
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\sqrt{m_1}}{\sqrt{m_2}} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} T_1$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{4\text{ kg}}{1\text{ kg}}} (2\text{ detik})$$

$$T_2 = 4\text{ sekon}$$

Jawab: d



(UMPTN, 1989)

Rangkuman

- Benda elastis** adalah benda yang mampu kembali ke bentuknya semula setelah gaya yang bekerja padanya dihilangkan.
- Tegangan (stress)** didefinisikan sebagai hasil bagi antara gaya yang bekerja tegak lurus terhadap luas penampang benda, yaitu

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- Regangan (strain)** adalah perbandingan antara pertambahan panjang benda dengan panjang mula-mula. Dirumuskan:

$$e = \frac{\Delta\ell}{\ell}$$

- Modulus Young/elastisitas** menurut Hooke adalah perbandingan antara tegangan dan regangan suatu benda, yaitu

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{F\ell}{A\Delta\ell}$$

- Hubungan antara konstanta pegas dan modulus Young dituliskan:

$$k = \frac{EA}{\ell}$$

- Gaya pemulih pada pegas** memenuhi Hukum Hooke, yaitu

$$F = -k\Delta x$$

- Konstanta total pegas yang disusun paralel

$$k_{\text{total}} = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$

- Konstanta total pegas yang disusun seri

$$\frac{1}{k_{\text{total}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

- Gerak harmonik sederhana** adalah gerak bolak-balik benda di sekitar titik kesetimbangannya. Persamaan umumnya adalah

$$y = A \sin(\omega t + \theta_0) = A \sin(2\pi f t + \theta_0)$$

- Sudut fase (θ)** adalah

$$\theta = \omega t \text{ (rad)}$$

- Fase (φ)** adalah

$$\varphi = \frac{t}{T}$$

- Periode dan frekuensi** pada getaran pegas:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

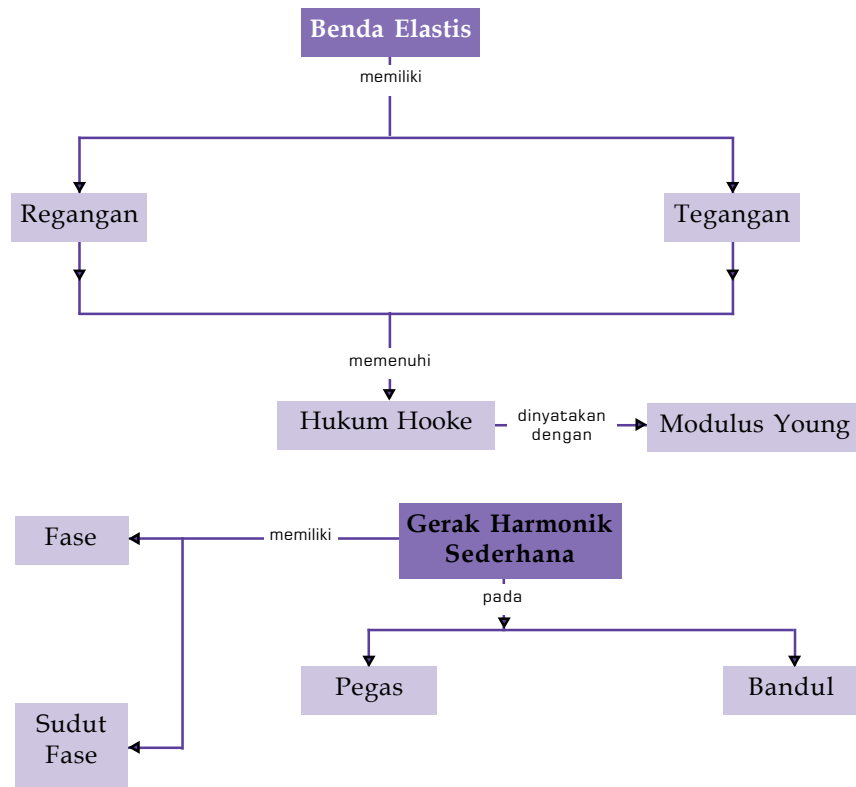
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Periode dan frekuensi** pada getaran ayunan sederhana:

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

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Elastisitas dan Gerak Harmonik, Anda dapat menganalisis pengaruh gaya pada sifat elastisitas bahan dan hubungan antara gaya dengan gerak getaran. Jika Anda belum mampu menganalisis pengaruh gaya pada sifat elastisitas bahan dan hubungan antara gaya dengan gerak getaran, Anda belum menguasai materi bab Elastisitas dan

Gerak Harmonik dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 3

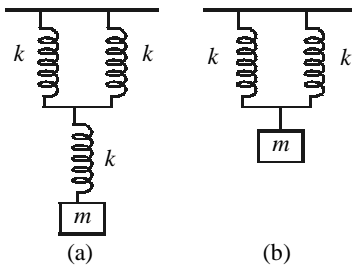
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Benda bermassa 2 kg digantungkan pada pegas sehingga pegas bertambah panjang 2 cm. Tetapan pegas tersebut
 - 100 N/m
 - 200 N/m
 - 1.000 N/m
 - 2.000 N/m
 - 5.000 N/m
- Agung yang bermassa 50 kg menggantung pada sebuah pegas yang memiliki konstanta pegas sebesar 2.000 N/m. Pegas tersebut akan bertambah panjang sebesar
 - 2,0 cm
 - 2,5 cm
 - 4,0 cm
 - 5,0 cm
 - 6,5 cm
- Sebuah pegas yang digantungkan vertikal panjangnya 15 cm. Jika diregangkan dengan gaya sebesar 0,5 N, panjang pegas menjadi 27 cm. Panjang pegas jika diregangkan dengan gaya sebesar 0,6 N adalah
 - 32,4 cm
 - 31,5 cm
 - 29,4 cm
 - 29,0 cm
 - 28,5 cm
- Tiga buah pegas identik disusun seri, kemudian disusun paralel. Kedua susunan pegas itu digantungi beban yang berbeda. Agar pertambahan panjang sistem pegas paralel dan sistem pegas seri sama, perbandingan beban yang digantungkan pada sistem pegas paralel dan sistem pegas seri adalah
 - 1 : 3
 - 3 : 1
 - 1 : 9
 - 9 : 1
 - 1 : 18
- Sebuah pegas digantungkan pada sebuah lift. Pada ujung bebasnya digantungkan beban 50 gram. Pada saat lift diam, pegas bertambah panjang 5 cm. Jika diketahui besar $g = 10 \text{ m/s}^2$, pertambahan panjang pegas apabila lift bergerak ke bawah dengan percepatan 3 m/s^2 adalah
 - 2,5 cm
 - 3,5 cm
 - 4,5 cm
 - 5,0 cm
 - 6,0 cm
- Sebuah pegas yang digantung diberi beban 200 gram dan pegas bertambah panjang 5 cm. Jika beban ditarik ke bawah sejauh 6 cm, gaya pemulih pada pegas adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
 - 1,2 N
 - 2,2 N
 - 2,4 N
 - 4,4 N
 - 4,8 N
- Sebuah pegas digantung dengan beban 200 gram. Beban ditarik ke bawah sejauh 5 cm dengan gaya 5 N sehingga panjang pegas menjadi 21 cm. Jika percepatan gravitasi Bumi 10 m/s^2 , panjang pegas mula-mula sebelum diberi beban adalah
 - 12 cm
 - 14 cm
 - 16 cm
 - 18 cm
 - 20 cm
- Sebuah ayunan sederhana memiliki panjang tali sebesar 50 cm dengan beban 100 gram. Besar gaya pemulihnya jika benda disimpangkan sejauh 2,5 cm adalah (percepatan gravitasi di tempat itu 10 m/s^2)
 - 0,05 N
 - 0,10 N
 - 0,15 N
 - 0,20 N
 - 0,25 N
- Sebuah titik materi melakukan getaran harmonik sederhana dengan amplitudo A . Pada saat simpangannya $\frac{1}{2}A\sqrt{2}$, fase getaran terhadap titik setimbangnya adalah
 - $\frac{1}{8}$
 - $\frac{1}{4}$
 - $\frac{1}{2}$
 - $\frac{1}{2}\sqrt{2}$
 - $\sqrt{2}$
- Sebuah partikel bergetar harmonik dengan periode 6 sekon dan amplitudo 10 cm. Kelajuan partikel pada saat berada sejauh 5 cm dari titik setimbangnya adalah
 - 7,09 cm/s
 - 8,51 cm/s
 - 9,07 cm/s
 - 11,07 cm/s
 - 19,12 cm/s
- Sebuah benda bermassa 50 gram bergerak harmonik sederhana dengan amplitudo 10 cm dan periode 0,2 s. Besar gaya yang bekerja pada sistem saat simpangannya setengah amplitudo adalah sekitar
 - 1,0 N
 - 2,5 N
 - 4,8 N
 - 6,9 N
 - 8,4 N
- Sebuah pegas yang panjangnya 20 cm digantungkan secara vertikal. Kemudian, ujung bawahnya diberi beban 200 gram sehingga panjang pegas bertambah 10 cm. Beban ditarik 5 cm ke bawah, kemudian dilepas sehingga beban bergetar harmonik. Jika percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, frekuensi getaran pegas tersebut adalah
 - 0,5 Hz
 - 1,6 Hz
 - 5,0 Hz
 - 18 Hz
 - 62,8 Hz

13. Dua buah sistem massa pegas A dan B bergetar dengan periode T_A dan T_B . Jika $T_A = 2 T_B$ dan tetapan kedua pegas dianggap sama maka kedua massa m_A dan m_B memenuhi hubungan

- a. $m_A = \frac{1}{4} m_B$ d. $m_A = 2m_B$
 b. $m_A = \frac{1}{2} m_B$ e. $m_A = 4m_B$
 c. $m_A = \sqrt{2} m_B$

14.



Sebuah beban (massa m) dan beberapa pegas identik membentuk sistem pegas beban yang mengikuti skema rancangan (a) atau (b) seperti terlihat pada gambar. Apabila gesekan udara diabaikan, kedua rancangan di atas dapat menghasilkan gerakan atau getaran harmonik sederhana dengan frekuensi tertentu. Jika f_a adalah frekuensi getaran sistem (a) maka besar frekuensi getaran sistem (b) akan sama dengan

- a. $\frac{f_a}{9}$ d. $9 f_a$
 b. $\frac{f_a}{3}$ e. $27 f_a$
 c. $\sqrt{3} f_a$
15. Pada suatu getaran harmonik pegas, jika massa beban yang digantung pada ujung bawah pegas 300 g, frekuensi getaran 2 Hz, besar massa benda yang harus ditambahkan agar frekuensi getaran pegas menjadi 1,5 Hz adalah
- a. 150 gram d. 418 gram
 b. 233 gram e. 533 gram
 c. 348 gram

16. Sebuah ayunan melakukan gerak harmonik sederhana. Jika panjang tali ayunan 10 cm dan percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah periode ayunan tersebut adalah

- a. 0,2 sekon d. $0,4 \pi$ sekon
 b. $0,2 \pi$ sekon e. 2 sekon
 c. 0,4 sekon

17. Dua buah ayunan sederhana A dan B bergerak harmonik dengan frekuensi f_A dan f_B . Jika $f_A = \frac{2}{3} f_B$, panjang tali kedua ayunan sederhana tersebut akan memenuhi hubungan

- a. $l_A = \frac{2}{3} l_B$ d. $l_A = \frac{9}{4} l_B$
 b. $l_A = \frac{3}{2} l_B$ e. $l_A = \sqrt{\frac{2}{3}} l_B$
 c. $l_A = \frac{4}{9} l_B$

18. Sebuah beban yang digantungkan pada sebuah ayunan sederhana yang panjangnya l cm, kemudian disimpangkan sehingga bergerak bolak-balik dengan periode 0,16 sekon. Apabila tali ayunan tersebut dikurangi sebesar 36% dari panjang semula, frekuensi ayunannya menjadi

- a. 0,2 Hz d. 4,0 Hz
 b. 0,4 Hz e. 5,0 Hz
 c. 2,0 Hz

19. Sebuah partikel bermassa 10 gram bergetar harmonik dengan frekuensi 100 Hz dan amplitudo 8 cm. Energi potensial pada saat sudut fasenya 30 adalah ... joule.

- a. $0,12 \pi^2$ d. $0,32 \pi^2$
 b. $0,7 \pi^2$ e. $0,45 \pi^2$
 c. $0,23 \pi^2$

20. Pada benda yang mengalami getaran harmonik maka saat simpangannya maksimum, benda akan memiliki

- a. kecepatan dan percepatan maksimum
 b. kecepatan dan percepatan minimum
 c. kecepatan nol dan percepatan maksimum
 d. kecepatan maksimum dan percepatan nol
 e. kecepatan dan percepatan nol

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

1. Sebuah benda bermassa 10 g digetarkan menurut persamaan simpangan $y = (6 \times 10^{-2}) \sin 200t$, dengan t dalam s dan y dalam m. Tentukanlah:
 a. kecepatan maksimum benda, dan
 b. gaya pemulih maksimum.
2. Beban 100 gram yang digantungkan vertikal pada sebuah pegas bergetar turun naik dengan frekuensi 4 Hz. Apabila beban tersebut diganti frekuensinya menjadi 8 Hz, berapakah massa beban yang baru?
3. Dua osilator bergetar dengan fase sama pada $t = 0$. Frekuensi getaran itu 5 Hz dan 15 Hz. Setelah 0,8 sekon, tentukanlah:

- a. beda fase kedua getaran itu, dan
 b. selisih sudut fase kedua getaran itu.
4. Dua buah ayunan sederhana A dan B bergerak harmonik dengan periode T_A dan T_B . Jika $T_A = \frac{4}{5} T_B$ dan panjang tali ayunan A, yaitu $l_A = 50$ cm, berapakah panjang tali ayunan B?
5. Suatu gerak harmonik sederhana memiliki amplitudo $A = 6$ cm. Berapakah simpangan getarnya ketika kecepatannya $\frac{1}{3}$ kali kecepatan maksimum?

Kegiatan Semester 1

Menarik atau menekan benda yang keras dan kaku bukanlah pekerjaan yang gampang. Kegiatan ini memerlukan gaya yang sangat besar. Di samping itu, perubahan panjang yang dialami oleh benda pun sulit diamati tanpa bantuan alat. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk meregangkan batang yang keras dan kaku dengan gaya relatif yang cukup kecil adalah dengan cara membentangkan batang tersebut di atas penumpu, kemudian memberi beban gantung di titik tengah batang. Pada Bab 3, Anda telah belajar mengenai elastisitas pada benda padat. Agar Anda dapat memahami materi ini lebih dalam, Anda akan belajar melakukan penelitian sederhana untuk menentukan elastisitas beberapa benda padat. Kegiatan ini dilakukan secara berkelompok dalam waktu yang ditentukan oleh guru Fisika Anda. Supaya hasil penelitian Anda baik, lakukanlah kegiatan ini dengan cermat dan teliti.

Tujuan

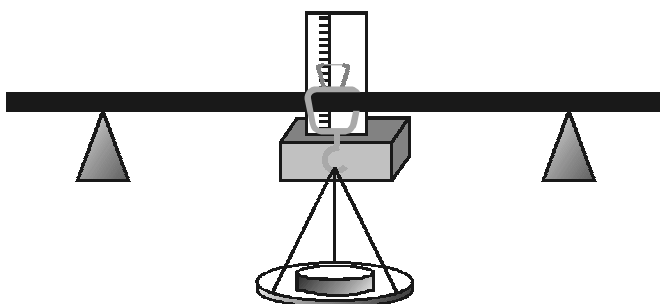
Menentukan Modulus Young (E) beberapa batang kayu.

Alat dan Bahan

1. Dua batang kayu, masing-masing memiliki ukuran panjang, lebar, dan tebal yang berbeda-beda.
2. Satu cermin datar dengan penyangga kaki tiga dan benang penunjuk.
3. Tujuh beban gantung masing-masing 200 gr.
4. Satu bingkai penyangga
5. Skala millimeter blok
6. Jangka sorong

Prosedur

1. Ukurlah panjang, lebar, dan tebal setiap batang kayu menggunakan jangka sorong. Saat mengukur, perhatikan skala nol jangka sorong yang Anda gunakan.
2. Aturlah susunan alat, seperti yang tampak pada gambar. Ukurlah jarak antara kedua penumpu batang kayu (L).



3. Catatlah angka yang ditunjukkan oleh benang penunjuk pada skala millimeter blok saat beban belum digantungkan pada batang kayu sebagai titik nol batang tersebut. Perhatikan bahwa pembacaan benang penunjuk pada skala millimeter blok dilakukan dengan melihat bayangan yang dipantulkan oleh cermin yang terdapat di belakang skala millimeter blok. Hal ini dilakukan untuk memperkecil kesalahan paralaks saat pengamatan dilakukan.



4. Gantungkanlah beban pada batang kayu, kemudian catat massa beban gantung (M) dan amati nilai simpangan batang kayu terhadap titik nolnya yang ditunjukkan oleh benang penunjuk pada skala millimeter blok.
5. Berikan tambahan beban gantung, dan lakukan langkah ke-4 untuk semua beban gantung yang tersedia. Gunakanlah tabel pengamatan berikut untuk mencatat data pengamatan Anda.

Batang ke-

Panjang batang :

Lebar batang :

Tebal batang :

Jumlah beban yang digantung	Massa beban total	Simpangan batang saat penambahan beban	Simpangan batang saat pengurangan beban
.....
.....
.....

6. Kurangi beban satu demi satu, kemudian catat kedudukan benang penunjuk pada skala millimeter blok.
7. Lakukan langkah ke-1 hingga ke-6 untuk batang kayu yang berbeda.
8. Berdasarkan data yang Anda peroleh, tentukanlah harga Modulus Young untuk setiap batang kayu menggunakan persamaan

$$E = \frac{L^3 Mg}{4a^3 be}$$

dengan: L = jarak penumpu ke batang kayu (cm),

M = massa beban gantung (gram),

g = percepatan gravitasi Bumi (cm/s^2),

a = tebal batang (cm),

b = lebar batang (cm), dan

e = simpangan batang terhadap titik nolnya, setelah digantungi beban (cm).

Pertanyaan

1. Berdasarkan data pengamatan Anda, berapakah nilai Modulus Young setiap batang kayu?
2. Bandingkanlah harga Modulus Young dari ketiga kayu tersebut. Apakah yang dapat Anda simpulkan?
3. Tuliskanlah hasil penelitian Anda tersebut dalam bentuk laporan yang diberikan kepada guru Fisika Anda dan presentasikan di depan teman-teman sekelas Anda.

Menyusun Laporan

Setelah Anda menyelesaikan kegiatan ini, buatlah laporan yang menceritakan hasil kegiatan Anda. Laporan tersebut terdiri atas pendahuluan, teori dasar, data pengamatan, pembahasan, kesimpulan dan saran, serta daftar pustaka.

Anda diharapkan dapat membuat laporan sebaik mungkin, agar orang lain yang membaca laporan Anda dapat mengerti dan memahami isi laporan Anda. Laporan tersebut sebaiknya ditulis atau diketik dalam kertas HVS ukuran A4. Jika Anda mengalami kesulitan untuk menyusun laporan tersebut, Anda dapat mendiskusikannya dengan guru Fisika Anda.



4

B a b 4

Usaha, Energi, dan Daya



Sumber: www.rit.edu

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis gejala alam dan keteraturannya dalam cakupan mekanika benda titik dengan cara menganalisis hubungan antara usaha, perubahan energi, dan hukum kekekalan energi mekanik, serta menerapkan hukum kekekalan energi mekanik untuk menganalisis gerak dalam kehidupan sehari-hari.

Kehidupan manusia tidak pernah lepas dari usaha dan energi. Manusia membutuhkan energi agar dapat melakukan usaha. Tahukah Anda definisi usaha dalam Fisika? Benarkah suatu hari nanti energi yang digunakan untuk melakukan usaha tersebut akan habis?

Dalam Fisika, dikenal adanya Hukum Kekekalan Energi. Menurut hukum tersebut, energi yang digunakan oleh seorang atlet papan seluncur (*skateboard*) ketika melakukan peluncuran dari titik tertinggi hingga titik lain pada bidang luncur, jumlah energinya selalu sama atau konstan. Hanya saja, energi tersebut berubah dari energi potensial menjadi energi kinetik atau sebaliknya. Bagaimanakah cara menentukan besar energi potensial dan energi kinetik tersebut? Bagaimanakah hubungannya dengan usaha yang dilakukan oleh atlet *skateboard* untuk meluncur? Bagaimana juga hubungan usaha dan energi tersebut dengan kecepatan atlet *skateboard* untuk meluncur?

Agar Anda dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, pelajarilah pembahasan materi dalam Bab 4 ini yang akan menjelaskan tentang usaha, energi, dan daya dalam Fisika.

- A. Usaha**
- B. Energi**
- C. Daya**

Soal Pramateri

1. Menurut Anda, apakah yang dimaksud dengan usaha?
2. Sebutkan contoh-contoh energi yang Anda ketahui.
3. Cobalah Anda jelaskan tentang cara suatu energi berpindah.

A Usaha

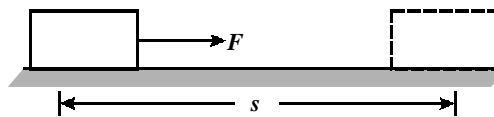
Kata usaha dalam kehidupan sehari-hari adalah berbagai aktivitas yang dilakukan manusia. Contohnya, Valentino Rossi berusaha meningkatkan kelajuan motornya untuk menjadi juara dunia *Moto GP* yang ke delapan kalinya, Ronaldinho berusaha mengecoh penjaga gawang agar dapat mencetak gol, dan Firdaus berusaha mempelajari Fisika untuk persiapan ulangan harian.

Anda pun dikatakan melakukan usaha saat mendorong sebuah kotak yang terletak di atas lantai. Besar usaha yang Anda lakukan bergantung pada besar gaya yang Anda berikan untuk mendorong kotak dan besar perpindahan kotak.

Dalam Fisika, usaha memiliki definisi yang lebih khusus. Jika Anda memberikan gaya konstan F pada suatu benda sehingga menyebabkan benda berpindah sejauh s , usaha W yang dilakukan gaya tersebut dinyatakan dengan

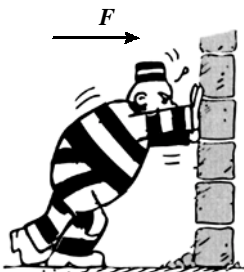
$$W = F \cdot s \quad (4-1)$$

dengan: F = gaya (N),
 s = perpindahan (m), dan
 W = usaha (Nm = joule).



Gambar 4.1

Sebuah balok yang berpindah sejauh s karena gaya F memiliki usaha $W = F \cdot s$.



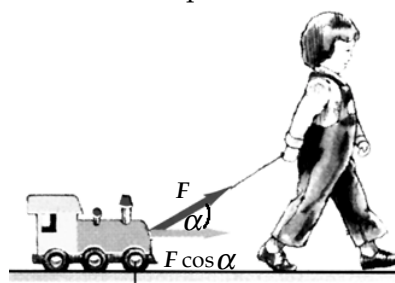
Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Gambar 4.2

Contoh gaya yang tidak menimbulkan perpindahan benda sehingga $W = 0$.

Gambar 4.3

Gaya tarik yang dilakukan Juwita membentuk sudut α terhadap arah perpindahannya.



Sumber: *Contemporary College Physics*, 1993

Dengan demikian, gaya yang bekerja pada kereta api mainan membentuk sudut α terhadap arah perpindahannya. Oleh karena itu, besar usaha yang dilakukan gaya tersebut dinyatakan dengan persamaan

$$W = F \cos \alpha s \quad (4-2)$$

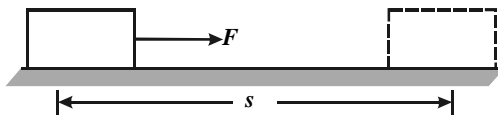
dengan α = sudut antara gaya dan perpindahan benda (derajat).

Kerjakanlah

Seekor anjing membawa sepotong kayu dimulutnya untuk dipindahkan ke suatu tempat, kemudian anjing tersebut memindahkan tulang yang dibawanya ke tempat semula. Menurut Anda, apakah anjing tersebut dikatakan melakukan usaha? Jelaskanlah pendapat Anda dan diskusikan pendapat Anda bersama teman-teman dan guru Fisika Anda.

Contoh 4.1

Sebuah benda yang beratnya 10 N berada pada bidang datar. Pada benda tersebut bekerja sebuah gaya mendatar sebesar 20 N sehingga benda berpindah sejauh 50 cm. Berapakah usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut?



Jawab

Diketahui: $W = 10 \text{ N}$, $F = 20 \text{ N}$, dan $s = 50 \text{ cm}$.

$$W = Fs$$

$$W = (20 \text{ N})(0,5 \text{ m}) = 10 \text{ joule}$$

Contoh 4.2

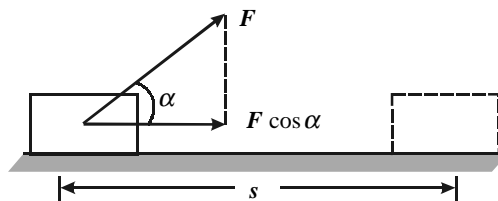
Sebuah gaya $F = (3\mathbf{i} + 4\mathbf{j}) \text{ N}$ melakukan usaha dengan titik tangkapnya berpindah menurut $r = (5\mathbf{i} + 5\mathbf{j}) \text{ m}$ dan vektor \mathbf{i} dan \mathbf{j} berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu- x dan sumbu- y pada koordinat Cartesian. Berapakah usaha yang dilakukan gaya tersebut?

Jawab

Diketahui: $F = (3\mathbf{i} + 4\mathbf{j})\text{N}$ dan $r = (5\mathbf{i} + 5\mathbf{j})\text{m}$.

$$W = F \cdot s \text{ atau } W = F \cdot r = (3\mathbf{i} + 4\mathbf{j})\text{N} \cdot (5\mathbf{i} + 5\mathbf{j})\text{m} = 15 + 20 = 35 \text{ joule}$$

Contoh 4.3



Sebuah balok bermassa 10 kg ditarik dengan gaya 50 N sehingga berpindah sejauh 8 m. Jika $\alpha = 60^\circ$ dan gesekan antara balok dan lantai diabaikan, berapakah usaha yang dilakukan gaya itu?

Jawab

Diketahui: $F = 50 \text{ N}$, $s = 8 \text{ m}$, dan $\alpha = 60^\circ$.

$$W = F \cos \alpha s$$

$$= (50 \text{ N})(\cos 60^\circ)(8 \text{ m})$$

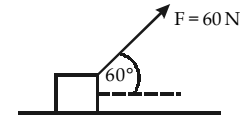
$$= (50 \text{ N})\left(\frac{1}{2}\right)(8 \text{ m})$$

$$= 200 \text{ joule.}$$

Solusi Cerdas

Sebuah benda $m = 4 \text{ kg}$ ditarik dengan gaya 60 N (lihat gambar). Usaha yang dilakukan gaya tersebut untuk memindahkan benda sejauh 5 m adalah ...

- 40 joule
- 75 joule
- 150 joule
- 200 joule
- 300 joule



Penyelesaian

$$W = Fs$$

$$W = 60 \cos (60^\circ) \cdot 5$$

$$W = (60) \left(\frac{1}{2}\right) (5)$$

$$W = 150 \text{ joule}$$

Jawab: c

Soal UNAS Fisika SMA
2003/2004

Jangan Lupa

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = 1 \text{ dan}$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{i} = 0$$

Kata Kunci

- Usaha

Soal Penguasaan Materi 4.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

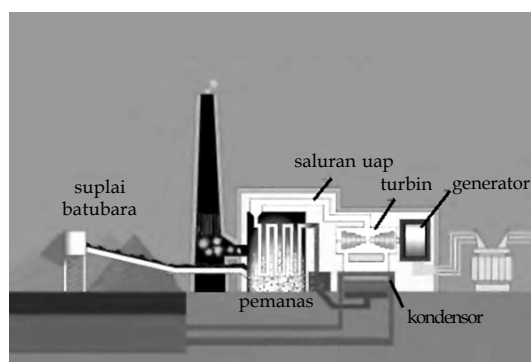
1. Sebuah batu besar berada pada jarak 30 m di depan kendaraan bermassa 600 kg yang sedang bergerak dengan kecepatan 72 km/jam. Tentukanlah gaya pengereman yang harus diberikan pada kendaraan agar tepat berhenti sebelum mengenai batu.
2. Sebuah benda beratnya 60 N berada pada bidang datar. Pada benda tersebut bekerja sebuah gaya mendatar sebesar 40 N sehingga benda berpindah sejauh 2,5 m. Berapakah usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut?
3. Sebuah gaya $F = (2\mathbf{i} + 5\mathbf{j})$ N melakukan usaha dengan titik tangkapnya berpindah menurut $\mathbf{r} = (4\mathbf{i} + 3\mathbf{j})$ m. Vektor \mathbf{i} dan \mathbf{j} berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu- x dan sumbu- y pada koordinat Kartesian. Berapa usaha yang dilakukan gaya tersebut?

B Energi

1. Pengertian Energi

Energi memegang peranan yang sangat penting bagi kehidupan manusia dan kemajuan suatu negara. Seluruh aktivitas kehidupan manusia bisa dilakukan dengan melibatkan penggunaan energi. Pada zaman prasejarah sampai awal zaman sejarah, hanya kayu yang digunakan sebagai sumber energi untuk keperluan memasak dan pemanasan. Sekitar awal abad ke-13 mulai digunakan batubara. Penemuan mesin uap yang menggunakan batubara sebagai sumber energinya pada abad ke-18 membawa perkembangan baru dalam kehidupan manusia. Mesin uap ini mampu menghasilkan energi yang cukup besar untuk menggerakkan mesin-mesin industri sehingga memacu api revolusi industri di Eropa, di mana energi mulai digunakan secara besar-besaran.

Pada awal abad ke-19, muncullah minyak bumi yang berperan sebagai sumber energi untuk pemanasan dan penerangan sehingga mulai menggantikan peran batubara. Kemudian, peran minyak bumi pun mulai digantikan oleh energi listrik pada akhir abad ke-19.

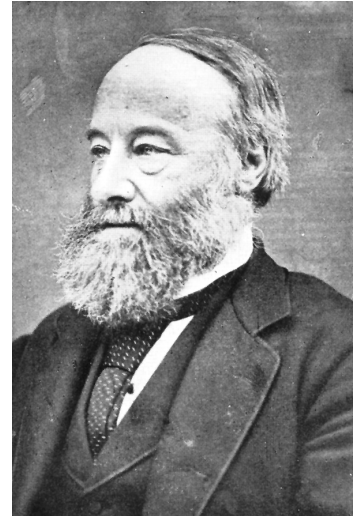


Gambar 4.4

Skema pembangkit listrik tenaga batubara.

Sumber: www.sbceo.k12.ca.us

Energi listrik dihasilkan dari proses pengubahan energi gerak putaran generator. Pada umumnya, sumber energi yang digunakan untuk memutar generator berasal dari minyak bumi, batubara, dan gas alam. Oleh karena energi listrik ini dihasilkan dari proses pengubahan energi lain yang tersedia di alam, energi listrik disebut juga energi sekunder. Energi listrik terus



Joule dilahirkan di Salford, Inggris. Ia mempelajari pengaruh pemanasan menggunakan aliran listrik dan menyadari bahwa panas adalah suatu bentuk energi. Namanya kemudian digunakan sebagai ukuran satuan energi.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

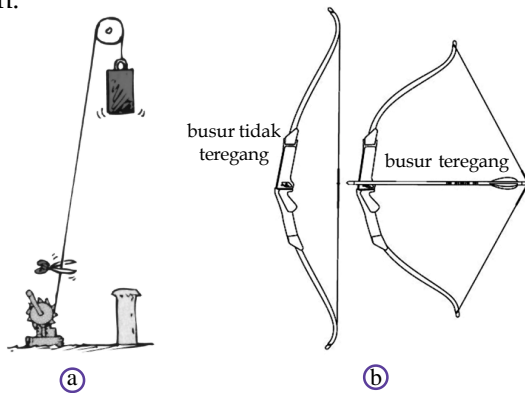
memegang peranan penting dalam kehidupan manusia sampai saat ini. Pada abad ke-20 ditemukan lagi alternatif sumber energi yang dapat dimanfaatkan oleh manusia, di antaranya energi panas bumi, nuklir, dan surya.

Apakah energi itu? Secara umum, dapat dikatakan bahwa energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Anda membutuhkan energi agar dapat berjalan, berlari, bekerja, dan melakukan berbagai aktivitas lainnya. Dari manakah energi yang Anda butuhkan untuk beraktivitas tersebut? Makanan dan minuman memberikan Anda energi kimia yang siap dibakar dalam tubuh sehingga akan dihasilkan energi yang Anda perlukan untuk melakukan usaha atau aktivitas sehari-hari. Mobil dan sepeda motor dapat bergerak karena adanya sumber energi kimia yang terkandung dalam bensin. Dapatkah Anda menyebutkan bentuk-bentuk energi lainnya yang Anda ketahui?

Energi baru dapat dirasakan manfaatnya apabila energi tersebut telah berubah bentuk. Contohnya, energi kimia dalam bahan bakar berubah menjadi energi gerak untuk memutar roda. Energi listrik berubah menjadi energi cahaya lampu, menjadi energi kalor pada setrika, *rice cooker*, *magic jar*, dan *dispenser*, serta menjadi energi gerak pada bor, mesin cuci, *mixer*, dan kipas angin.

2. Energi Potensial

Suatu benda dapat menyimpan energi karena kedudukan atau posisi benda tersebut. Contohnya, suatu beban yang diangkat setinggi h akan memiliki energi potensial, sementara busur panah yang berada pada posisi normal (saat busur itu tidak diregangkan) tidak memiliki energi potensial. Dengan demikian, energi potensial adalah energi yang tersimpan dalam suatu benda akibat kedudukan atau posisi benda tersebut dan suatu saat dapat dimunculkan.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Sumber: *27.photobucket.com*

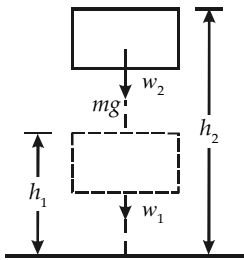
Energi potensial terbagi atas dua, yaitu energi potensial gravitasi dan energi potensial elastis. Energi potensial gravitasi ini timbul akibat tarikan gaya gravitasi Bumi yang bekerja pada benda. Contoh energi potensial gravitasi ini adalah seperti pada **Gambar 4.5a**. Jika massa beban diperbesar, energi potensial gravitasinya juga akan membesar. Demikian juga, apabila ketinggian benda dari tanah diperbesar, energi potensial gravitasi beban tersebut akan semakin besar. Hubungan ini dinyatakan dengan persamaan

$$EP = mgh \quad (4-3)$$

dengan: EP = energi potensial (joule),
 w = berat benda (newton) = mg ,
 m = massa benda (kg),
 g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2), dan
 h = tinggi benda (m).

Gambar 4.5

- (a) Beban yang digantung pada ketinggian tertentu memiliki energi potensial gravitasi.
- (b) Busur yang teregang memiliki energi potensial elastis, sedangkan yang tidak teregang tidak memiliki energi potensial.



Gambar 4.6

Usaha yang ditimbulkan oleh gaya berat sebesar W .

Sebuah benda yang berada pada suatu ketinggian tertentu apabila dilepaskan, akan bergerak jatuh bebas sebab benda tersebut memiliki energi potensial gravitasi. Energi potensial gravitasi benda yang mengalami jatuh bebas akan berubah karena usaha yang dilakukan oleh gaya berat.

Perhatikanlah **Gambar 4.6**. Apabila tinggi benda mula-mula h_1 , usaha yang dilakukan oleh gaya berat untuk mencapai tempat setinggi h_2 adalah sebesar:

$$W_w = mgh_1 - mgh_2$$

$$W_w = mg(h_1 - h_2)$$

$$W_w = -mg(h_2 - h_1) \quad (4-4)$$

dengan: W_w = usaha oleh gaya berat.

Oleh karena $mgh = EP$, perubahan energi potensial gravitasinya dapat dinyatakan sebagai ΔEP sehingga **Persamaan (4-4)** dapat dituliskan

$$W_w = \Delta EP \quad (4-5)$$

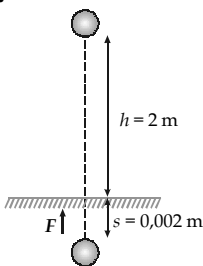
Solusi

Cerdas

Sebuah benda bermassa 0,10 kg jatuh bebas vertikal dari ketinggian 2 m ke hamparan pasir. Jika benda itu masuk sedalam 2 cm ke dalam pasir sebelum berhenti, besar gaya rata-rata yang dilakukan pasir untuk menghambat benda adalah sekitar

- 30 N
- 50 N
- 60 N
- 90 N
- 100 N

Penyelesaian



$$W = mg \Delta h$$

$$Fs = mg \Delta h$$

$$(F)(2 \text{ cm}) = (0,10 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(2,02 \text{ m})$$

$$F = 100,1 \text{ N} \sim 100 \text{ N}$$

Jawab: e

Soal UMPN 2001

Contoh 4.4

Mula-mula, sebuah benda dengan massa 2 kg berada di permukaan tanah. Kemudian, benda itu dipindahkan ke atas meja yang memiliki ketinggian 1,25 m dari tanah. Berapakah perubahan energi potensial benda tersebut? ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

Jawab

Diketahui: $m = 2 \text{ kg}$, $h_2 = 1,25 \text{ m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Perubahan energi potensial benda:

$$\Delta EP = mg(h_2 - h_1)$$

$$= (2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(1,25 \text{ m} - 0 \text{ m}) = 25 \text{ joule}$$

Jadi, perubahan energi potensialnya 25 joule.

Contoh 4.5

Sebuah benda berada pada ketinggian 40 m dari tanah. Kemudian, benda itu jatuh bebas. Berapakah usaha yang dilakukan oleh gaya berat hingga benda sampai ke tanah? Diketahui massa benda adalah 1,5 kg dan percepatan gravitasi bumi 10 m/s^2 .

Jawab

Diketahui: $h_1 = 40 \text{ m}$, $h_2 = 0$, $m = 1,5 \text{ kg}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$W_w = mgh_1 - mgh_2$$

$$W_w = mg(h_1 - h_2)$$

$$W_w = (1,5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(40 \text{ m} - 0 \text{ m})$$

$$W_w = 600 \text{ joule}$$

Bentuk energi potensial yang kedua adalah energi potensial elastis. Energi potensial adalah energi yang tersimpan di dalam benda elastis karena adanya gaya tekan dan gaya regang yang bekerja pada benda. Contoh energi potensial ini ditunjukkan pada **Gambar 4.5b**. Besarnya energi potensial elastis bergantung pada besarnya gaya tekan atau gaya regang yang diberikan pada benda tersebut.

Anda telah mempelajari sifat elastis pada pegas dan telah mengetahui bahwa gaya pemulih pada pegas berbanding lurus dengan pertambahan panjangnya. Pegas yang berada dalam keadaan tertekan atau teregang dikatakan memiliki energi potensial elastis karena pegas tidak berada dalam keadaan posisi setimbang. Perhatikanlah **Gambar 4.7**. Grafik tersebut menunjukkan kurva hubungan antara gaya dan pertambahan panjang pegas yang memenuhi Hukum Hooke. Jika pada saat Anda menarik pegas dengan

gaya sebesar F_1 , pegas itu bertambah panjang sebesar Δx_1 . Demikian pula, jika Anda menarik pegas dengan gaya sebesar F_2 , pegas akan bertambah panjang sebesar Δx_2 . Begitu seterusnya. Dengan demikian, usaha total yang Anda berikan untuk meregangkan pegas adalah

$$W = F_1 \Delta x_1 + F_2 \Delta x_2 + \dots$$

Besarnya usaha total ini sama dengan luas segitiga di bawah kurva F terhadap Δx sehingga dapat dituliskan

$$W = \frac{1}{2} F \Delta x$$

$$W = \frac{1}{2} (k \Delta x \Delta x)$$

$$W = \frac{1}{2} k \Delta x^2 \quad (4-6)$$

Oleh karena usaha yang diberikan pada pegas ini akan tersimpan sebagai energi potensial, dapat dituliskan persamaan energi potensial pegas adalah sebagai berikut.

$$EP = \frac{1}{2} k \Delta x^2$$

Energi potensial pegas ini juga dapat berubah karena usaha yang dilakukan oleh gaya pegas. Besar usaha yang dilakukan oleh gaya pegas itu dituliskan dengan persamaan

$$W = -\Delta EP \quad (4-7)$$

Contoh 4.6

Sebuah pegas yang tergantung tanpa beban panjangnya 15 cm. Kemudian, ujung bawah pegas diberi beban 5 kg sehingga pegas bertambah panjang menjadi 20 cm. Tentukanlah:

- tetapan pegas, dan
- energi potensial elastis pegas.

Jawab

Diketahui: $\ell_0 = 15$ cm, $\ell_1 = 20$ cm = 0,2 m, dan $m = 5$ kg.

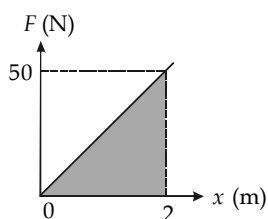
$$a \quad k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{mg}{\Delta x} = \frac{(5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)}{(20 \text{ cm} - 15 \text{ cm}) \times 10^{-2}} = 1.000 \text{ N/m}$$

$$b. \quad W = \frac{1}{2} k (\Delta x)^2 = \frac{1}{2} (1.000 \text{ N/m})(5 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 1,25 \text{ joule}$$

atau

$$W = \frac{1}{2} F (\Delta x) = \frac{1}{2} (50 \text{ N})(5 \times 10^{-2} \text{ m}) = 1,25 \text{ joule}$$

Contoh 4.7



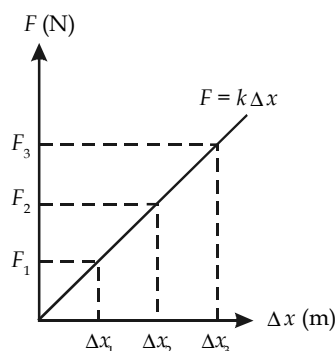
Perhatikan grafik hubungan gaya (F) dan pertambahan panjang pegas (Δx) berikut.

Tentukan energi potensial elastis pegas pada saat pegas ditarik dengan gaya 50 N.

Jawab

Diketahui $F = 50$ N.

$$W = \frac{1}{2} (F) (\Delta x) = \frac{1}{2} (50 \text{ N}) (2 \text{ m}) = 50 \text{ joule}$$



Gambar 4.7

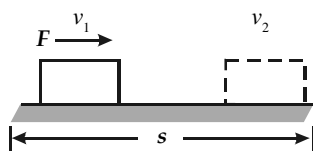
Grafik hubungan F terhadap Δx pada kurva $F = k \Delta x$.



3. Energi Kinetik

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki suatu benda karena gerakannya. Jadi, setiap benda yang bergerak memiliki energi kinetik. Contohnya, energi kinetik dimiliki oleh mobil yang sedang melaju, pesawat yang sedang terbang, dan anak yang sedang berlari.

Perhatikanlah **Gambar 4.8**. Benda bermassa m_1 bergerak dengan kecepatan v_1 . Benda tersebut bergerak lurus berubah beraturan sehingga setelah menempuh jarak sebesar s , kecepatan benda berubah menjadi v_2 . Oleh karena itu, pada benda berlaku persamaan $v_2 = v_1 + at$ dan $s = v_1t + \frac{1}{2}at^2$. Anda telah mengetahui bahwa percepatan yang timbul pada gerak lurus berubah beraturan berhubungan dengan gaya F yang bekerja padanya sehingga benda bergerak dengan percepatan a .



Gambar 4.8

Gaya F menyebabkan benda bergerak sejauh s sehingga kecepatan benda berubah dari v_1 menjadi v_2 .

Besar usaha yang dilakukan gaya sebesar F pada benda dapat dihitung dengan persamaan

$$W = Fs = mas \quad (4-8)$$

Oleh karena gerak benda adalah gerak lurus berubah beraturan, nilai a dan s pada **Persamaan (4-8)** dapat disubstitusikan dengan persamaan a dan s dari gerak lurus berubah beraturan, yaitu

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} \quad \text{dan} \quad s = \frac{1}{2}(v_2 + v_1)t$$

sehingga diperoleh

$$W = m \left(\frac{v_2 - v_1}{t} \right) \frac{1}{2}(v_2 + v_1)t$$

$$Fs = m(v_2 - v_1)(v_2 + v_1)$$

$$Fs = \frac{1}{2}(mv_2^2 - mv_1^2) \quad (4-9)$$

Besaran $\frac{1}{2}mv^2$ merupakan energi kinetik benda karena menyatakan kemampuan benda untuk melakukan usaha. Secara umum, persamaan energi kinetik dituliskan sebagai

$$EK = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4-10)$$

dengan: EK = energi kinetik (joule),
 m = massa benda (kg), dan
 v = kecepatan benda (m/s).

Dari **Persamaan (4-10)**, Anda dapat memahami bahwa energi kinetik benda berbanding lurus dengan kuadrat kecepatannya. Apabila kecepatan benda meningkat dua kali lipat kecepatan semula, energi kinetik benda akan naik menjadi empat kali lipat. Dengan demikian, semakin besar kecepatan suatu benda, energi kinetiknya akan semakin besar pula.

Perubahan energi kinetik benda dari $EK = \frac{1}{2}mv_1^2$ menjadi $EK = \frac{1}{2}mv_2^2$ merupakan besar usaha yang dilakukan oleh resultan gaya yang bekerja pada benda. Secara matematis, persamaannya dapat dituliskan sebagai

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$W = EK_2 - EK_1 = \Delta EK \quad (4-11)$$

Perlu Anda

Ketahui

Dalam meninjau persamaan gerak benda satu dimensi, semua besaran vektor dituliskan sebagai besaran skalar.

Contoh 4.8

Sebuah peluru yang massanya 10 gram, bergerak dengan kecepatan 80 m/s. Tentukanlah energi kinetik peluru pada saat itu.

Jawab

Diketahui: $m = 10 \text{ gram} = 1 \times 10^{-2} \text{ kg}$ dan $v = 80 \text{ m/s}$.

Energi kinetik peluru adalah

$$EK = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(1 \times 10^{-2} \text{ kg})(80 \text{ m/s})^2 = 32 \text{ joule.}$$

Contoh 4.9

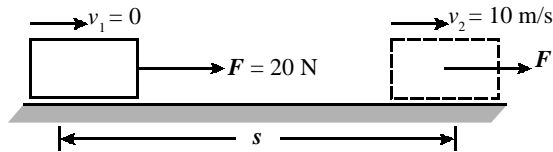
Sebuah benda bermassa 2 kg berada dalam keadaan diam pada sebuah bidang datar yang licin. Kemudian, pada benda tersebut bekerja sebuah gaya $F = 20 \text{ N}$ sehingga kecepatannya menjadi 10 m/s.

Tentukanlah:

- usaha yang dilakukan oleh gaya F , dan
- jarak yang telah ditempuh.

Jawab

Diketahui: mula-mula benda dalam keadaan diam, berarti $v_1 = 0$, v_2 sebesar 10 m/s, dan massa benda $m = 2 \text{ kg}$.



Dengan mempergunakan **Persamaan (4-10)**, diperoleh:

- Usaha yang dilakukan oleh gaya F :

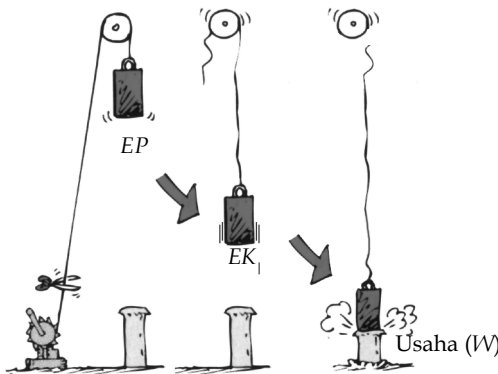
$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \\ &= \left(\frac{1}{2}\right)(2 \text{ kg})(10 \text{ m/s})^2 - 0 \\ &= 100 \text{ joule.} \end{aligned}$$

- jarak yang ditempuh:

$$\begin{aligned} W &= Fs \rightarrow 100 \text{ J} = (20 \text{ N})(s) \\ s &= \frac{100 \text{ J}}{20 \text{ N}} = 5 \text{ meter} \end{aligned}$$

4. Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Dalam proses melakukan usaha, benda yang melakukan usaha itu memindahkan energi yang dimilikinya ke benda lain. Energi yang dimiliki benda agar benda itu dapat melakukan usaha dinamakan energi mekanik.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Loncatan Kuantum

Ketiga mesin utama pesawat luar angkasa dapat menghasilkan daya sebesar 33.000 MW. Daya sebesar ini dihasilkan ketiga mesin tersebut dengan membakar 3.400 kg bahan bakar setiap sekon. Hal ini, seperti mengosongkan kolam renang berukuran sedang dalam waktu 20 sekon.

Quantum Leap

The three main engines of a space shuttle can develop 33.000 MW of power when fuel is burned at the enormous rate of 3.4000 kg/s. This is like emptying an average size swimming pool in 20 s.

Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Gambar 4.9

Energi mekanik benda dalam bentuk energi potensial dan energi kinetik dapat diubah menjadi usaha.



Perhatikanlah **Gambar 4.9**. Beban yang ditarik sampai di ketinggian h memiliki energi mekanik dalam bentuk energi potensial. Saat tali yang menahan berat beban digunting, energi berubah menjadi energi kinetik. Selanjutnya, saat beban menumbuk pasak yang terletak di bawahnya, beban tersebut memberikan gaya yang menyebabkan pasak terbenam ke dalam tanah. Beban itu dikatakan melakukan usaha pada pasak.

Dengan demikian, energi mekanik dapat didefinisikan sebagai jumlah energi potensial dan energi kinetik yang dimiliki oleh suatu benda, atau disebut juga energi total. Besarnya energi mekanik suatu benda selalu tetap, sedangkan energi kinetik dan energi potensialnya dapat berubah-ubah. Penulisan secara matematis adalah sebagai berikut.

$$EM = EP + EK \quad (4-12)$$

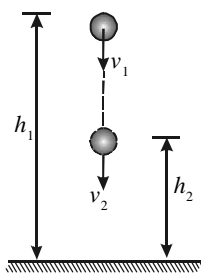
Benda yang jatuh bebas akan mengalami perubahan energi kinetik dan energi potensial gravitasi. Perhatikanlah **Gambar 4.10**. Suatu bola dilepaskan dari suatu ketinggian sehingga saat bola berada pada ketinggian h_1 dari permukaan tanah, bola itu memiliki v_1 . Setelah mencapai ketinggian h_2 dari permukaan tanah, kecepatan benda berubah menjadi v_2 .

Saat bola benda berada di ketinggian h_1 , energi potensial gravitasinya adalah EP_1 dan energi kinetiknya EK_1 . Saat benda mencapai ketinggian h_2 , energi potensialnya dinyatakan sebagai EP_2 dan energi kinetiknya EK_2 . Anda telah mempelajari bahwa perubahan energi kinetik dan energi potensial benda adalah usaha yang dilakukan gaya pada benda. Dengan demikian, dapat dituliskan

$$\begin{aligned} W &= \Delta EK = \Delta EP \\ EK_2 - EK_1 &= EP_1 - EP_2 \\ EP_1 + EK_1 &= EP_2 + EK_2 \end{aligned}$$

$$mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (4-13)$$

Persamaan (4-13) ini disebut Hukum Kekekalan Energi Mekanik.



Gambar 4.10

Hukum Kekekalan Energi Mekanik suatu bola yang jatuh bebas dari ketinggian h_1 dengan kecepatan awal v_1 ke ketinggian h_2 dengan kecepatan v_2 .

Contoh 4.10

Sebuah benda berada dalam keadaan diam pada ketinggian 80 cm dari permukaan tanah. Massa benda 5 kg dan percepatan gravitasi bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$. Tentukan energi mekanik benda tersebut.

Jawab

Diketahui: $v = 0 \text{ m/s}$, $h = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$EM = EP + EK$$

$$= mgh + \frac{1}{2}mv^2$$

$$= (5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(0,8 \text{ m}) + 0 = 40 \text{ joule}$$

Jadi, energi mekanik benda yang diam akan sama dengan energi potensialnya karena energi kinetiknya nol.

Kata Kunci

- Energi potensial elastis
- Energi potensial gravitasi
- Energi kinetik
- Energi mekanik
- Hukum Kekekalan Energi Mekanik

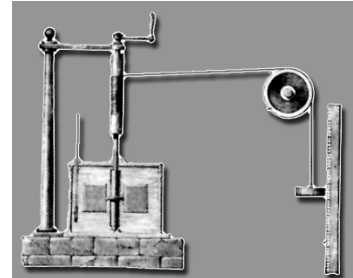
Contoh 4.11

Sebuah bola yang massanya 2 kg jatuh bebas dari ketinggian 30 meter. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, pada saat bola tersebut mencapai ketinggian 10 meter dari permukaan tanah, tentukanlah:

- a. kecepatannya,
- b. energi kinetiknya, dan
- c. energi potensialnya.

Jelajah Fisika

Alat Percobaan Joule



Alat tersebut digunakan oleh James Joule untuk mengukur padanan mekanis dengan panas. Dengan membandingkan usaha yang dilakukan pemberat yang jatuh dengan panas yang dihasilkan, Joule berkesimpulan bahwa jumlah usaha yang sama selalu menghasilkan jumlah panas yang sama.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Jawab

Diketahui: $m = 2 \text{ kg}$, $h_1 = 30 \text{ m}$, $h_2 = 10 \text{ m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

a. Kecepatan pada kedudukan (2):

$$v_2^2 = v_1^2 + 2g(h_1 - h_2) = 0 + (2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(20 \text{ m})$$

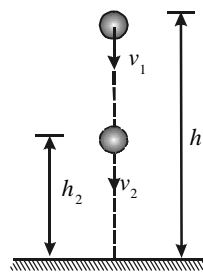
$$= \sqrt{400} = 20 \text{ m/s}$$

b. Energi kinetik pada kedudukan (2):

$$EK_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2} (2 \text{ kg})(20 \text{ m/s})^2 = 400 \text{ joule}$$

c. Energi potensial pada kedudukan (2):

$$EP_2 = mgh_2 = (2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(10 \text{ m}) = 400 \text{ joule}$$



Contoh 4.12

Sebuah benda jatuh dari ketinggian 6 meter dari atas tanah. Berapakah kecepatan benda tersebut pada saat mencapai ketinggian 1 meter dari tanah, jika percepatan gravitasi bumi 10 m/s^2 ?

Jawab

Diketahui: $h_1 = 6 \text{ m}$, $h_2 = 1 \text{ m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$EP_1 + EK_1 = EP_2 + EK_2$$

$$mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$gh_1 + \frac{1}{2}v_1^2 = gh_2 + \frac{1}{2}v_2^2$$

Benda jatuh bebas, berarti $v_1 = 0$ maka

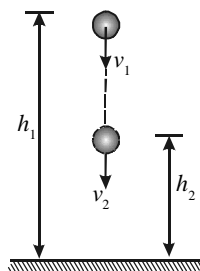
$$gh_1 = gh_2 + \frac{1}{2}v_2^2$$

$$(10 \text{ m/s}^2)(6 \text{ m}) = (10 \text{ m/s}^2)(1 \text{ m}) + \frac{1}{2}v_2^2$$

$$60 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 10 \text{ m}^2/\text{s}^2 + \frac{1}{2}v_2^2$$

$$50 \text{ m}^2/\text{s}^2 = \frac{1}{2}v_2^2 \rightarrow v_2^2 = 100 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$v = 10 \text{ m/s}$$



Soal Penguasaan Materi 4.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah peluru dengan massa 100 gram ditembakkan vertikal ke atas dari permukaan tanah dengan kecepatan 80 m/s. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah:
 - tinggi maksimum yang dicapai peluru;
 - energi peluru di titik tertinggi;
 - energi kinetik peluru pada ketinggian 40 m dari tanah;
- Sebuah benda ditembakkan miring ke atas dengan sudut elevasi 53° dan dengan energi kinetik 1.000 J. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah:
 - energi kinetik benda pada saat mencapai titik tertinggi, dan
 - energi potensial benda saat mencapai titik tertinggi.
- Sebuah benda digantung bebas dengan tali yang panjangnya 75 cm, massa benda 100 gram, dan percepatan gravitasi bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$. Kemudian, benda tersebut diayun sehingga tali dapat membentuk simpangan maksimum 37° terhadap sumbu vertikal. Berapakah:
 - energi potensialnya di titik tertinggi,
 - energi kinetiknya di titik terendah, dan
 - kecepatan maksimum benda.



C Daya

1. Pengertian Daya

Besaran usaha menyatakan gaya yang menyebabkan perpindahan benda. Namun, besaran ini tidak memperhitungkan lama waktu gaya itu bekerja pada benda sehingga menyebabkan benda berpindah. Kadang-kadang usaha dilakukan sangat cepat dan di saat lain usaha dilakukan sangat lambat. Misalnya, Ani mendorong lemari untuk memindahkannya dari pojok kamar ke sisi lain kamar yang berjarak 3 m. Dalam melakukan usahanya itu, Ani membutuhkan waktu 5 menit. Apabila lemari yang sama dipindahkan oleh Arif, ia membutuhkan waktu 3 menit. Ani dan Arif melakukan usaha yang sama, namun keduanya membutuhkan waktu yang berbeda. Besaran yang menyatakan besar usaha yang dilakukan per satuan waktu dinamakan daya. Dengan demikian, Anda dapat mengatakan bahwa Arif memiliki daya yang lebih besar daripada Ani.

Daya didefinisikan sebagai kelajuan usaha atau usaha per satuan waktu. Daya dituliskan secara matematis sebagai berikut.

$$P = \frac{W}{t} \quad (4-14)$$

dengan: W = usaha (joule),
 t = waktu (sekon), dan
 P = daya (J/s atau watt).

Mobil, motor, atau mesin-mesin lainnya sering dinyatakan memiliki daya sekian hp (*horse power*) yang diterjemahkan dalam Bahasa Indonesia sebagai daya kuda dengan 1 hp = 746 watt.

Dalam perhitungan teknik, besarnya 1 hp kadang-kadang dibulatkan, yaitu 1 hp = 750 watt. Hubungan antara daya dan kecepatan diturunkan sebagai berikut.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \frac{s}{t} = F \cdot v \quad (4-15)$$

dengan: F = gaya (N), dan
 v = kecepatan (m/s).

Mahir Meneliti

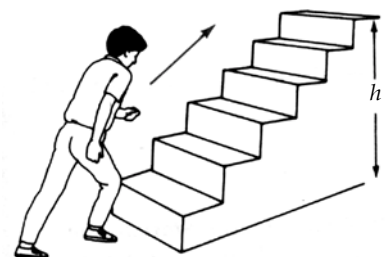
Menghitung Daya Saat Menaiki Tangga

Alat dan Bahan

1. Dua orang (Anda dan salah seorang teman Anda)
2. Tangga
3. *Stopwatch*
4. Timbangan
5. Meteran

Prosedur

1. Timbanglah berat badan Anda, kemudian konversikan satuannya dalam Newton.
2. Ukurlah tinggi tangga (h).
3. Jalankan *stopwatch* dan larilah ke atas tangga secepat yang Anda mampu. Hitunglah jumlah anak tangga yang Anda lalui sambil berlari.
4. Hentikan *stopwatch* saat Anda mencapai puncak tangga.



5. Hitunglah daya yang telah Anda keluarkan saat berlari menaiki tangga menurut persamaan berikut.

$$\text{daya} = \frac{\text{usaha yang dilakukan}}{\text{waktu yang dibutuhkan}} = \frac{\text{berat badan} \times \text{jarak vertikal}}{\text{waktu yang dibutuhkan}}$$

6. Ulangilah langkah 1 sampai dengan 5, tetapi kegiatannya dilakukan oleh teman Anda. Samakah daya yang Anda keluarkan dengan teman Anda? Diskusikan.
7. Apakah kesimpulan yang Anda dapatkan dari kegiatan ini?

Contoh 4.13

Seorang petugas PLN yang massanya 50 kg menaiki tangga sebuah tower yang tingginya 30 m dalam waktu 2 menit. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah daya yang dikeluarkan petugas PLN tersebut?

Jawab

Diketahui: $m = 50 \text{ kg}$, $h = 30 \text{ m}$, $t = 2 \text{ menit}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{mgh}{t} = \frac{(50 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(30 \text{ m})}{(2)(60) \text{ s}} = 125 \text{ watt}$$

Contoh 4.14

Sebuah mesin pesawat terbang mampu memberikan gaya dorong sebesar 20.000 N. Berapakah daya yang dihasilkan mesin ketika pesawat mengangkasa dengan kecepatan 250 m/s?

Jawab

Diketahui: $F = 20.000 \text{ N}$ dan $v = 250 \text{ m/s}$

$$P = Fv = (20.000 \text{ N})(250 \text{ m/s}) = 5.000.000 \text{ watt}$$

2. Efisiensi atau Daya Guna Pengubah Energi

Anda telah mempelajari bahwa energi akan terasa manfaatnya ketika energi tersebut berubah bentuk menjadi energi lain, seperti energi listrik akan terasa manfaatnya jika berubah menjadi cahaya, gerak, panas, atau bentuk energi yang lainnya. Akan tetapi, alat atau mesin pengubah energi tidak mungkin mengubah seluruh energi yang diterimanya menjadi energi yang bermanfaat. Sebagian energi akan berubah menjadi energi yang tidak bermanfaat atau terbuang yang biasanya dalam bentuk energi kalor atau panas.

Perbandingan antara energi yang bermanfaat (keluaran) dan energi yang diterima oleh alat pengubah energi (masukan) disebut efisiensi. Secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\text{Efisiensi: } \eta = \frac{\text{energi keluaran}}{\text{energi masukan}} \times 100\%$$

Contoh 4.15

Sebuah motor yang memiliki daya 1.800 watt mampu mengangkat beban sebesar 1.200 N sampai ketinggian 50 m dalam waktu 20 sek. Berapakah efisiensi motor itu?

Kata Kunci

- Daya
- Efisiensi



Jawab

Diketahui: $P = 1.800$ watt, $F = 1.200$ N, $s = 50$ m, dan $t = 20$ s.

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi: } \eta &= \frac{\text{Energi keluaran}}{\text{Energi masukan}} \times 100\% \\ &= \frac{Pt}{Fs} \times 100\% = \frac{(1.800 \text{ watt})(20 \text{ s})}{(1.200 \text{ N})(50 \text{ m})} \times 100\% = 60\% . \end{aligned}$$

Soal Penguasaan Materi 4.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah lift mampu mengangkut 10 penumpang (massa tiap penumpang = 50 kg) setinggi 10 m dalam waktu 15 sekon. Jika massa lift 1.000 kg dan $g = 10$ m/s², berapakah daya lift itu?
- Air terjun yang ketinggiannya 60 m mengalirkan air sebanyak 10 m³ setiap sekon sehingga turbin berputar dan generator menghasilkan daya sebesar 300 MW. Hitunglah efisiensi generator tersebut.
- Aliran air setinggi 8 m digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Setiap sekon air mengalir sebanyak 10 m³. Jika efisiensi generator 60% dan percepatan gravitasi $g = 10$ m/s², berapakah daya rata-rata yang dihasilkan (dalam kW)?

Pembahasan Soal SPMB

Besarnya usaha yang diperlukan untuk menggerakkan mobil (massa mobil dan isinya adalah 1.000 kg) dari keadaan diam hingga mencapai kecepatan 72 km/jam adalah (gesekan diabaikan):

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| a. $1,25 \times 10^4$ J | d. $6,25 \times 10^4$ J |
| b. $2,50 \times 10^4$ J | e. $4,00 \times 10^4$ J |
| c. $2,00 \times 10^4$ J | |

Jawab:

Usaha = Perubahan energi kinetik

$$W = \Delta EK$$

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = \left(\frac{1}{2}\right)(10^3 \text{ kg})(20^2 \text{ m/s})$$

karena: $v = 72$ km/jam = 20 m/s

$$W = 2 \times 10^5 \text{ joule}$$

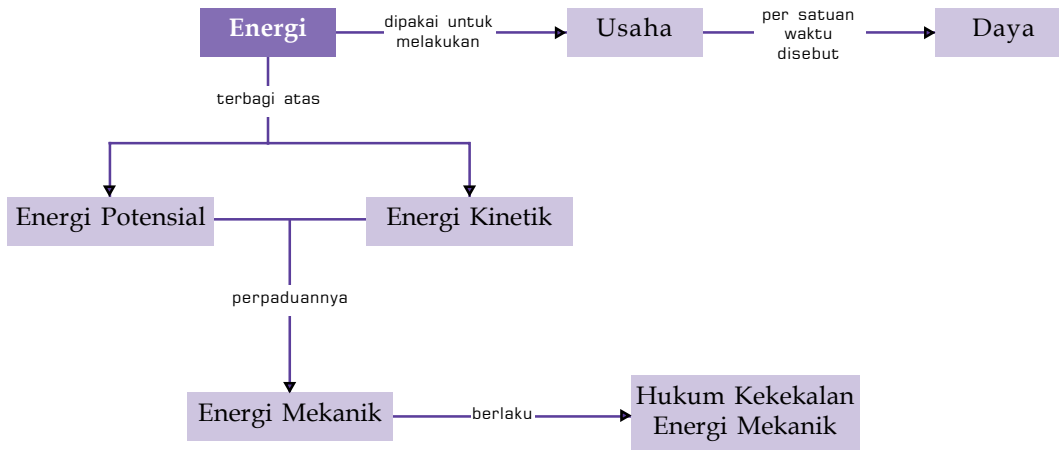
Jawab: c

Soal Fisika UMPTN'94 Rayon A

Rangkuman

- Usaha** adalah perkalian antara gaya dan perpindahan benda. Satuannya dalam joule, $W = F \cdot s$
- Energi** adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Energi tidak dapat dimusnahkan. Energi hanya dapat berubah bentuk.
- Energi potensial** adalah energi yang dimiliki benda karena kedudukannya (posisinya), yaitu $EP = mgh$
- Energi kinetik** adalah energi yang dimiliki oleh benda yang bergerak, yaitu $EK = \frac{1}{2}mv^2$
- Energi mekanik** adalah jumlah energi potensial dan energi kinetik yang terdapat pada benda, yaitu $EM = EP + EK$
- Hukum Kekekalan Energi Mekanik** menyatakan bahwa energi mekanik benda tetap. Hukum ini berlaku apabila tidak terdapat gaya luar yang bekerja pada benda. $EM_1 = EM_2$
 $EK_1 + EK_1 = EP_2 + EK_2$
- Daya** dinyatakan sebagai usaha per satuan waktu. Satuannya dalam joule/sekon atau watt. $P = \frac{W}{t}$
- Efisiensi** adalah perbandingan antara energi atau daya keluaran dan masukan
Efisiensi (η) = $\frac{\text{energi keluaran}}{\text{energi masukan}} \times 100\%$

Peta Konsep



Kaji Diri

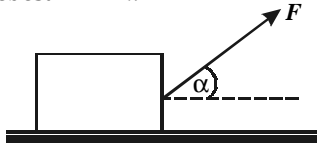
Setelah mempelajari bab Energi, Usaha, dan Daya, Anda dapat menganalisis hubungan antara usaha, perubahan energi dengan hukum kekekalan energi mekanik untuk menganalisis gerak dalam kehidupan sehari-hari. Jika Anda belum mampu menganalisis hubungan antara usaha, perubahan energi dengan hukum kekekalan energi mekanik untuk menganalisis gerak dalam kehidupan sehari-hari, Anda belum menguasai

materi bab Energi, Usaha, dan Daya dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 4

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

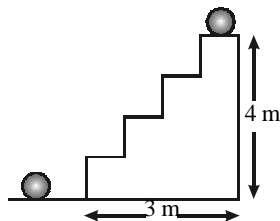
1. Untuk menarik sebuah balok dengan posisi seperti terlihat pada gambar, Ujang memerlukan gaya sebesar 22 N.



Jika diberikan usaha sebesar 33 joule, balok bergeser sejauh 3 m ke kanan. Sudut α pada gambar tersebut adalah

- a. 30° d. 53°
 b. 37° e. 60°
 c. 45°
2. Sebuah gaya $F = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j})$ N melakukan usaha dengan titik tangkapnya berpindah menurut $r = (4\mathbf{i} + a\mathbf{j})$ m dan vektor \mathbf{i} dan \mathbf{j} berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu- x dan sumbu- y pada koordinat Cartesian. Apabila usaha itu bernilai 26 J, nilai a sama dengan
- a. 5 d. 8
 b. 6 e. 12
 c. 7
3. Sebuah benda yang beratnya 10 newton berpindah dalam arah horizontal sejauh 100 cm. Usaha yang dilakukan oleh gaya berat adalah
- a. 1.000 joule d. 0,1 joule
 b. 100 joule e. nol
 c. 10 joule
4. Mesin pengangkat (derek) digunakan untuk mengangkat sebuah benda yang massanya 1 ton sampai setinggi 5 meter ($g = 10 \text{ m/s}^2$). Usaha yang dilakukan oleh mesin untuk mengangkat benda tersebut adalah sebesar
- a. 5 kJ d. 20 kJ
 b. 10 kJ e. 50 kJ
 c. 15 kJ

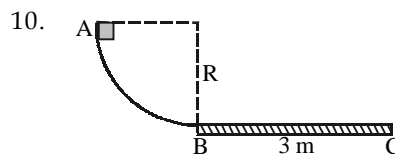
5. Atun memindahkan bola besi dari bawah ke atas dengan menaiki anak tangga, seperti terlihat pada gambar. Jika massa bola sebesar 2 kg, $g = 10 \text{ m/s}^2$, usaha yang dilakukan Atun sebesar



- a. 20 J d. 80 J
 b. 40 J e. 100 J
 c. 60 J
6. Jika gaya interaksi satelit dan Bumi pada orbit lingkaran adalah 10.000 N, besarnya usaha yang dilakukan Bumi terhadap satelit adalah

- a. 10.000 J d. 1.250 J
 b. 5.000 J e. 0 J
 c. 2.500 J

7. Sebuah tongkat yang panjangnya 40 cm dan tegak di atas permukaan tanah, dijatuhkan martil 10 kg dari ketinggian 50 cm di atas ujungnya. Apabila gaya tahan rata-rata tanah 103 N, banyaknya tumbukan martil yang perlu dilakukan terhadap tongkat agar rata dengan permukaan tanah adalah
- a. 4 kali d. 8 kali
 b. 5 kali e. 10 kali
 c. 6 kali
8. Sebuah benda digantung bebas dengan panjang tali 2 m. Massa benda 100 gram dan percepatan gravitasi Bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$. Kemudian, benda tersebut diayun sehingga tali dapat membentuk simpangan maksimum sebesar 60° terhadap sumbu vertikal. Ini menunjukkan energi yang diberikan pada benda adalah
- a. 0,25 J d. 2,0 J
 b. 0,50 J e. 2,5 J
 c. 1,0 J
9. Sebuah bola logam dengan massa 2 kg ($g = 10 \text{ m/s}^2$) dilemparkan ke atas dari ketinggian 2 m dari permukaan lantai. Besarnya energi potensial bola logam ketika usaha yang dilakukan gaya berat bola terhadap meja tepat sebesar 100 joule adalah
- a. 40 J d. 10 J
 b. 60 J e. 140 J
 c. 80 J



Sebuah balok bermassa 2 kg berada dalam keadaan diam. Kemudian, balok dilepaskan dari puncak bidang lengkung yang berbentuk seperempat lingkaran dengan jari-jari R. Balok meluncur pada bidang datar dan berhenti di titik C. Jika bidang lengkung tersebut licin, dan gaya gesek antara balok dan bidang datar adalah sebesar 8 N maka besarnya R adalah

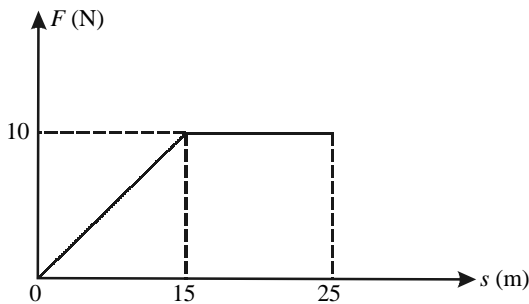
- a. 0,2 m d. 1,5 m
 b. 0,5 m e. 1,6 m
 c. 1,2 m
11. Apabila hukum kekekalan energi mekanik berlaku untuk suatu sistem, dapat dikatakan
- a. energi kinetik sistem tidak berubah
 b. energi potensial sistem tidak berubah
 c. jumlah energi kinetik dan energi potensial selalu bertambah

- d. jumlah energi kinetik dan energi potensial selalu berkurang
 e. jumlah energi kinetik dan energi potensial selalu tetap
12. Apabila Siswo bersepeda menuruni bukit tanpa mengayuh pedalnya dan besar kecepatan sepeda tetap, terjadi perubahan energi dari
 a. kinetik menjadi potensial
 b. potensial menjadi kinetik
 c. potensial menjadi kalor
 d. kalor menjadi potensial
 e. kinetik menjadi kalor
13. Sebuah pesawat terbang bergerak dengan energi kinetik T . Jika kecepatannya menjadi dua kali kecepatan semula, energi kinetiknya menjadi
 a. $\frac{1}{2}T$ d. $4T$
 b. T e. $16T$
 c. $2T$
14. Benda bermassa 5 kg yang mula-mula diam, dipercepat oleh suatu gaya tetap sebesar 10 N. Setelah menempuh jarak 9 m, kelajuan benda tersebut menjadi
 a. 118 m/s d. 4,5 m/s
 b. 36 m/s e. 3,6 m/s
 c. 6 m/s
15. Massa sebesar 2 kg digantung pada pegas yang mempunyai tetapan gaya 1.000 N/m sehingga mencapai keadaan diam setimbang. Usaha yang diperlukan untuk mengubah simpangan benda (dari posisi setimbangnya) dari 2 cm menjadi 8 cm adalah sebesar
 a. 10 J d. 4 J
 b. 8 J e. 3 J
 c. 6 J
16. Sebuah pistol mainan bekerja dengan menggunakan pegas untuk melontarkan peluru. Jika pistol yang sudah dalam keadaan terkong, yaitu dengan menekan pegas pistol sejauh x , diarahkan dengan membuat sudut elevasi θ terhadap sumbu horizontal, peluru yang terlepas dapat mencapai ketinggian h . Apabila massa peluru m dan percepatan gravitasi g , konstanta pegas adalah...
 a. $k = \frac{2mgh}{x^2 \cos^2 \theta}$ d. $k = \frac{mgh}{x^2 \sin^2 \theta}$
 b. $k = \frac{2mgh}{x^2 \sin^2 \theta}$ e. $k = \frac{2mgh}{x^2 \text{tg}^2 \theta}$
 c. $k = \frac{mgh}{x^2 \cos^2 \theta}$
17. Air terjun yang tingginya 12 m menerjunkan air sebanyak 1.000 m³/s dan dimanfaatkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Apabila percepatan gravitasi 9,8 m/s² dan seluruh daya listrik terpakai untuk memanaskan 1.000 m³ air, kenaikan suhu air per sekon adalah (°C)
 a. $0,1 \times 10^{-2}$
 b. $2,8 \times 10^{-2}$
 c. $4,2 \times 10^{-2}$
 d. $28,0 \times 10^{-2}$
 e. $42,0 \times 10^{-2}$
18. Sebuah mobil bermassa m memiliki mesin berdaya P . Jika pengaruh gesekan kecil, waktu minimum yang diperlukan mobil agar mencapai kecepatan v dari keadaan diam adalah
 a. $\frac{mv}{P}$
 b. $\frac{2P}{mv^2}$
 c. $\frac{P}{mv^2}$
 d. $\frac{mv^2}{2P}$
 e. $\frac{mv^2}{P}$
19. Sebuah mesin pesawat terbang yang memiliki daya sebesar 7,5 MW mampu memberikan gaya dorong maksimum sebesar 25.000 N. Kecepatan maksimum pesawat terbang itu adalah
 a. 200 m/s
 b. 250 m/s
 c. 300 m/s
 d. 325 m/s
 e. 350 m/s
20. Aliran air setinggi 20 m digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Setiap sekon, air mengalir sebanyak 10 m³. Jika efisiensi generator adalah 55% dan percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, daya rata-rata yang dihasilkan generator (dalam kW) adalah sebesar
 a. 110
 b. 1.100
 c. 2.200
 d. 2.500
 e. 5.500



B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

1.



Grafik tersebut menyatakan besar gaya yang bekerja pada suatu benda bermassa 1 kg sehingga benda mengalami perpindahan sejauh 25 m. Jika benda mula-mula diam, berapakah besarnya kecepatan benda itu setelah berpindah sejauh 25 m?

2. Sebuah benda meluncur pada permukaan datar dengan kecepatan 4 m/s. Kemudian, benda naik pada bidang miring dengan kemiringan 30° . Apabila tidak ada gesekan antara benda dan bidang licin, tentukanlah panjang lintasan bidang miring.
- 3.



Benda bermassa 2 kg dilepaskan dari puncak seperempat lingkaran yang berjari-jari 2 m. Jika AB dan CD licin serta permukaan BC kasar dengan koefisien gesekan kinetik 0,2, tentukanlah:

- energi potensial benda di titik D;
 - posisi tertinggi yang dicapai benda pada lintasan AB;
 - berapa kali benda melintasi BC dan di mana benda akhirnya berhenti?
4. Sebuah benda jatuh bebas dari tempat yang tingginya 80 m. Jika energi potensial mula-mula besarnya 4.000 joule dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:
- massa benda itu;
 - waktu benda sampai di tanah;
 - kecepatan benda tepat sebelum sampai di tanah;
 - energi kinetik benda tepat sebelum sampai di tanah.
5. Sebuah benda bermassa 2 kg terletak di tanah. Benda itu ditarik secara vertikal ke atas dengan gaya 25 N selama 2 sekon, lalu dilepaskan. Jika percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah energi kinetik benda pada saat mengenai tanah?





Sumber: *Jendela Iptek, Gaya dan Gerak, 1997*

5 B a b 5

Momentum dan Impuls

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis gejala alam dan keteraturannya dalam cakupan mekanika benda titik dengan cara menunjukkan hubungan antara konsep impuls dan momentum untuk menyelesaikan masalah tumbukan.

Pernahkah anda melihat seorang atlet golf yang memukul bola golf dengan menggunakan tongkat sehingga bola tersebut terpental jauh sampai beberapa ratus meter? Seperti yang terlihat pada gambar, bola golf yang mulanya diam, akan bergerak dengan kecepatan tertentu, bukan? Peristiwa apa yang dialami bola golf tersebut? Tahukah Anda prinsip dasar yang menjelaskan peristiwa ini?

Peristiwa saat Anda memukul dan menendang benda, atau peristiwa tabrakan antara dua benda dapat dijelaskan dengan konsep Fisika, yaitu momentum dan impuls. Bagaimanakah konsep Fisika yang bekerja pada sebuah tabrakan mobil? Dalam hal apa sajakah konsep momentum dan impuls ini diterapkan?

Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, dalam bab ini akan dibahas materi momentum dan impuls, Hukum Kekekalan Momentum, serta aplikasi keduanya dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari.

- A. Momentum dan Impuls**
- B. Hukum Kekekalan Momentum**
- C. Aplikasi Momentum dan Impuls dalam Kehidupan Sehari-hari**

Soal Pramateri

1. Menurut Anda, dapatkah suatu gaya yang bekerja pada benda menimbulkan kecepatan pada benda tersebut? Jelaskan jawaban Anda.
2. Jelaskanlah pengertian energi kinetik dengan bahasa dan pemahaman Anda sendiri.
3. Sebuah bola ditarik dengan gaya sebesar 10 N. Berapakah percepatan dan kecepatan bola tersebut jika massa bola sebesar 0,5 kg?

Gambar 5.1

Mobil bermassa m , bergerak dengan kecepatan v .
Momentumnya $p = m \cdot v$.

A Momentum dan Impuls

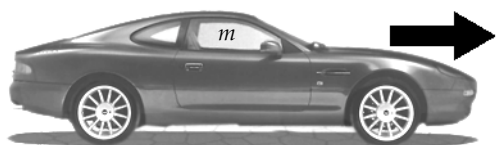
1. Momentum

Sebuah truk bermuatan penuh akan lebih sulit untuk berhenti daripada sebuah mobil kecil, walaupun kecepatan kedua kendaraan itu sama. Kenapa demikian? Dalam pengertian fisisnya dikatakan bahwa momentum truk lebih besar daripada mobil. Secara Fisika, pengertian momentum adalah hasil kali antara massa benda (m) dan kecepatannya (v), yang dituliskan sebagai berikut.

$$p = m \cdot v \quad (5-1)$$

dengan: m = massa benda (kg),
 v = kecepatan benda (m/s), dan
 p = momentum benda (kgm/s).

Dari **Persamaan (5-1)** tersebut, dapat dilihat bahwa momentum merupakan besaran vektor karena memiliki besar dan arah.



Contoh 5.1

Sebuah mobil bermassa 1.500 kg bergerak dengan kecepatan 36 km/jam. Berapakah momentum mobil tersebut?

Jawab

Diketahui: $m = 1.500$ kg dan $v = 36$ km/jam.

$$m = 1.500 \text{ kg}$$

$$v = 36 \text{ km/jam} = 10 \text{ m/s}$$

$$\text{Momentum mobil: } p = mv = (1.500 \text{ kg})(10 \text{ m/s}) = 15.000 \text{ kgm/s.}$$

Contoh 5.2

Perhatikan data berikut ini.

- a. Mobil bermassa 2.000 kg yang berisi seorang penumpang bergerak dengan kecepatan 72 km/jam.
- b. Seseorang mengendarai motor bermassa 100 kg dengan kecepatan 108 km/jam.
- c. Seseorang naik motor bermassa 100 kg dan membonceng seorang lainnya, bergerak dengan kecepatan 54 km/jam.

Jika massa orang 50 kg, data manakah yang memiliki momentum terbesar?

Jawab

Diketahui: $m_{\text{mobil}} = 2.000$ kg, $m_{\text{motor}} = 100$ kg, $v_{\text{motor ke-2}} = 54$ km/jam = 15 m/s,
 $v_{\text{motor ke-1}} = 108$ km/jam = 30 m/s, dan $v_{\text{mobil}} = 72$ km/jam = 20 m/s

- a. Momentum mobil dengan seorang penumpang:

$$\begin{aligned} p_{\text{mobil}} &= (m_{\text{orang}} + m_{\text{mobil}})(v_{\text{mobil}}) \\ &= (50 \text{ kg} + 2.000 \text{ kg})(20 \text{ m/s}) = 41.000 \text{ kgm/s} \end{aligned}$$

- b. Momentum motor dengan seorang pengendara:

$$\begin{aligned} p_{\text{motor}} &= (m_{\text{orang}} + m_{\text{motor}})(v_{\text{motor ke-1}}) \\ &= (50 \text{ kg} + 100 \text{ kg})(30 \text{ m/s}) = 4.500 \text{ kgm/s} \end{aligned}$$

c. Momentum motor dengan dua orang:

$$p_{\text{motor}} = (2 m_{\text{orang}} + m_{\text{motor}}) (v_{\text{motor ke-2}})$$

$$= (100 \text{ kg} + 100 \text{ kg})(15 \text{ m/s}) = 3.000 \text{ kgm/s}$$

Jadi, momentum yang terbesar adalah momentum yang dimiliki oleh motor dengan seorang pengendara, yaitu 4.500 kgm/s.

Contoh 5.3

Benda A dan benda B masing-masing bermassa 2 kg dan 3 kg, bergerak saling tegak lurus dengan kecepatan masing-masing sebesar 8 m/s dan 4 m/s. Berapakah momentum total kedua benda tersebut?

Jawab

Diketahui: $m_A = 2 \text{ kg}$, $m_B = 3 \text{ kg}$, $v_A = 8 \text{ m/s}$, dan $v_B = 4 \text{ m/s}$.

$$p_A = m_A v_A = (2 \text{ kg})(8 \text{ m/s}) = 16 \text{ kgm/s}$$

$$p_B = m_B v_B = (3 \text{ kg})(4 \text{ m/s}) = 12 \text{ kgm/s}$$

Momentum adalah besaran vektor sehingga untuk menghitung besar momentum total kedua benda, digunakan penjumlahan vektor:

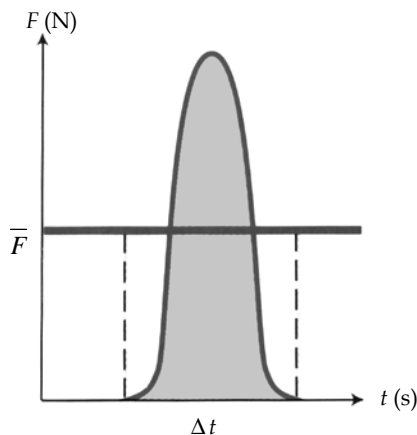
$$p_{\text{total}} = (p_A^2 + p_B^2)^{1/2} = [(16 \text{ kgm/s})^2 + (12 \text{ kgm/s})^2]^{1/2} = 20 \text{ kgm/s}.$$

2. Impuls

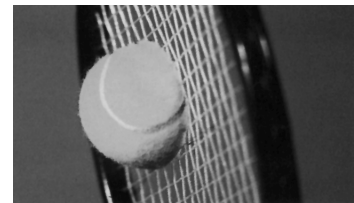
Cobalah Anda tendang sebuah bola yang sedang diam. Walaupun kontak antara kaki Anda dan bola hanya sesaat, namun bola dapat bergerak dengan kecepatan tertentu. Dalam pengertian momentum, dikatakan bahwa pada bola terjadi perubahan momentum akibat adanya gaya yang diberikan dalam selang waktu tertentu. Gaya seperti ini, yang hanya bekerja dalam selang waktu yang sangat singkat, disebut gaya impulsif. Oleh karena itu, perkalian antara gaya dan selang waktu gaya itu bekerja pada benda disebut impuls. Secara matematis, dituliskan sebagai

$$I = F \Delta t \quad (5-2)$$

Besarnya impuls dapat dihitung dengan menggunakan grafik hubungan gaya F terhadap waktu t (grafik $F - t$). Perhatikan **Gambar 5.3** berikut.



Gaya impulsif yang bekerja pada benda berada pada nilai nol saat t_1 . Kemudian, gaya tersebut bergerak ke nilai maksimum dan akhirnya turun kembali dengan cepat ke nilai nol pada saat t_2 . Oleh karena luas daerah di bawah kurva gaya impulsif sama dengan luas persegi panjang gaya rata-rata (\bar{F}) yang bekerja pada benda, grafik hubungan antara F dan t dapat digambarkan sebagai besar impuls yang terjadi pada benda.



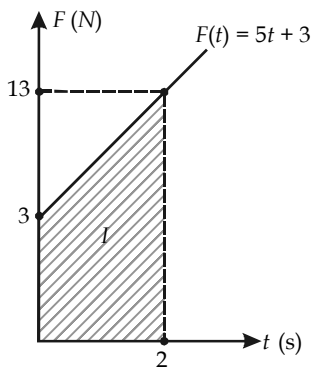
Sumber: *Fundamentals of Physics, 2001*

Gambar 5.2

Gaya yang diberikan pada bola tenis hanya bekerja dalam selang waktu singkat. Gaya ini menyebabkan bola tenis bergerak dengan kecepatan dan lintasan tertentu.

Gambar 5.3

Luas daerah di bawah grafik $F - t$ menunjukkan impuls yang dialami benda.



Gambar 5.4

Impuls = luas daerah yang diarsir.

Jelajah Fisika

Pesawat Luar Angkasa



Sumber: shuttle-shemesh.larc.nasa.gov

Pesawat luar angkasa yang akan bergerak menuju orbit harus mendapatkan momentum yang sangat besar agar kecepatannya bisa mengatasi percepatan gravitasi Bumi. Oleh karena itu, mesin pesawat harus mampu mengeluarkan gaya dorong yang sangat besar (sekitar 30×10^6 N).

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Kata Kunci

- Momentum
- Impuls

Jika gaya yang diberikan pada benda merupakan suatu fungsi linear, impuls yang dialami oleh benda sama dengan luas daerah di bawah kurva fungsi gaya terhadap waktu, seperti terlihat pada **Gambar 5.4**.

Dengan memerhatikan **Persamaan (5-2)**, Anda dapat menyimpulkan bahwa gaya dan selang waktu berbanding terbalik. Perhatikan **Tabel 5.1** berikut.

Tabel 5.1 Kombinasi antara Gaya dan Waktu yang Dibutuhkan untuk Menghasilkan Impuls Sebesar 100 Ns

Gaya (N)	Waktu (s)	Impuls (Ns)
100	1	100
50	2	100
25	4	100
10	10	100
4	25	100
2	50	100
1	100	100
0,1	1.000	100

Besarnya impuls yang dibentuk adalah sebesar 100 Ns, namun besar gaya dan selang waktu gaya tersebut bekerja pada benda bervariasi. dari **Tabel 5.1** tersebut, dapat dilihat bahwa jika waktu terjadinya tumbukan semakin besar (lama), gaya yang bekerja pada benda akan semakin kecil. oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa waktu kontak antara gaya dan benda sangat memengaruhi besar gaya yang bekerja pada benda saat terjadi tumbukan.

3. Hubungan antara Impuls dan Perubahan Momentum

Pada pelajaran sebelumnya, telah Anda ketahui bahwa jika pada sebuah benda bermassa m , bekerja sebuah gaya F yang besarnya tetap selama t sekon, pada benda itu berlaku persamaan

$$v_t = v_0 + a \Delta t$$

dengan $a = \frac{F}{m}$ (Hukum II Newton) sehingga $v_t = v_0 + \frac{F}{m} \Delta t$

$$v_t = v_0 + \frac{F}{m} \Delta t$$

Apabila ruas kiri dan ruas kanan persamaan dikalikan dengan m , didapatkan

$$mv_t = mv_0 + F \Delta t$$

sehingga

$$F \Delta t = m(v_t - v_0) \quad (5-3)$$

dengan: mv_0 = momentum awal, dan
 mv_t = momentum akhir.

Oleh karena $F \Delta t$ = impuls dari gaya F , **Persamaan (5-3)** dapat diartikan bahwa impuls suatu benda sama dengan perubahan momentum yang dialami benda tersebut. Secara matematis dituliskan sebagai

$$I = \Delta p \quad (5-4)$$

Contoh 5.4

Sebuah benda yang massanya 0,5 kg berada dalam keadaan diam. Kemudian, benda tersebut dipukul dengan gaya sebesar F sehingga benda bergerak dengan kecepatan 10 m/s. Jika pemukul menyentuh benda selama 0,01 sekon, tentukanlah:

- perubahan momentum benda, dan
- besarnya gaya F yang bekerja pada benda.

Jawab

Diketahui: $m = 0,5$ kg, $v = 10$ m/s, dan $\Delta t = 0,01$ s.

- Perubahan momentum (Δp):

$$\Delta p = mv - mv_0 = (0,5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}) - (0,5 \text{ kg})(0 \text{ m/s}) = 5 \text{ Ns}$$

- Besarnya gaya F :

$$F \Delta t = mv - mv_0$$

$$F(0,01 \text{ s}) = 5 \text{ Ns} \rightarrow F = \frac{5 \text{ Ns}}{0,01 \text{ s}} = 500 \text{ newton.}$$

Contoh 5.5

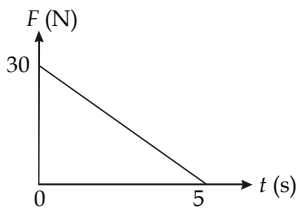
Sebuah benda bermassa 2 kg berada dalam keadaan diam di permukaan meja yang licin. Kemudian, benda itu digerakkan secara mendatar oleh sebuah gaya mendatar F . Gaya tersebut berubah terhadap waktu menurut $F = 30 - 6t$, dengan t dalam s dan F dalam N. Tentukanlah:

- grafik hubungan gaya (F) terhadap waktu (t),
- impuls yang bekerja pada benda tersebut, dan
- kecepatan benda setelah 5 sekon.

Jawab

Diketahui: $m = 2$ kg dan $F = 30 - 6t$.

- Grafik hubungan gaya (F) terhadap waktu (t) dari persamaan $F = 30 - 6t$ adalah sebagai berikut.



- Impuls = luas daerah di bawah kurva
= luas segitiga

$$= \frac{1}{2} (5 \text{ s})(30 \text{ N}) = 75 \text{ Ns}$$

- Kecepatan benda setelah 5 sekon ditentukan dengan persamaan berikut.

Impuls = perubahan momentum

$$F \Delta t = mv - mv_0$$

$$75 \text{ Ns} = (2 \text{ kg})(v) - (2 \text{ kg})(0 \text{ m/s})$$

$$v = 37,5 \text{ m/s}$$

Loncatan Kuantum

Ayunan balistik digunakan untuk mengukur kecepatan peluru dengan cara menembakkan peluru bermassa m ke balok kayu yang tergantung bebas bermassa M . Apabila simpangan ayunan diukur, akan didapatkan momentum tumbukan antara peluru dan balok kayu sehingga kecepatan peluru dapat diukur.

Quantum Leap

The ballistic balance is a simple device for measuring the velocity of a bullet. A bullet of known mass (m) is fired into a block of wood whose mass (M) is also known. By measuring the angular displacement (θ) of the block, it is possible to find the momentum, and therefore velocity, of the bullet.

Soal Penguasaan Materi 5.1

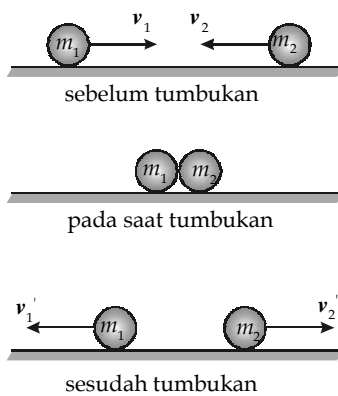
Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah sepeda motor bermassa 100 kg bergerak dengan kecepatan sebesar 90 km/jam. Jika massa pengendara motor 60 kg, berapakah momentum mobil tersebut?
- Mobil A dan mobil B masing-masing bermassa 2.000 kg dan 1.500 kg bergerak dengan kecepatan masing-masing 54 km/jam dan 72 km/jam. Tentukanlah momentum total kedua mobil tersebut, jika kedua mobil tersebut bergerak:
 - searah,
 - berlawanan arah,
 - saling tegak lurus, dan
 - membentuk sudut 120° .
- Sebuah mobil bermassa 1.000 kg melaju dengan kecepatan 108 km/jam. Mobil tersebut menabrak sebuah pohon dan berhenti dalam waktu 0,1 sekon. Berapakah gaya rata-rata mobil selama berlangsungnya tabrakan?
- Dua benda bermassa $m_1 = 1,5$ kg dan $m_2 = 2,5$ kg terletak berdekatan di sebuah bidang datar licin. Sistem ini mendapat impuls gaya sehingga kedua benda bergerak. Besar kelajuan masing-masing benda adalah $v_1 = 5$ m/s dan $v_2 = 4$ m/s, serta arahnya saling tegak lurus. Tentukanlah besarnya impuls gaya yang bekerja pada sistem.
- Sebuah benda bermassa 2,5 kg digerakkan mendatar di meja licin dari keadaan diam oleh sebuah gaya mendatar F yang besarnya berubah terhadap waktu. Persamaannya adalah $F = 20 - 5t$, dengan t dalam s dan F dalam N. Tentukan:
 - grafik hubungan gaya (F) terhadap waktu (t),
 - impuls yang bekerja pada benda tersebut, dan
 - kecepatan benda setelah 4 sekon.
- Suatu senapan mesin menembakkan peluru-peluru bermassa 50 g dengan kelajuan 1 km/s. Penembak memegang senapan itu dengan tangannya, dan ia hanya dapat memberikan gaya sebesar 180 N untuk menahan senapan. Tentukanlah jumlah maksimum peluru yang dapat ditembakkan setiap menit.

B Hukum Kekekalan Momentum

1. Hukum Kekekalan Momentum

Dua benda dapat saling bertumbukan, jika kedua benda bermassa m_1 dan m_2 tersebut bergerak berlawanan arah dengan kecepatan masing-masing v_1 dan v_2 . Apabila sistem yang mengalami tumbukan itu tidak mendapatkan gaya luar, menurut **Persamaan (5-4)** diketahui bahwa apabila $F = 0$ maka $\Delta p = 0$ atau $p = \text{konstan}$. Dengan demikian, didapatkan bahwa jumlah momentum benda sebelum tumbukan akan sama dengan jumlah momentum benda setelah tumbukan. Hal ini disebut sebagai Hukum Kekekalan Momentum. Perhatikanlah **Gambar 5.5**.



Gambar 5.5

Urutan gerak dua benda bermassa m_1 dan m_2 mulai dari sebelum tumbukan hingga sesudah tumbukan.

Sebelum tumbukan, kecepatan masing-masing adalah benda v_1 dan v_2 . Sesudah tumbukan, kecepatannya menjadi v_1' dan v_2' . Apabila F_{12} adalah gaya dari m_1 yang dipakai untuk menumbuk m_2 , dan F_{21} adalah gaya dari m_2 yang dipakai untuk menumbuk m_1 maka menurut Hukum III Newton diperoleh hubungan sebagai berikut:

$F_{(\text{aksi})} = -F_{(\text{reaksi})}$ atau $F_{12} = -F_{21}$. Jika kedua ruas persamaan dikalikan dengan selang waktu Δt maka selama tumbukan akan didapatkan:

$$F_{12} \Delta t = -F_{21} \Delta t$$

$$\text{Impuls ke-1} = -\text{Impuls ke-2}$$

$$(m_1 v_1 - m_1 v_1') = -(m_2 v_2 - m_2 v_2')$$

$$m_1 v_1 - m_1 v_1' = -m_2 v_2 + m_2 v_2' \dots \quad (\text{a})$$

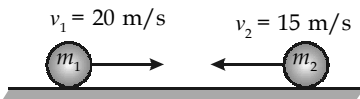
Apabila **Persamaan (a)** dikelompokkan berdasarkan kecepatannya, persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (5-5)$$

Contoh 5.6

Dua benda masing-masing bermassa m , bergerak berlawanan arah dengan kecepatan masing-masing 20 m/s dan 15 m/s. Setelah tumbukan, kedua benda tersebut bersatu. Tentukanlah kecepatan kedua benda dan arah gerakanya setelah tumbukan.

Jawab



Diketahui: $m_1 = m_2 = m$, $v_1 = 20$ m/s, dan $v_2 = 15$ m/s.

v_2 bertanda negatif karena gerakanya berlawanan arah dengan arah gerak benda pertama. Oleh karena setelah tumbukan kedua benda bersatu dan bergerak bersamaan maka kecepatan kedua benda setelah tumbukan adalah $v_1' = v_2' = v'$ sehingga $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$

$$m(20 \text{ m/s}) + m(-15 \text{ m/s}) = (m + m)v'$$

$$(5 \text{ m/s})m = 2mv' \rightarrow v' = \frac{(5 \text{ m/s})m}{2m} = 2,5 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan kedua benda 2,5 m/s, searah dengan arah gerak benda pertama (positif).

Contoh 5.7

Seorang penumpang naik perahu yang bergerak dengan kecepatan 4 m/s. Massa perahu dan orang itu masing-masing 200 kg dan 50 kg. Pada suatu saat, orang tersebut meloncat dari perahu dengan kecepatan 8 m/s searah gerak perahu. Tentukanlah kecepatan perahu sesaat setelah orang tersebut meloncat.

Jawab

Diketahui: $m_p = 200$ kg, $m_o = 50$ kg, dan $v_o = 8$ m/s.

$$(m_p + m_o)v = m_p v_p' + m_o v_o'$$

$$(200 \text{ kg} + 50 \text{ kg})(4 \text{ m/s}) = (200 \text{ kg})v_p' + (50 \text{ kg})(8 \text{ m/s})$$

$$1.000 \text{ kgm/s} = (200 \text{ kg})v_p' + 400 \text{ kgm/s}$$

$$600 \text{ kgm/s} = (200 \text{ kg})v_p'$$

$$v_p' = 3 \text{ m/s}$$

Contoh 5.8

Seseorang yang massanya 45 kg membawa senapan bermassa 5 kg. Dalam senapan tersebut, terdapat sebutir peluru seberat 0,05 kg. Diketahui orang tersebut berdiri pada lantai yang licin. Pada saat peluru ditembakkan dengan kecepatan 100 m/s, orang tersebut terdorong ke belakang. Tentukanlah kecepatan orang tersebut pada saat peluru dilepaskan.

Jawab

Diketahui bahwa Hukum Kekekalan Momentum menyatakan energi mekanik sebelum dan setelah tumbukan adalah sama, dengan $m_o =$ massa orang = 45 kg, $m_s =$ massa senapan = 5 kg, dan $m_p =$ massa peluru = 0,05 kg, dan $v_p = 100$ m/s.

$$(m_o + m_s + m_p)v = (m_o + m_s)v_o + m_p v_p$$
$$0 = (45 \text{ kg} + 5 \text{ kg})v_o + (0,05 \text{ kg})(100 \text{ m/s})$$

$$(-50 \text{ kg})v_o = 5 \text{ kgm/s}$$

$$v_o = \frac{5 \text{ kgm/s}}{-50 \text{ m/s}} = -0,1 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan orang tersebut pada saat peluru dilepaskan adalah 0,1 m/s.

Jelajah Fisika

Abdus Salam



Abdus Salam adalah seorang ilmuwan fisika yang berasal dari Pakistan. Ia dilahirkan di Jhang, Pakistan. Pada tahun 1979, ia menerima penghargaan Nobel atas penelitiannya yang membuktikan bahwa gaya elektromagnetik dan gaya nuklir lemah adalah variasi dari satu "supergaya" yang mendasari keduanya. Gaya ini disebut gaya elektrolemah. Ia meninggal pada tahun 1996.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997



Sumber: *Physics Today*, 1995

Gambar 5.6

Sebuah bola mengalami tumbukan lenting sebagian sehingga tinggi bola semakin berkurang.

Jelajah Fisika

Pandai Besi



Prinsip momentum telah digunakan sejak jaman dulu oleh para pandai besi. Landasan tempa yang digunakan oleh pandai besi bersifat sangat masif sehingga hampir tidak bergerak oleh hantaman palu. Momentum palu akan diserap oleh logam panas sehingga logam dapat ditempa menjadi bentuk yang diinginkan.

Sumber: www.wilbrahamlibrary.org

2. Hukum Kekekalan Energi pada Tumbukan

Tumbukan antara dua benda dikatakan lenting (elastis) sempurna apabila jumlah energi mekanik benda sebelum dan sesudah tumbukan tetap. Anda telah mengetahui dan mempelajari bahwa energi mekanik adalah energi potensial ditambah energi kinetik. Untuk benda yang bertumbukan pada bidang datar, energi potensial benda tidak berubah sehingga yang ditinjau hanya energi kinetiknya saja. Jadi, akan berlaku pernyataan bahwa jumlah energi kinetik benda sebelum dan sesudah bertumbukan adalah tetap.

Hukum Kekekalan Energi untuk tumbukan lenting sempurna dapat dituliskan sebagai berikut.

$$EK_1 + EK_2 = EK'_1 + EK'_2$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2$$

Hukum Kekekalan Momentumnya dapat dituliskan menjadi

$$-\frac{(v_1' - v_2')}{(v_1 - v_2)} = 1$$

Secara umum, dapat dituliskan menjadi

$$-\frac{(v_1' - v_2')}{(v_1 - v_2)} = e$$

dengan e adalah koefisien restitusi. Harga dari e adalah $1 > e > 0$.

Apabila $e = 1$, tumbukan lenting sempurna;

$e = 0$, tumbukan tidak lenting sama sekali;

$e = 0,1; 0,2; 0,5$; dan sebagainya maka disebut tumbukan lenting sebagian.

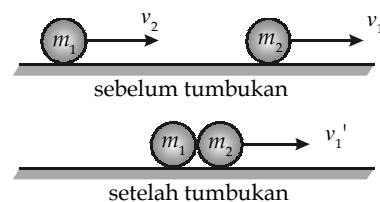
Dengan demikian, Anda dapat memberikan definisi untuk koefisien restitusi sebagai nilai negatif dari perbandingan beda kecepatan kedua benda sebelum dan sesudah tumbukan. Walaupun pada tumbukan tidak lenting sama sekali dan tumbukan lenting sebagian tidak berlaku Hukum Kekekalan Energi Kinetik, namun pada tumbukan ini Hukum Kekekalan Momentum, yaitu $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ tetap berlaku.

Contoh 5.9

Dua benda dengan kecepatan 2 m/s dan 4 m/s bergerak searah. Massa benda masing-masing sebesar 2 kg dan 3 kg. Apabila terjadi tumbukan tidak lenting sama sekali, tentukanlah kecepatan kedua benda tersebut setelah bertumbukan.

Jawab

Diketahui: $v_1 = 2$ m/s, $v_2 = 4$ m/s, $m_1 = 2$ kg, dan $m_2 = 3$ kg.



$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= (m_1 + m_2) v' \\ (2 \text{ kg})(2 \text{ m/s}) + (3 \text{ kg})(4 \text{ m/s}) &= (2 \text{ kg} + 3 \text{ kg}) v' \\ 16 \text{ kgm/s} &= (5 \text{ kg}) v' \\ v' &= 3,2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi kecepatan kedua benda setelah tumbukan adalah 3,2 m/s.

Contoh 5.10

Sebuah bola dijatuhkan dari ketinggian 1,8 m. Kemudian, terpental hingga mencapai ketinggian 45 cm. Berapakah koefisien restitusi antara lantai dan bola itu?

Jawab

Diketahui: $h = 1,8$ m, dan $h' = 45$ cm.

$$e = \frac{(v'_1 - v'_2)}{(v_1 - v_2)} = -\frac{(0 - \sqrt{2gh'})}{(0 - (-\sqrt{2gh}))} = \frac{\sqrt{h'}}{\sqrt{h}} = \sqrt{\frac{h'}{h}} = \sqrt{\frac{0,45\text{ m}}{1,8\text{ m}}} = 0,5$$

Soal Penguasaan Materi 5.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Benda yang bermassa m menumbuk dinding dengan kecepatan v . Kemudian, benda tersebut dipantulkan dengan kecepatan $0,75v$ dalam arah berlawanan. Tentukanlah:
 - koefisien restitusi, dan
 - perubahan momentum benda.
- Sebuah balok ditempatkan pada bidang datar yang licin. Massa balok sebesar 0,98 kg dan dijadikan sasaran tembakan. Sebuah peluru ditembakkan ke arah balok sehingga peluru tersebut bersarang di dalam balok. Diketahui massa peluru 20 g. Energi kinetik balok dan peluru saat peluru mengenai balok adalah 8 J, tentukanlah:
 - kecepatan balok saat kena peluru, dan
 - kecepatan peluru saat mengenai balok.
- Sebuah bola bermassa 1 kg dan bergerak dengan kecepatan 12 m/s, bertumbukan dengan bola lain yang bermassa 2 kg dan bergerak dalam arah yang berlawanan dengan kecepatan 24 m/s. Tentukanlah kecepatan kedua bola setelah tumbukan, jika :
 - tumbukannya tidak lenting sama sekali,
 - tumbukannya lenting sempurna, dan
 - tumbukannya lenting sebagian ($e = \frac{2}{3}$).

C Aplikasi Momentum dan Impuls dalam Kehidupan Sehari-hari

1. Peluncuran Roket

Sebuah roket diluncurkan vertikal ke atas menuju atmosfer Bumi. Hal ini dapat dilakukan karena adanya gaya dorong dari mesin roket yang bekerja berdasarkan impuls yang diberikan oleh roket. Pada saat roket sedang bergerak, akan berlaku hukum kekekalan momentum. Pada saat roket belum dinyalakan, momentum roket adalah nol. Apabila bahan bakar di dalamnya telah dinyalakan, pancaran gas mendapatkan momentum yang arahnya ke bawah. Oleh karena momentum bersifat kekal, roket pun akan mendapatkan momentum yang arahnya berlawanan dengan arah buang bersifat gas roket tersebut dan besarnya sama.

Secara matematis gaya dorong pada roket dinyatakan dalam hubungan berikut.

Impuls = perubahan momentum

$$F \Delta t = \Delta(mv)$$

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} v$$

dengan: F = gaya dorong roket (N),

$\frac{\Delta m}{\Delta t}$ = perubahan massa roket terhadap waktu (kg/s), dan

v = kecepatan roket (m/s).

Solusi Cerdas

Bola tanah liat yang bermassa 0,1 kg menumbuk kereta mainan yang massanya 0,9 kg yang berada dalam keadaan diam. Pada saat menumbuk, bola memiliki kecepatan 18 m/s dalam arah horizontal. Kecepatan kereta mainan setelah tumbukan adalah

- 2 m/s
- 16,2 m/s
- 180 m/s
- 18 m/s
- 1,8 m/s

Jawab:

Pada kasus ini, setelah tumbukan, bola tanah liat akan menempel pada kereta mainan sehingga

$$m_b v_b + m_k v_k = (m_b + m_k) v_k'$$
$$(0,1 \text{ kg})(18 \text{ m/s}) + (0,9 \text{ kg})(0)$$
$$= (0,1 \text{ kg} + 0,9 \text{ kg}) v_k'$$
$$v_k' = 1,8 \text{ m/s}$$

Jawab: e

Soal UNAS Fisika SMA 2003/2004

Contoh 5.11

Sebuah roket menyemburkan gas dengan kelajuan 200 kg per sekon. Jika kecepatan molekul-molekul gas mencapai 300 m/s, berapakah gaya dorong pada roket tersebut?

Jawab

Diketahui: $v = 300 \text{ m/s}$ dan $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 200 \text{ kg/s}$.

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} v = (200 \text{ kg/s})(300 \text{ m/s}) = 60.000 \text{ N}.$$

2. Air Safety Bag

Air Safety Bag (kantong udara) digunakan untuk memperkecil gaya akibat tumbukan yang terjadi pada saat tabrakan. Kantong udara tersebut dipasang pada mobil serta dirancang untuk keluar dan mengembang secara otomatis saat tabrakan terjadi. Kantong udara ini mampu meminimalkan efek gaya terhadap benda yang bertumbukan. Prinsip kerjanya adalah memperpanjang waktu yang dibutuhkan untuk menghentikan momentum pengemudi. Saat tabrakan terjadi, pengemudi cenderung untuk tetap bergerak sesuai dengan kecepatan gerak mobil (Hukum Pertama Newton). Gerakan ini akan membuatnya menabrak kaca depan mobil yang mengeluarkan gaya sangat besar untuk menghentikan momentum pengemudi dalam waktu sangat singkat. Apabila pengemudi menumbuk kantong udara, waktu yang digunakan untuk menghentikan momentum pengemudi akan lebih lama sehingga gaya yang ditimbulkan pada pengemudi akan mengecil. Dengan demikian, keselamatan si pengemudi akan lebih terjamin.



Sumber: www.collisionsafety.net

Gambar 5.7

Air Safety Bag digunakan untuk memperkecil gaya akibat tumbukan pada saat tabrakan.

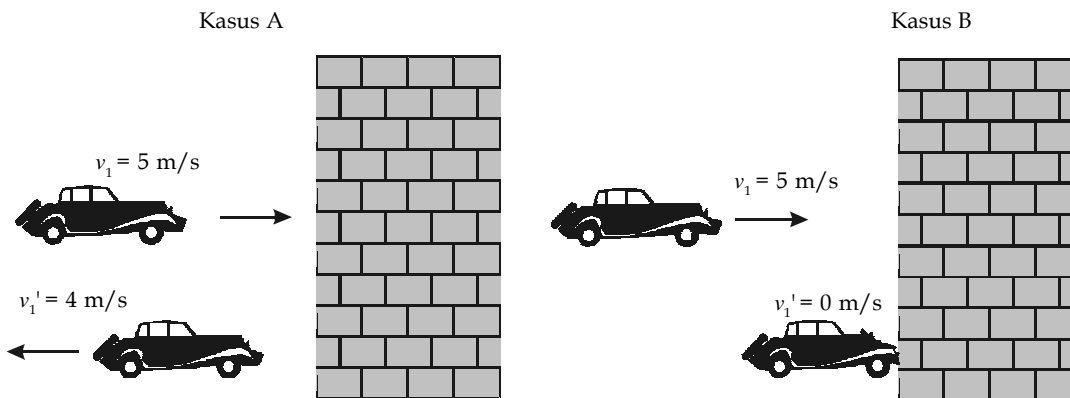
Kata Kunci

- Hukum Kekekalan Momentum
- Koefisien restitusi
- Tumbukan

3. Desain Mobil

Desain mobil dirancang untuk mengurangi besarnya gaya yang timbul akibat tabrakan. Caranya dengan membuat bagian-bagian pada badan mobil agar dapat menggumpal sehingga mobil yang bertabrakan tidak saling terpental satu dengan lainnya. Mengapa demikian? Apabila mobil yang bertabrakan saling terpental, pada mobil tersebut terjadi perubahan momentum dan impuls yang sangat besar sehingga membahayakan keselamatan jiwa penumpangnya.

Perhatikanlah contoh berikut.



Pada kasus A, mobil yang menabrak tembok dan terpental kembali, akan mengalami perubahan kecepatan sebesar 9 m/s. Dalam kasus B, mobil tidak terpental kembali sehingga mobil tersebut hanya mengalami perubahan kecepatan sebesar 5 m/s. Berarti, perubahan momentum yang dialami mobil pada kasus A jauh lebih besar daripada kasus B.

Daerah penggumpalan pada badan mobil atau bagian badan mobil yang dapat penyok akan memperkecil pengaruh gaya akibat tumbukan yang dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu memperpanjang waktu yang dibutuhkan untuk menghentikan momentum mobil dan menjaga agar mobil tidak saling terpental. Rancangan badan mobil yang memiliki daerah penggumpalan atau penyok tersebut akan mengurangi bahaya akibat tabrakan pada penumpang mobil.



Sumber: www.picture-newsletter.com

Gambar 5.8

Perubahan momentum pada mobil yang menabrak tembok.

Gambar 5.9

Badan mobil dirancang untuk mengurangi besarnya gaya akibat tabrakan.

Soal Penguasaan Materi 5.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Sebuah roket berdiri di atas pelataran landasannya. Setelah mesinnya dinyalakan, gas yang disemburkan roket sebanyak 1.200 kg/s. Kecepatan molekul gas diketahui 40 km/s. Berapakah gaya dorong yang ditimbulkan oleh pancaran gas pada roket tersebut?
2. Sebuah roket bermassa 100 ton diarahkan tegak lurus ke atas. Jika kecepatan molekul gas yang terbakar pada mesin roket itu 50 km/s, tentukanlah kelajuan bahan bakar yang dikeluarkan (dinyatakan dalam kg/s).



Kerjakanlah

Menguji Efek Gaya pada Tumbukan

Percobaan ini akan memperjelas akibat yang ditimbulkan apabila waktu tumbukan diperpanjang atau diperpendek.

Rentangkanlah sehelai taplak meja (dipegang oleh dua orang teman Anda). Kemudian, lemparkanlah sebuah telur ke atas taplak meja tersebut. Apa yang akan terjadi? Bandingkanlah hasil yang Anda dapatkan apabila telur dilemparkan ke papan tulis. Apakah kesimpulan Anda?

Pembahasan Soal SPMB

Sebuah granat yang diam tiba-tiba meledak dan pecah menjadi 2 bagian yang bergerak dalam arah berlawanan. Perbandingan massa kedua bagian itu adalah $m_1 : m_2$. Apabila energi yang dibebaskan adalah 3×10^5 joule, perbandingan energi kinetik pecahan granat pertama dan kedua adalah

- a. 1 : 1
- b. 2 : 1
- c. 1 : 3
- d. 5 : 1
- e. 7 : 5

Penyelesaian

Hukum Kekekalan Momentum:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (m_1 : m_2 = 1 : 2)$$

$$0 = m_1 v_1' + 2 m_2 v_2'$$

$$v_1' = -2 v_2' \quad (v_1' \text{ dan } v_2' \text{ berlawanan arah})$$

$$\frac{EK_1}{EK_2} = \frac{\frac{1}{2} m_1 (v_1')^2}{\frac{1}{2} m_2 (v_2')^2} = \frac{1 (-2v_2')^2}{2 (v_2')^2} = \frac{4}{2}$$

$$EK_1 : EK_2 = 2 : 1$$

Jawab: b

Soal Fisika UMPTN'91 Rayon A

Rangkuman

- Setiap benda bergerak memiliki momentum (p). **Momentum** dinyatakan sebagai perkalian antara massa dan kecepatan benda.

$$p = m \cdot v$$

- Impuls** (I) adalah perkalian antara gaya dengan selang waktu bekerjanya gaya tersebut pada benda, atau sama dengan perubahan momentum yang dialami benda.

$$I = F \Delta t = \Delta p$$

- Hukum Kekekalan Momentum** berlaku apabila tidak ada gaya dari luar, yaitu jumlah momentum benda sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

- Jenis-jenis tumbukan, yaitu sebagai berikut.

- Tumbukan lenting sempurna.**

$$e = \frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} = 1$$

- Tumbukan lenting sebagian.**

$$e = \frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} \text{ dengan } 0 < e < 1$$

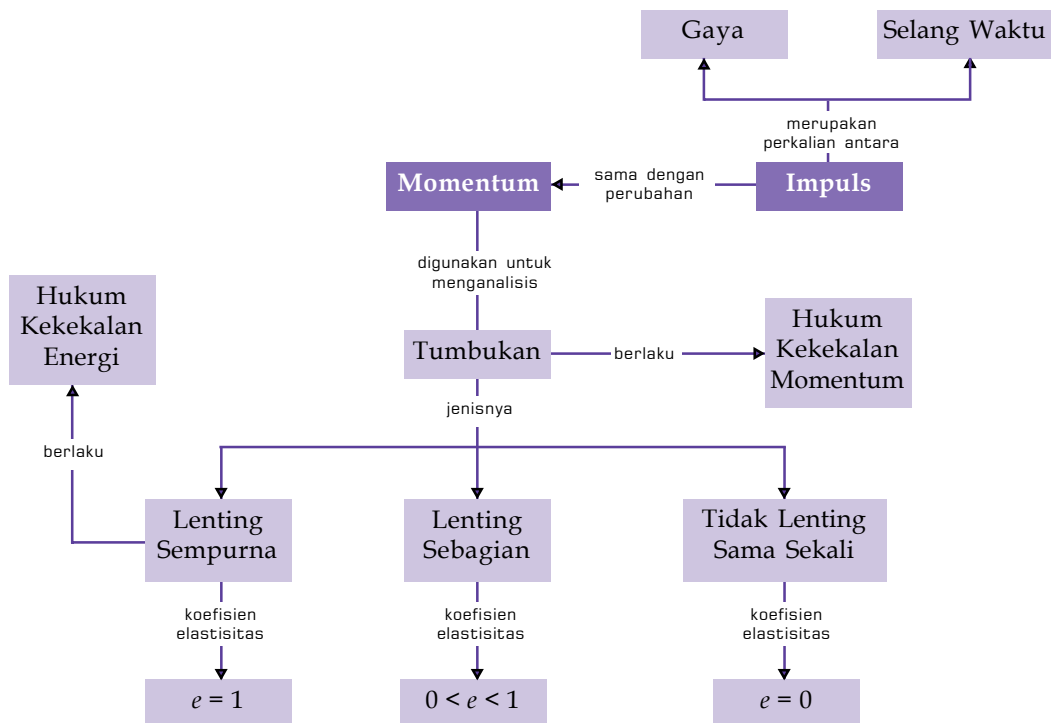
- Tumbukan tidak lenting sama sekali.**

$$e = \frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} = 0$$

- Gaya dorong** yang dihasilkan dalam aplikasi momentum dan impuls dapat ditentukan dari penjabaran bahwa impuls adalah perubahan momentum

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$$

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Momentum dan Impuls, Anda dapat menunjukkan hubungan antara konsep impuls dan momentum untuk menyelesaikan masalah tumbukan. Jika Anda belum mampu menunjukkan hubungan antara konsep impuls dan momentum untuk menyelesaikan masalah tumbukan, Anda belum menguasai materi bab Momentum dan Impuls dengan

baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 5

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

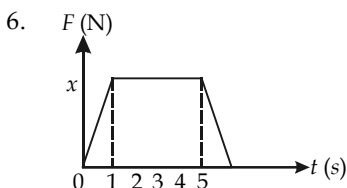
- Sebuah mobil bermassa 2.000 kg sedang bergerak dengan kecepatan 72 km/jam. Momentum mobil tersebut adalah
 - 20.000 kgm/s
 - 35.000 kgm/s
 - 40.000 kgm/s
 - 92.000 kgm/s
 - 144.000 kgm/s

- Sebuah benda bergerak dengan momentum sebesar p . Tiba-tiba, benda itu pecah menjadi dua bagian yang besar momentumnya masing-masing p_1 dan p_2 dalam arah yang saling tegak lurus. Momentum benda tersebut dapat dinyatakan sebagai
 - $p = p_1 + p_2$
 - $p = p_1 - p_2$
 - $p = p_2 - p_1$
 - $p = (p_1^2 + p_2^2)^{1/2}$
 - $p = (p_1^2 + p_2^2)$

- Sebuah benda bermassa 2,5 kg digerakkan mendatar di atas sebuah meja licin dari keadaan diam oleh sebuah gaya mendatar F . Gaya F tersebut berubah terhadap waktu menurut $F = 80 + 5t$, dengan t dalam s dan F dalam N. Pada saat $t = 2$ s, momentum benda tersebut adalah
 - 85 kgm/s
 - 125 m/s
 - 150 m/s
 - 170 kgm/s
 - 340 m/s

- Sebuah truk bermassa 2.000 kg melaju dengan kecepatan 36 km/jam, kemudian menabrak sebuah pohon dan berhenti dalam waktu 0,1 sekon. Gaya rata-rata pada truk tersebut selama berlangsungnya tabrakan adalah
 - 200 N
 - 2.000 N
 - 20.000 N
 - 200.000 N
 - 2.000.000 N

- Sebuah benda bergerak lurus di bawah pengaruh resultan gaya tetap. Selama 4 s, momentum linear benda berubah dari 4 kgm/s menjadi 12 kgm/s dengan arah gerak akhir berlawanan dengan arah gerak mula-mula. Resultan gaya pada benda itu besarnya
 - 2 N
 - 4 N
 - 8 N
 - 10 N
 - 12 N



Sebuah gaya F yang bervariasi terhadap waktu, bekerja pada sebuah benda bermassa 5 kg hingga menghasilkan momentum sebesar 80 kg m/s dalam waktu 5 sekon. Nilai x adalah

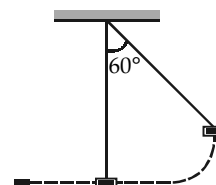
- 10 N
- 20 N
- 30 N
- 40 N
- 50 N

- Peluru dengan massa 10 g dan kecepatan 1.000 m/s menumbuk dan menembus balok bermassa 100 kg yang diam di atas suatu bidang datar tanpa gesekan. Apabila kecepatan peluru setelah menembus balok adalah 100 m/s, kecepatan balok karena tertembus peluru adalah
 - 900 m/s
 - 90 m/s
 - 9 m/s
 - 0,9 m/s
 - 0,09 m/s

- Dua balok bermassa $m_1 = 2$ kg dan $m_2 = 4$ kg bergerak saling mendekati di atas bidang horizontal yang licin. Laju awal masing-masing balok tersebut adalah $v_1 = 5$ m/s dan $v_2 = 10$ m/s. Jika kedua balok saling bertumbukan, momentum linear
 - sistem adalah 30 kgm/s
 - balok kedua 30 kgm/s jika laju balok pertama menjadi nol
 - balok kedua 20 kgm/s jika kecepatan balok pertama 5 m/s ke kiri
 - balok pertama 30 kgm/s ketika laju balok kedua nol

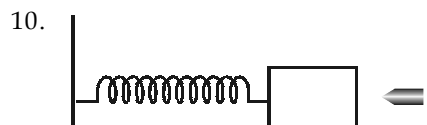
- Pernyataan yang benar adalah
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4

- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4



Sebutir peluru bermassa 10 g ditembakkan ke suatu ayunan balistik bermassa 1,49 kg. Pada saat ayunan mencapai tinggi maksimum, kawat membentuk sudut 60° dengan sumbu vertikal (lihat gambar). Panjang kawat ayunan adalah 0,2 m. Jika percepatan gravitasi $g = 9,8$ m/s², kecepatan peluru yang ditembakkan adalah

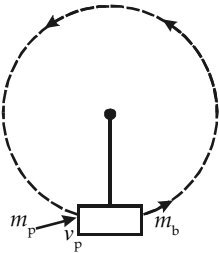
- 88 m/s
- 162 m/s
- 210 m/s
- 344 m/s
- 426 m/s



Sebuah balok yang massanya 990 gram terikat pada pegas, seperti terlihat pada gambar. Peluru yang massanya 10 gram mengenai balok tersebut dengan kecepatan 150 m/s sehingga peluru ada di dalam balok, dan pegas tertekan sampai 10 cm. Nilai konstanta pegas k jika lantai licin adalah

- a. 2,25 N/m d. 0,15 N/m
 b. 225 N/m e. 15 N/m
 c. 22,5 N/m

11.



Balok bermassa 1 kg yang digantung pada seutas tali sepanjang 50 m, ditembak oleh peluru bermassa 10 g. Ternyata, peluru bersarang di dalam balok dan terjadi putaran satu kali lingkaran penuh. Kecepatan minimal peluru adalah

- a. 305 m/s d. 455 m/s
 b. 355 m/s e. 505 m/s
 c. 405 m/s

12. Benda A bermassa m_A dan benda B bermassa $m_B = k m_A$ dengan $k =$ tetapan positif. Selanjutnya, A dan B berbenturan pada arah yang berlawanan. Sebelum benturan, kecepatan B adalah v_B dan kecepatan A adalah $v_A = -k v_B$. Apabila benturan bersifat lenting sempurna, sesaat setelah benturan kelajuan A dan B berturut-turut besarnya adalah

- a. v, k d. v_A, v_B
 b. v_B, v_A e. v_B, v_B
 c. v_B, v_A

13. Sebuah roket berdiri di atas pelataran. Setelah mesinnya dihidupkan, gas yang disemburkan oleh roket sebanyak 1.500 kg/s. Kecepatan molekul gas diketahui 50 km/s. Jika semburan gas itu ternyata cukup untuk mengangkatnya perlahan-lahan meninggalkan landasannya, massa roket mula-mula adalah

($g = 10 \text{ m/s}^2$)

- a. $7,5 \times 10^6 \text{ kg}$ d. $6,0 \times 10^6 \text{ kg}$
 b. $7,0 \times 10^6 \text{ kg}$ e. $5,5 \times 10^6 \text{ kg}$
 c. $6,5 \times 10^6 \text{ kg}$

14. Sebuah roket bermassa 200 ton diarahkan tegak lurus ke atas. Jika mesin roket mengeluarkan/membakar bahan bakar sebanyak 20 kg setiap sekon, berapakah kecepatan molekul gas yang terbakar itu adalah (pengurangan massa roket karena pembakaran bahan bakar sedikit sehingga boleh diabaikan)

- a. 60 km/s d. 90 km/s
 b. 70 km/s e. 100 km/s
 c. 80 km/s

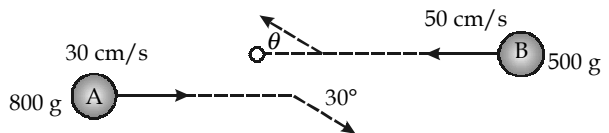
15. Pasir dijatuhkan sebanyak 2.000 kg/menit pada ban yang berjalan datar dengan kecepatan 250 m/menit. Gaya yang diperlukan untuk menggerakkan ban berjalan itu adalah (pengaruh gesekan diabaikan)

- a. 125 N d. 154
 b. 139 N e. 166 N
 c. 148 N

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

- Dua benda titik masing-masing bermassa $m_1 = 3 \text{ kg}$ dan $m_2 = 2 \text{ kg}$ terletak berdekatan di bidang datar licin. Sistem ini mendapatkan gaya impuls sehingga kedua benda bergerak dengan kelajuan masing-masing $v_1 = 2 \text{ m/s}$ dan $v_2 = 4 \text{ m/s}$ dan memiliki arah yang saling tegak lurus. Berapakah besarnya impuls gaya yang bekerja pada sistem tersebut?
- Sebuah bola dijatuhkan dari atas lantai. Setelah tumbukan pertama, bola terpental setinggi 144 cm. Setelah tumbukan kedua, bola itu terpental setinggi 81 cm. Tentukanlah:
 - koefisien restitusi antara bola dan lantai,
 - tinggi bola mula-mula, dan
 - ketinggian maksimum bola setelah pantulan ketiga.

3. Dua buah bola bertumbukan seperti gambar berikut.



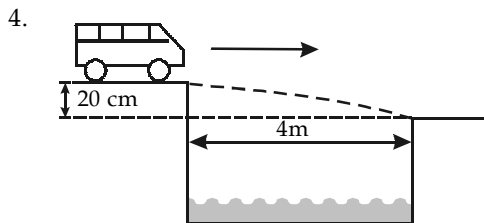
Tentukan:

- kecepatan bola B jika sesudah tumbukan, kecepatan bola A menjadi 15 cm/s,
- besarnya sudut, dan
- perubahan energi kinetik totalnya.

Evaluasi Materi Semester 1

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Vektor posisi sebuah partikel dinyatakan dengan persamaan $r = (4t + 2)\mathbf{i} + (2t^2 - 5t)\mathbf{j}$, t dalam sekon dan r dalam meter. Kecepatan partikel saat $t = 2$ sekon adalah
 - 2 m/s
 - 4 m/s
 - 5 m/s
 - 6 m/s
 - 8 m/s
- Sebuah benda dilemparkan vertikal ke atas dengan persamaan lintasan $y = (at - 5t^2)$ m. Jika t dalam sekon dan ketinggian maksimum yang dapat dicapai benda 20 m. Nilai a adalah
 - 10
 - 15
 - 20
 - 25
 - 30
- Nappitupulu menembakkan sebutir peluru ke atas dengan kecepatan awal 100 m/s dan sudut elevasi 60° . Kecepatan peluru tersebut saat berada di titik tertinggi adalah sebesar
 - nol
 - 50 m/s
 - 65 m/s
 - 80 m/s
 - $50\sqrt{3}$ m/s



Sebuah mobil hendak menyeberangi parit yang lebarnya 4 meter. Perbedaan tinggi antara kedua sisi parit itu adalah 20 cm, seperti ditunjukkan pada gambar. Jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 , kelajuan v minimum agar penyeberangan mobil dapat tepat berlangsung adalah

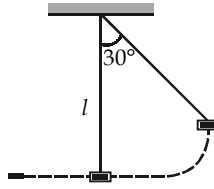
- 15 m/s
 - 20 m/s
 - 25 m/s
 - 30 m/s
 - 35 m/s
- Titik P berada di tepi sebuah piringan VCD. Kecepatan sudut putaran piringan VCD memenuhi persamaan $\omega = (4t - 2)$ rad/s. Besarnya sudut yang telah ditempuh oleh piringan VCD tersebut dalam waktu 5 sekon adalah
 - 10 rad
 - 20 rad
 - 30 rad
 - 40 rad
 - 50 rad
 - Perbandingan jari-jari Bumi di khatulistiwa dan di kutub adalah 9 : 8. Perbandingan percepatan gravitasi Bumi di kutub terhadap percepatan gravitasi Bumi di khatulistiwa adalah

- 8 : 9
 - 9 : 8
 - $2\sqrt{2} : 3$
 - $3 : 2\sqrt{2}$
 - 64 : 81
- Suatu satelit mengorbit Bumi sehingga 3600 km di atas permukaan Bumi. Jika jari-jari Bumi 6400 km, percepatan gravitasi Bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan gerak satelit dianggap melingkar beraturan, kelajuannya dalam km/s adalah
 - 6,4
 - 64
 - 640
 - 6.400
 - 64.000
 - Seseorang yang bermassa m berada di permukaan Bumi dengan jari-jari Bumi R dan massa Bumi M . Perbandingan gaya gravitasi yang dialami orang ketika berada di permukaan Bumi dan ketika berada pada jarak R di atas permukaan Bumi adalah
 - 1 : 1
 - 1 : 2
 - 2 : 1
 - 1 : 4
 - 4 : 1
 - Seorang pelajar bermassa 40 kg menggantung pada sebuah pegas yang panjangnya 40 cm sehingga panjang pegas menjadi 50 cm. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, konstanta pegas tersebut adalah
 - 400 N/m
 - 500 N/m
 - 800 N/m
 - 2.000 N/m
 - 4.000 N/m
 - Dua pegas identik disusun secara seri, kemudian keduanya disusun secara paralel. Jika kedua susunan pegas itu digantungi beban yang sama, perbandingan pertambahan panjang sistem pegas seri terhadap sistem pegas paralel adalah
 - 1 : 2
 - 2 : 1
 - 1 : 4
 - 4 : 1
 - 1 : 8
 - Sebuah pegas digantungkan pada sebuah lift. Pada ujung bebasnya digantungkan beban 40 gram. Pada saat lift diam, pegas bertambah panjang 5 cm. Diketahui $g = 10 \text{ m/s}^2$. Pertambahan panjang pegas apabila lift bergerak ke bawah dengan percepatan sebesar 2 m/s^2 adalah
 - 2 cm
 - 4 cm
 - 5 cm
 - 6 cm
 - 8 cm
 - Sebuah batang mula-mula panjangnya L , kemudian ditarik dengan gaya F . Jika luas penampang batang A dan modulus elastisitasnya E , rumus pertambahan panjang batang (ΔL) adalah

- a. $\Delta L = \frac{EL}{FA}$ d. $\Delta L = \frac{EAL}{F}$
- b. $\Delta L = \frac{FL}{EA}$ e. $\Delta L = \frac{FA}{EL}$
- c. $\Delta L = \frac{FLA}{E}$
13. Sebuah titik materi melakukan getaran harmonis sederhana dengan amplitudo A. Pada saat simpangannya $\frac{1}{2}A\sqrt{3}$, fase getarannya terhadap titik setimbang adalah
- a. $\frac{1}{12}$ d. $\frac{1}{4}$
- b. $\frac{1}{8}$ e. $\frac{1}{2}$
- c. $\frac{1}{6}$
14. Sebuah partikel bergetar harmonis dengan frekuensi 5 Hz dan amplitudo 15 cm. Kelajuan partikel pada saat berada 12 cm dari titik setimbangnya adalah
- a. 1,74 m/s d. 2,83 m/s
- b. 2,22 m/s e. 3,25 m/s
- c. 2,46 m/s
15. Suatu benda bermassa 100 gram bergerak harmonis sederhana dengan amplitudo 8 cm dan periode 0,25 s. Besar gaya yang bekerja pada sistem saat simpangannya seperempat amplitudo adalah sekitar
- a. 1,28 N d. 5,04 N
- b. 2,52 N e. 6,32 N
- c. 3,80 N
16. Sebuah benda yang massanya 200 gram bergetar harmonis dengan periode 0,2 sekon dan amplitudo sebesar 5 cm. Besar energi kinetik pada saat simpangannya 3 cm adalah (dalam joule)
- a. 2 d. 5
- b. 3 e. 6
- c. 4
17. Sebuah balok kayu bermassa 2 kg terletak pada bidang datar. Jika pada balok bekerja sebuah gaya mendatar sebesar 25 N sehingga balok berpindah sejauh 4 m, besar usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut adalah
- a. 50 joule d. 200 joule
- b. 100 joule e. 400 joule
- c. 150 joule
18. Sebuah tongkat yang panjangnya 32 cm dan tegak di atas permukaan tanah dijatuhkan martil 8 kg dari ketinggian 50 cm di atas ujungnya. Jika gaya tahan rata-rata tanah 1500 N, banyaknya tumbukan martil yang perlu dilakukan terhadap tongkat agar menjadi rata dengan permukaan tanah adalah
- a. 6 kali d. 12 kali
- b. 8 kali e. 15 kali
- c. 10 kali
19. Benda bermassa 10 kg yang mula-mula diam dipercepat oleh suatu gaya tetap 15 N. Setelah menempuh jarak 12 m, kelajuan benda tersebut menjadi
- a. 118 m/s d. 4,5 m/s
- b. 36 m/s e. 3,6 m/s
- c. 6 m/s
20. Dua buah benda angkasa yang bermassa masing-masing m_1 dan m_2 berjarak r sehingga terjadi gaya tarik menarik sebesar F. Ketika kedua benda tersebut bergerak saling mendekati dan jaraknya berkurang 25%, gaya tarik menarik antara kedua benda tersebut menjadi
- a. 16 F d. $\frac{3}{4} F$
- b. $\frac{16}{9} F$ e. $\frac{1}{4} F$
- c. $\frac{4}{3} F$
21. Sebuah pembangkit listrik tenaga air menggunakan air terjun dari ketinggian 80 meter dengan laju aliran sebesar 500 kg/s. Jika turbin pembangkit tenaga listrik yang digunakan memiliki efisiensi 60%, besarnya energi listrik yang dihasilkan per sekon adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
- a. 240 kJ d. 600 kJ
- b. 400 kJ e. 720 kJ
- c. 480 kJ
22. Sebuah mesin pesawat terbang memberikan gaya dorong sebesar 25.000 N sehingga bergerak dengan kecepatan 300 m/s. Daya yang diberikan mesin pesawat terbang itu adalah
- a. 6,0 MW d. 12 MW
- b. 7,5 MW e. 15 MW
- c. 9,0 MW
23. Sebuah truk bermassa 2,5 ton. Truk tersebut melaju dengan kecepatan 108 km/jam dan menabrak sebuah pohon sehingga truk berhenti dalam waktu 0,15 sekon. Gaya rata-rata pada truk selama berlangsungnya tabrakan adalah (dalam kN).
- a. 250 d. 5.000
- b. 500 e. 25.000
- c. 2.500
24. Sebuah bola dijatuhkan dari ketinggian 5 m dan terpental hingga mencapai ketinggian 0,8 m. Koefisien restitusi antara lantai dan bola itu adalah sebesar
- a. 0,3 d. 0,6
- b. 0,4 e. 0,7
- c. 0,5



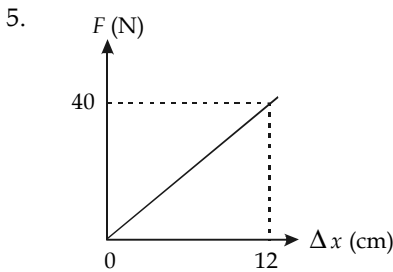
25. Sebuah peluru bermassa 10 g ditembakkan ke dalam suatu ayunan balistik yang bermassa 1,99 kg. Pada saat ayunan itu mencapai tinggi maksimum, kawat membentuk sudut 30° dengan vertikal (lihat gambar).



- Panjang kawat ayunan adalah 40 cm. Jika percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, kecepatan peluru ditembakkan adalah
- 200 m/s
 - 250 m/s
 - 280 m/s
 - 300 m/s
 - 400 m/s

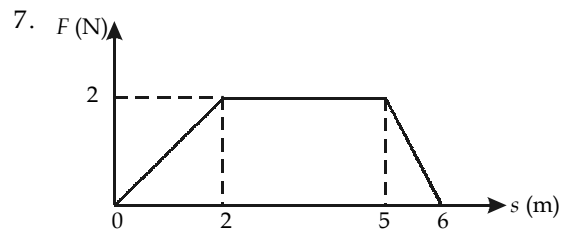
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

- Sebuah mobil bergerak lurus dengan kecepatan sebesar 72 km/jam. Tiba-tiba mobil direm hingga berhenti dalam waktu 6 sekon. Berapakah panjang lintasan selama pengereman berlangsung?
- Posisi peluru yang ditembakkan dari atas bidang datar dengan sudut elevasi tertentu dinyatakan dengan persamaan $r = [160t \mathbf{i} + (120t - 5t^2)\mathbf{j}] \text{ m}$. Jika \mathbf{i} dan \mathbf{j} menyatakan vektor satuan dalam arah x dan y , serta t dalam sekon, tentukanlah jarak terjauh yang dicapai peluru.
- Dengan kecepatan berapakah sebuah satelit harus mengorbit pada ketinggian R dari permukaan Bumi? Diketahui massa Bumi M , massa satelit m , jari-jari Bumi R , dan anggap satelit bergerak melingkar beraturan.
- Diketahui bahwa jari-jari Bumi hampir dua kali dari jari-jari planet Mars, sedangkan massa Mars sekitar 10% dari massa Bumi. Tentukan perbandingan medan gravitasi di permukaan Bumi dan Mars.



Grafik tersebut menunjukkan pertambahan panjang karet akibat gaya yang berbeda-beda. Tentukan besarnya energi potensial karet pada pertambahan panjang 12 cm.

- Pada suatu getaran harmonis pegas, diketahui massa beban yang digantung pada ujung bawah pegas adalah 100 g. Berapa gram massa benda yang harus ditambahkan agar periode getarannya menjadi dua kali periode semula semula?



Grafik hubungan antara gaya terhadap perpindahan tampak pada gambar di samping. Tentukan usaha yang dilakukan oleh gaya F untuk interval $0 < x < 6 \text{ m}$.

- Pada sebuah gerak parabola, energi kinetik awalnya adalah E joule, sedangkan energi potensial pada titik tertingginya adalah 15 J. Jika massa benda tersebut 10 gram dan sudut elevasinya 60° tentukanlah perkiraan nilai E .
- Sebuah bola bermassa 0,5 kg dan bergerak dengan kecepatan 3 m/s, kemudian menumbuk sebuah bola lain bermassa 0,3 kg yang mula-mula diam. Jika setelah tumbukan bola pertama diam, tentukanlah kecepatan bola kedua.
- Sebuah granat yang diam tiba-tiba meledak dan pecah menjadi dua bagian yang bergerak dalam arah berlawanan. Perbandingan massa kedua bagian itu adalah $m_1 : m_2 = 2 : 3$. Jika energi yang dibebaskan adalah $4 \times 10^5 \text{ J}$, tentukanlah perbandingan energi kinetik pecahan granat pertama dan kedua.



Sumber: www.techtribes.ch

B a b 6

Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep dan prinsip mekanika klasik sistem kontinu dalam menyelesaikan masalah dengan cara memformulasikan hubungan antara konsep torsi, momentum sudut, dan momen inersia berdasarkan Hukum Kedua Newton, serta penerapannya dalam masalah benda tegar.

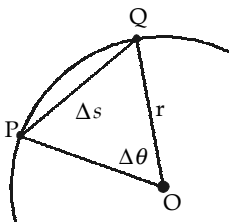
Dalam pertunjukan sirkus, seringkali terdapat peragaan kesetimbangan seperti yang dapat Anda lihat pada gambar. Dalam peragaan tersebut beberapa orang pemain sirkus saling menumpukkan diri satu sama lain, namun pemain yang dijadikan tumpuan tetap dapat menjaga agar setiap pemain dapat berdiri dan melakukan atraksinya. Bagaimanakah cara pemain sirkus tersebut melakukan peragaan kesetimbangan dan tidak terjatuh? Mengapa pemain sirkus pada gambar dapat berdiri di atas papan beroda silinder dan tidak tergelincir?

Prinsip Fisika yang mendasari peragaan para pemain sirkus tersebut akan dibahas dalam bab ini, yaitu mengenai kinematika dan dinamika gerak rotasi serta kesetimbangan benda tegar.

- A. Kinematika Rotasi**
- B. Momen Gaya dan Momen Inersia**
- C. Dinamika Rotasi**
- D. Kesetimbangan Benda Tegar**

Soal Pramateri

1. Jelaskanlah apa yang dimaksud dengan momen?
2. Sebuah kincir berdiameter 10 meter akan terlihat berputar lebih lambat daripada kincir berdiameter 2 meter. Menurut Anda, bagaimanakah hal tersebut terjadi?
3. Menurut Anda, apakah pengertian benda setimbang itu? Berikanlah contoh benda-benda yang berada dalam keadaan setimbang.



Gambar 6.1

Sebuah partikel yang berpindah dari titik P ke titik Q dalam lintasan lingkaran.

A Kinematika Rotasi

Dalam kehidupan sehari-hari, Anda banyak menjumpai contoh gerak rotasi. Bumi berotasi pada sumbunya untuk bergerak mengelilingi Matahari dalam orbit yang bentuknya elips. Demikian juga Bulan yang berotasi pada sumbunya untuk bergerak mengelilingi Bumi.

Mobil yang bergerak mengelilingi suatu sudut juga bergerak dalam busur melingkar. Kajian tentang gerak melingkar telah Anda pelajari di Bab 1. Dalam subbab ini, akan dibahas gerak benda yang berotasi pada sumbunya yang ditinjau secara umum menggunakan fungsi turunan dan integral.

1. Posisi Sudut dan Perpindahan Sudut

Di Kelas X, Anda telah mempelajari bahwa posisi sudut suatu partikel yang bergerak melingkar dinyatakan sebagai θ dengan satuannya dalam radian atau derajat. Apabila partikel tersebut berpindah, perpindahannya disebut perpindahan sudut.

Perhatikanlah **Gambar 6.1** berikut. Gambar tersebut menunjukkan sebuah partikel yang bergerak dalam lintasan berbentuk lingkaran berjari-jari R . Partikel tersebut berpindah dari titik P ke titik Q dengan jarak perpindahan linear $\Delta s = s_Q - s_P$ dan perpindahan sudut $\Delta \theta = \theta_Q - \theta_P$. Oleh karena itu, dapat dinyatakan hubungan sebagai berikut.

$$\Delta \theta = \frac{\Delta s}{r} \quad (6-1)$$

dengan: $\Delta \theta$ = perpindahan sudut (rad),

Δs = perpindahan linear (m), dan

r = jari-jari lingkaran (m).

2. Kecepatan Sudut

Berdasarkan definisi kecepatan, kecepatan sudut adalah perubahan posisi sudut partikel per satuan waktu. Kecepatan sudut juga terbagi atas dua, yaitu kecepatan sudut rata-rata dan kecepatan sudut sesaat. Analisa kedua jenis kecepatan tersebut ditinjau dari perhitungan integral dan turunan akan dibahas pada bagian berikut.

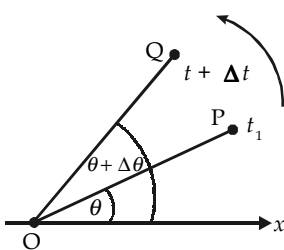
a. Kecepatan Sudut Rata-Rata

Perpindahan sudut yang dilakukan oleh partikel yang bergerak melingkar merupakan fungsi waktu. Dengan demikian, dapat dituliskan $\theta = \theta(t)$. Perhatikanlah **Gambar 6.2**. Posisi sudut benda di titik P pada saat t dinyatakan sebagai θ . Kemudian, partikel tersebut berpindah selama selang waktu Δt sejauh $\Delta \theta$ sehingga pada saat $t + \Delta t$, partikel berada di titik Q dengan posisi sudut $\theta + \Delta \theta$. Perpindahan sudut partikel tersebut adalah

$$\Delta \theta = (\theta + \Delta \theta) - \theta$$

Dengan demikian, kecepatan sudut partikel dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\bar{\omega} = \frac{(\theta + \Delta \theta) - \theta}{(t + \Delta t) - t} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (6-2)$$

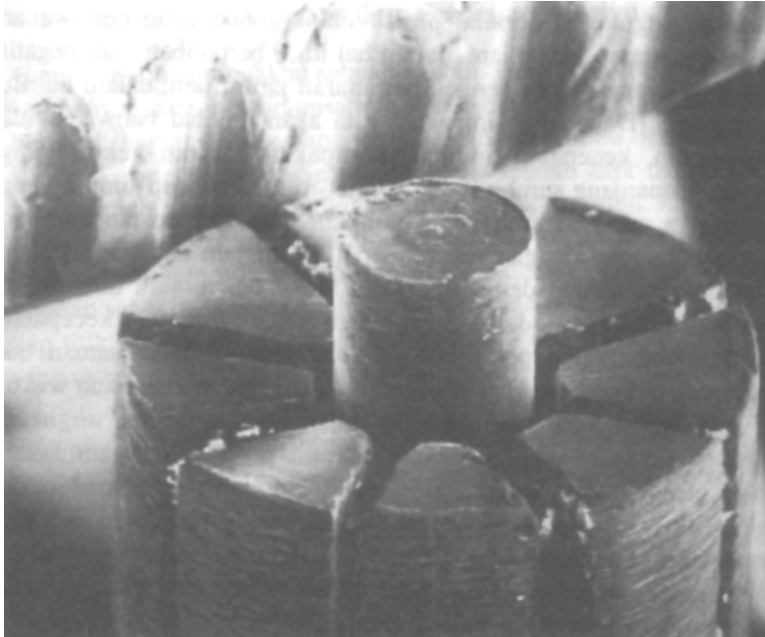


Gambar 6.2

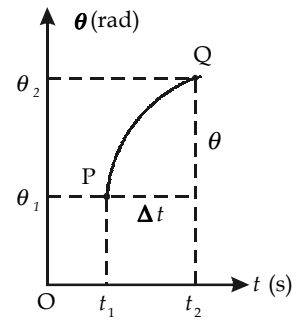
Perpindahan sudut sebesar $\Delta \theta$ selama selang waktu Δt

Oleh karena θ bersatuan derajat, radian, atau putaran, $\bar{\omega}$ pun dapat bersatuan derajat/sekon, radian/sekon, atau putaran per sekon.

Apabila perpindahan sudut partikel tersebut dibuat grafik hubungan antara posisi sudut (θ) terhadap waktu (t), seperti **Gambar 6.3**, Anda dapat melihat bahwa kecepatan sudut rata-rata dinyatakan sebagai perubahan posisi selama selang waktu tertentu.



Sumber: Fisika untuk Sains dan Teknik, 1991



Gambar 6.3

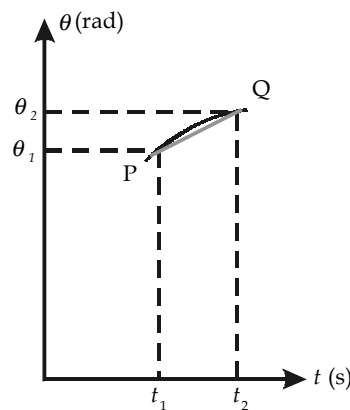
Perpindahan sudut sebesar $\Delta\theta$ selama selang waktu Δt pada partikel yang bergerak melingkar.

Gambar 6.4

Motor kecil ini memiliki diameter berorde milimeter. Motor ini dapat memiliki kelajuan sudut lebih dari 120.000 putaran/menit. Tepi uang logam menjadi latar belakang gambar motor listrik.

b. Kecepatan Sudut Sesaat

Perhatikanlah grafik posisi sudut terhadap waktu pada **Gambar 6.5**.



Gambar 6.5

Grafik posisi sudut, θ , terhadap waktu, t , kecepatan sudut rata-

$$\text{rata, } \bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Apabila selang waktu perpindahan partikel yang bergerak melingkar menuju nol, kemiringan garis yang menyatakan kecepatan sudut rata-rata partikel akan semakin curam. Dengan demikian, kecepatan sudut sesaat dapat didefinisikan sebagai.

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (6-3)$$

atau

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (6-4)$$



dengan kalimat lain dapat dinyatakan bahwa ω merupakan turunan pertama dari fungsi posisi sudut terhadap waktu. Satuan kecepatan sudut sesaat dinyatakan dalam radian/sekon.

Contoh 6.1

Posisi sudut suatu titik pada roda dinyatakan oleh $\theta = (3t^2 - 8t + 10)$ rad dengan t dalam sekon. Tentukanlah:

- posisi sudut titik tersebut pada saat $t = 2$ sekon,
- kecepatan sudut rata-rata selama 10 sekon pertama, dan
- kecepatan sudut titik pada saat $t = 10$ sekon.

Jawab

Diketahui: $\theta = (3t^2 - 8t + 10)$ rad.

- Posisi sudut titik pada saat $t = 2$ sekon adalah
 $\theta = 3t^2 - 8t + 10 = 3(2)^2 - 8(2) + 10 = 6$ rad.
- Tentukan lebih dahulu posisi sudut titik pada saat $t = 0$ dan $t = 10$ s.
 $t = 10$ s $\rightarrow \theta = 3(10)^2 - 8(10) + 10 = 230$ rad
 $t = 0 \rightarrow \theta = 3(0)^2 - 8(0) + 10 = 10$ rad
 $\Delta\theta = 230 - 10 = 220$ rad.

Untuk selang waktu $\Delta t = 10$ sekon, kecepatan sudut rata-rata adalah

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{220}{10} = 22 \text{ rad/s.}$$

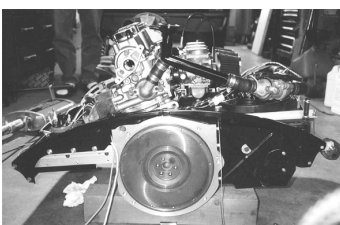
- Kecepatan sudut sesaat sebagai fungsi waktu ditentukan sebagai berikut.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt} (3t^2 - 8t + 10) = 6t - 8.$$

Kecepatan sudut sesaat titik pada $t = 10$ s adalah $\omega = 6t - 8 = 6(10) - 8 = 52$ m/s.

Jelajah Fisika

Fly Wheel



Sumber: www.pelicanparts.com

Fly Wheel atau roda gila adalah sebuah roda berdiameter besar yang biasanya digunakan pada mesin mobil untuk menstabilkan gerak mesin melalui gerak rotasi yang dilakukan oleh roda gila tersebut.

3. Menentukan Posisi Sudut dari Fungsi Kecepatan Sudut

Fungsi posisi sudut dapat ditentukan dengan cara mengintegalkan persamaan sudut sebagai fungsi waktu. Cara ini sama dengan cara menentukan posisi suatu benda dari pengintegralan fungsi kecepatan benda yang telah dibahas pada subbab A. Dari **Persamaan (6-4)** Anda telah mengetahui bahwa

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow d\theta = \omega(t) dt$$

Apabila persamaan tersebut diintegalkan, akan dapat dituliskan persamaan integral sebagai berikut

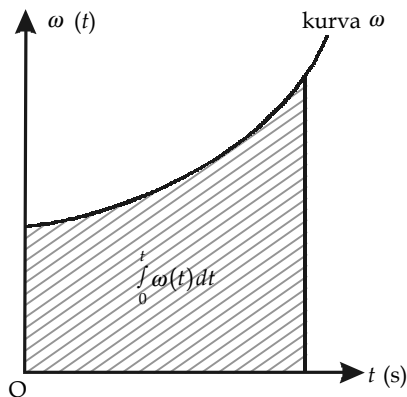
$$\int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega(t) dt$$

$$\theta - \theta_0 = \int_0^t \omega(t) dt$$

$$\boxed{\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega(t) dt} \quad (6-5)$$

dengan $\theta_0 =$ posisi sudut awal (rad atau derajat).

Perhatikanlah grafik pada **Gambar 6.6**. Oleh karena integral adalah penjumlahan yang kontinu, nilai $\int_0^t \omega(t) dt$ sama dengan luas daerah di bawah kurva grafik ω terhadap t .



Gambar 6.6

Posisi sudut partikel sama dengan daerah di bawah kurva.

4. Percepatan Sudut

Analogi dengan percepatan pada gerak linear, definisi percepatan sudut pada gerak melingkar adalah perubahan kecepatan sudut per satuan waktu. Pembahasan mengenai percepatan sudut juga terbagi atas dua, yaitu percepatan sudut rata-rata dan percepatan sudut sesaat.

a. Percepatan Sudut Rata-Rata

Kecepatan sudut pada saat t adalah sebesar ω dan pada saat $t + \Delta t$ adalah sebesar $\omega + \Delta\omega$. Percepatan sudut rata-rata partikel tersebut dapat dinyatakan sebagai

$$\alpha = \frac{(\omega + \Delta\omega) - \omega}{(t + \Delta t) - t} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (6-6)$$

atau

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (6-7)$$

dengan satuan percepatan sudut α adalah dalam rad/s^2 .

b. Percepatan Sudut Sesaat

Percepatan sudut sesaat didefinisikan sebagai limit percepatan sudut rata-rata untuk selang waktu yang sangat kecil atau Δt menuju nol. Secara matematis, persamaannya dituliskan sebagai berikut.

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (6-8)$$

Contoh 6.2

Sebuah roda berotasi pada suatu poros tertentu. Titik partikel pada roda tersebut memenuhi persamaan kecepatan sudut $\omega = 2t^2 - 3t + 8$, dengan ω dalam rad/s dan t dalam sekon. Tentukanlah:

- percepatan sudut rata-rata partikel untuk selang waktu $t = 2$ sekon sampai $t = 6$ sekon,
- percepatan sudut awal partikel, dan
- percepatan sudut partikel pada saat $t = 6$ sekon.

Jelajah Fisika

Rotor Helikopter



Sumber: home.c2i.net

Kecepatan sudut rotor helikopter (baling-baling yang terdapat di bagian ekor helikopter) dapat diubah dengan cara memberinya percepatan sudut melalui sebuah kontrol yang terdapat di *cockpit*.



Jelajah Fisika

Roda Gerinda



Sumber: www.hr-hardware.com

Roda gerinda digunakan dalam industri untuk mengasah alat-alat berat. Roda gerinda ini mengandung material pengasah dan berotasi pada porosnya sehingga dapat mengasah permukaan alat-alat berat tersebut.

Jawab

Diketahui: $\omega = 2t^2 - 3t + 8$.

- a. Persamaan umum kecepatan sudut adalah $\omega = 2t^2 - 3t + 8$ sehingga untuk $t_2 = 6$ sekon, $\omega_2 = 2(6)^2 - 3(6) + 8 = 62$ rad/s, dan untuk $t_1 = 2$ sekon, $\omega_1 = 2(2)^2 - 3(2) + 8 = -6$ rad/s. Percepatan sudut rata-ratanya, diperoleh

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{(62 \text{ rad/s}) - (-6 \text{ rad/s})}{(6 \text{ s} - 2 \text{ s})} = 17 \text{ rad/s}^2.$$

- b. Percepatan sudut sebagai fungsi waktu diperoleh dengan menerapkan persamaan berikut.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{dt}(2t^2 - 3t + 8) = 4t - 3$$

Percepatan sudut awal partikel (pada $t = 0$) adalah $\alpha = -3$ rad/s².

- c. Percepatan sudut partikel pada saat $t = 6$ sekon adalah $\alpha = 4(6) - 3 = 21$ rad/s².

5. Menentukan Kecepatan Sudut dari Fungsi Percepatan Sudut

Berdasarkan **Persamaan (6-7)**, Anda telah mengetahui bahwa percepatan sudut adalah turunan pertama dari fungsi kecepatan sudut. Oleh karena itu, apabila persamaan percepatan sudut sebagai fungsi waktu suatu partikel diintegrasikan, akan diperoleh persamaan kecepatan sudutnya.

$$\alpha(t) = \frac{d\omega}{dt} \rightarrow d\omega = \alpha(t) dt$$

$$\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = \int_0^t \alpha(t) dt$$

$$\omega - \omega_0 = \int_0^t \alpha(t) dt$$

$$\boxed{\omega = \omega_0 + \int_0^t \alpha(t) dt} \quad (6-9)$$

dengan ω_0 = kecepatan sudut awal (rad/s)

Contoh 6.3

Sebuah piringan hitam berputar dengan percepatan sudut $\alpha = (10 - 4t)$ rad/s² dengan t dalam sekon. Pada saat $t = 0$, sebuah titik berada pada sudut $\theta_0 = 0^\circ$ dengan kecepatan sudut awal $\omega_0 = 4$ rad/s. Tentukan:

- persamaan kecepatan sudut, dan
- posisi sudut sebagai fungsi waktu.

Jawab

Diketahui: $\alpha = (10 - 4t)$ rad/s², $\theta_0 = 0^\circ$, dan $\omega_0 = 4$ rad/s.

- a. Gunakan persamaan kecepatan sudut.

$$\omega = \omega_0 + \int_0^t \alpha dt = 4 + \int_0^t (10 - 4t) dt = 4 + 10t - \frac{4}{2}t^2$$

$$\omega = (4 + 10t - 2t^2) \text{ rad/s.}$$

- b. Posisi sudut dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega dt = 0 + \int_0^t (4 + 10t - 2t^2) dt = 4t + \frac{10}{2}t^2 - \frac{2}{3}t^3$$

$$\theta = (4t + 5t^2 - \frac{2}{3}t^3) \text{ rad.}$$

6. Gerak Melingkar Beraturan dan Gerak Melingkar Berubah Beraturan

Pada gerak melingkar beraturan, kecepatan sudut partikel tetap atau tidak bergantung pada waktu. Oleh karena itu, dari **Persamaan (6-4)** didapatkan persamaan gerak melingkar beraturan sebagai berikut.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow d\theta = \omega dt.$$

Apabila setiap ruas diintegrasikan, dapat dituliskan

$$\int_0^{\theta_t} d\theta = \int_0^t \omega dt \rightarrow \int_0^{\theta_t} d\theta = \omega \int_0^t dt$$

$$\theta_t - \theta_0 = \omega t$$

$$\boxed{\theta_t = \theta_0 + \omega t} \quad (6-10)$$

dengan θ_0 = posisi sudut saat $t = 0$ sekon (rad).

Pada gerak melingkar berubah beraturan, kecepatan sudut partikel berubah terhadap waktu (ω merupakan fungsi waktu) dan partikel bergerak melingkar dengan percepatan sudut, α , konstan. Oleh karena itu, dari **Persamaan (6-7)** didapatkan persamaan gerak melingkar berubah beraturan sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \rightarrow d\omega = \alpha dt$$

Apabila ruas kanan dan ruas kiri persamaan diintegrasikan, didapatkan

$$\int_{\omega_0}^{\omega_t} d\omega = \int_0^t \alpha dt \rightarrow \int_{\omega_0}^{\omega_t} d\omega = \alpha \int_0^t dt$$

$$\omega_t - \omega_0 = \alpha t$$

$$\boxed{\omega_t = \omega_0 + \alpha t} \quad (6-11)$$

dengan ω_0 = kecepatan sudut awal (rad/s)

Apabila **Persamaan (6-4)** diintegrasikan, akan diperoleh posisi sudut partikel sebagai berikut.

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow d\theta = \omega(t) dt$$

Oleh karena $\omega(t) = \omega_0 + \alpha t$ maka pengintegralan persamaannya menjadi

$$\int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega(t) dt + \int_0^t (\omega_0 + \alpha t) dt$$

$$\theta - \theta_0 = \int_0^t \omega_0 dt + \int_0^t \alpha t dt = \omega_0 \int_0^t dt + \alpha \int_0^t t dt$$

$$\theta - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\boxed{\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2} \quad (6-12)$$

Jika $\theta_0 = 0$, akan diperoleh persamaan

$$\boxed{\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2} \quad (6-13)$$

Jangan Lupa

1 putaran = $360^\circ = 2\pi$ rad
 1 rad = $\frac{180}{\pi}$ derajat = $57,3^\circ$
 1 rpm = 1 rotasi per menit
 = $1 \times \frac{2\pi}{60}$ rad/s



Dari **Persamaan (6-11)** juga dapat diketahui bahwa

$$t = \frac{\omega_t - \omega_0}{\alpha} \quad (6-14)$$

Oleh karena itu jika **Persamaan (6-14)** disubstitusikan ke **Persamaan (6-13)** akan diperoleh

$$\theta = \omega_0 \left(\frac{\omega_t - \omega_0}{\alpha} \right) + \frac{1}{2} \alpha \left(\frac{\omega_t - \omega_0}{\alpha} \right)^2$$

$$\omega_t^2 = \omega_0^2 + 2 \alpha s \quad (6-15)$$

7. Analogi Gerak Translasi dan Gerak Rotasi

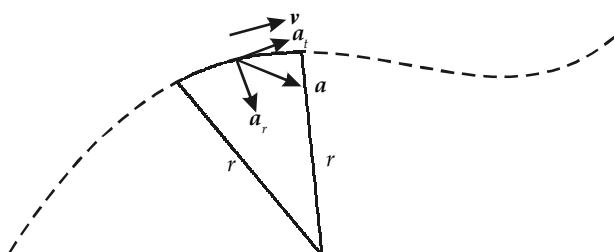
Gerak rotasi dan gerak translasi (persamaan gerak) memiliki banyak persamaan. Besaran gerak translasi memiliki hubungan dengan gerak rotasi. Hubungan tersebut menghasilkan bentuk rumus gerak rotasi yang bisa dianalogikan dengan gerak translasi, seperti terlihat pada **Tabel 6.1** berikut.

Tabel 6.1 Tabel Analogi Gerak Translasi dan Gerak Rotasi

Gerak Translasi		Gerak Rotasi		Hubungannya
Perpindahan/kedudukan	s/r	Perpindahan sudut (θ)	θ	$s = \theta r$
Kecepatan linear rata-rata	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	Kecepatan sudut rata-rata ($\bar{\omega}$)	$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$	$\bar{v} = \bar{\omega} r$
Kecepatan linear sesaat	$v = \frac{ds}{dt}$	Kecepatan sudut sesaat (ω)	$\omega = \frac{d\theta}{dt}$	$v = \omega r$
Menentukan posisi dari fungsi kecepatan linear	$r = r_0 + \int v dt$	Menentukan posisi sudut dari fungsi kecepatan sudut	$\theta = \theta_0 + \int \omega dt$	
Percepatan linear rata-rata	$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	Percepatan sudut rata-rata (α)	$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$	$\bar{a} = \bar{\alpha} r$
Percepatan linear sesaat	$a = \frac{dv}{dt}$	Percepatan linear sesaat	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$	$a = \alpha r$
Menentukan kecepatan dari fungsi percepatan	$v = v_0 + \int a dt$	Menentukan kecepatan dari fungsi percepatan	$\omega = \omega_0 + \int \alpha dt$	
Gerak lurus berubah beraturan (GLBB)	$v = v_0 + at$ $s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ $v^2 = v_0^2 + 2as$	Gerak melingkar berubah beraturan (GMBB)	$\omega = \omega_0 + \alpha t$ $\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$ $\omega^2 = \omega_0^2 + 2 \alpha \theta$	

8. Percepatan Linear dan Percepatan Sudut

Perhatikan **Gambar 6.7** berikut.



Gambar 6.7

Percepatan linear dan percepatan sudut.

Titik P mengalami percepatan linear (a) yang terdiri atas percepatan tangensial (a_t) dan percepatan sentripetal (a_s), serta percepatan sudut (α). Percepatan tangensial adalah komponen percepatan menurut arah garis singgung.

Percepatan sentripetal terjadi akibat perubahan arah vektor kecepatan dan arah percepatan sentripetal yang arahnya tegak lurus vektor kecepatan (menuju pusat lingkaran). Hubungan antara besaran-besaran tersebut adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} a_t &= \alpha r \\ a_s &= \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \\ a &= \sqrt{a_t^2 + a_s^2} = r\sqrt{\alpha^2 + \omega^4} \end{aligned} \quad (6-17)$$

Contoh 6.4

Piringan hitam bergerak melingkar dengan kecepatan sudut 32 rad/s. Kemudian, kecepatannya berkurang menjadi 2 rad/s setelah 10 detik.

- Berapakah percepatan sudut meja jika dianggap konstan?
- Jika radius meja putar adalah 10 cm, berapakah besar percepatan tangensial dan percepatan sentripetal sebuah titik di tepi piringan pada saat $t = 10$?
- Berapakah percepatan totalnya?

Jawab

Diketahui: $\omega_0 = 32$ rad/s, $\omega_t = 2$ rad/s, $r = 10$ cm, dan $t = 10$ s.

- Kecepatan sudut awal diperoleh dari persamaan $\omega = \omega_0 + \alpha t$.
 $2 \text{ rad/s} = 32 \text{ rad/s} + \alpha(10 \text{ s})$ atau $\alpha = -3 \text{ rad/s}^2$
Tanda negatif menunjukkan bahwa putaran piringan hitam diperlambat.
- Percepatan tangensial a_t sebuah titik yang terletak pada jarak $r = 10$ cm dari pusat rotasi adalah
 $a_t = \alpha r = (-3 \text{ rad/s}^2)(10 \text{ cm}) = -30 \text{ cm/s}^2$ (diperlambat)
Percepatan sentripetal dihitung sebagai berikut
 $a_s = \omega^2 r = (2 \text{ rad/s})^2(10 \text{ cm}) = 40 \text{ cm/s}^2$
- Percepatan total benda adalah.

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_s^2} = \sqrt{(2,42 \text{ cm/s}^2)^2 + (168 \text{ cm/s}^2)^2} = 50 \text{ cm/s}^2.$$

Kata Kunci

- Posisi sudut
- Kecepatan sudut
- Percepatan sudut
- Gerak melingkar beraturan
- Gerak melingkar berubah beraturan

Soal Penguasaan Materi 6.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Posisi sudut suatu titik pada roda dinyatakan oleh persamaan $\theta = (2t^3 - 3t^2 + 6)$ rad dengan t dalam detik. Tentukanlah:
 - posisi sudut titik tersebut pada saat $t = 2$ detik;
 - kecepatan sudut rata-rata selama 4 detik pertama;
 - kecepatan sudut titik pada saat $t = 4$ detik;
 - percepatan sudut pada saat $t = 2$ detik.
- Sebuah roda berotasi. Sebuah titik pada roda tersebut memenuhi persamaan kecepatan sudut $\omega = 2t + 4$, dengan satuan ω dalam rad/s dan t dalam detik. Tentukanlah:
 - percepatan sudut partikel;
 - kecepatan sudut awal partikel;
 - perpindahan sudut partikel antara $t = 0$ sampai $t = 4$ detik.
- Sebuah benda yang massanya 2 kg meluncur di jalan lingkaran vertikal licin dan berjari-jari $r = 2$ m. Jika laju benda di titik A yang terletak di jari-jari lingkaran adalah $2\sqrt{5}$ m/s dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:
 - percepatan sentripetal benda;
 - percepatan sudut benda;
 - percepatan total benda.
- Dari keadaan diam, benda tegar melakukan gerak melingkar dengan percepatan sudut 5 rad/s^2 . Titik P berada pada benda tersebut dan berjarak 20 cm dari sumbu putar. Tepat setelah benda bergerak selama 0,69 detik, tentukan:
 - percepatan tangensial yang dialami titik P;
 - percepatan sentripetal yang dialami titik P;
 - percepatan total titik P.



B Momen Gaya dan Momen Inersia

Pada pelajaran sebelumnya, Anda telah mempelajari tentang gaya sebagai penyebab terjadinya gerak linear dan percepatan linear. Dalam bab ini, Anda akan mempelajari tentang dinamika gerak rotasi dan penyebabnya, yaitu momen gaya yang menyebabkan timbulnya kecepatan sudut.

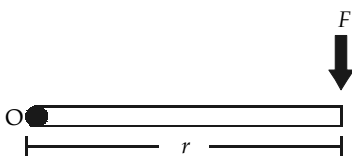
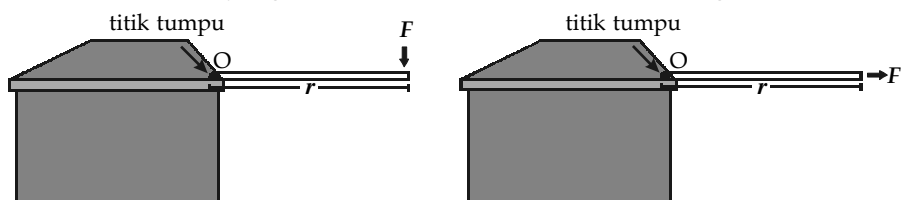
1. Momen Gaya

Momen gaya (torsi) adalah sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi. Anda telah mengetahui bahwa gaya akan menyebabkan terjadinya perubahan gerak benda secara linear. Apabila Anda ingin membuat sebuah benda berotasi, Anda harus memberikan momen gaya pada benda tersebut. Apakah momen gaya itu? Agar Anda dapat memahami konsep momen gaya, lakukanlah kegiatan **Kerjakanlah 6.1** berikut.

Kerjakanlah 6.1

Memahami Prinsip Momen Gaya

Ambillah satu penggaris. Kemudian, tumpukan salah satu ujungnya pada tepi meja. Doronglah penggaris tersebut ke arah atas atau bawah meja. Bagaimanakah gerak penggaris? Selanjutnya, tariklah penggaris tersebut sejajar dengan arah panjang penggaris. Apakah yang terjadi? Bandingkan kedua kejadian tersebut. Kesimpulan apakah yang Anda dapatkan? Diskusikanlah dengan teman Anda.



Gambar 6.8

Sebuah batang dikenai gaya sebesar F yang tegak lurus terhadap batang dan berjarak sejauh r terhadap titik tumpu O . Batang tersebut memiliki momen gaya $\tau = r \times F$.

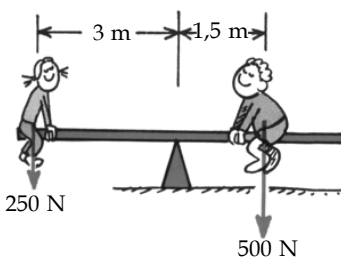
Saat Anda memberikan gaya F yang arahnya tegak lurus terhadap penggaris, penggaris itu cenderung untuk bergerak memutar. Namun, saat Anda memberikan gaya F yang arahnya sejajar dengan panjang penggaris, penggaris tidak bergerak. Hal yang sama berlaku saat Anda membuka pintu. Gaya yang Anda berikan pada pegangan pintu, tegak lurus terhadap daun pintu sehingga pintu dapat bergerak membuka dengan cara berputar pada engselnya. Gaya yang menyebabkan benda dapat berputar menurut sumbu putarnya inilah yang dinamakan momen gaya. Definisi momen gaya secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\tau = r \times F \quad (6-18)$$

dengan: r = lengan gaya = jarak sumbu rotasi ke titik tangkap gaya (m),
 F = gaya yang bekerja pada benda (N), dan
 τ = momen gaya (Nm).

Perhatikan **Gambar 6.9**. Pada gambar tersebut tampak dua orang anak sedang bermain jungkat-jungkit dan berada dalam keadaan setimbang, walaupun berat kedua anak tidak sama. Mengapa demikian? Hal ini berhubungan dengan lengan gaya yang digunakan. Anak yang lebih ringan berjarak 3 m dari titik tumpu ($r_1 = 3$ m), sedangkan anak yang lebih berat memiliki lengan gaya yang lebih pendek, yaitu $r_2 = 1,5$ m. Momen gaya yang dihasilkan oleh masing-masing anak adalah

$$\begin{aligned} \tau_1 &= r_1 \times F_1 & \tau_2 &= r_2 \times F_2 \\ &= (3 \text{ m})(250 \text{ N}) & &= (1,5 \text{ m})(500 \text{ N}) \\ &= 750 \text{ Nm} & &= 750 \text{ Nm} \end{aligned}$$



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Gambar 6.9

Jungkat-jungkit setimbang karena momen gaya pada kedua lengannya sama besar.

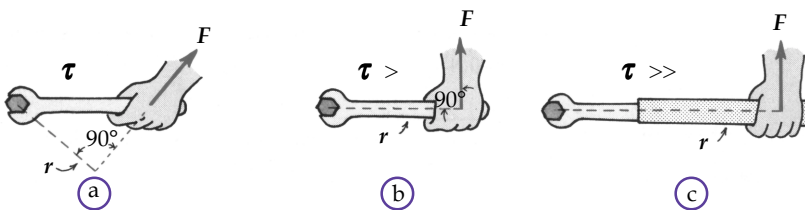
Dapat disimpulkan bahwa kedudukan setimbang kedua anak adalah akibat momen gaya pada kedua lengan sama besar.

Perhatikan **Gambar 6.10** Apabila gaya F yang bekerja pada benda membentuk sudut tertentu dengan lengan gayanya (r), **Persamaan (6-18)** akan berubah menjadi

$$\tau = rF \sin \theta \quad (6-19)$$

Dari **Persamaan (6-19)** tersebut, Anda dapat menyimpulkan bahwa gaya yang menyebabkan timbulnya momen gaya pada benda harus membentuk sudut θ terhadap lengan gayanya. Momen gaya terbesar diperoleh saat $\theta = 90^\circ$ ($\sin \theta = 1$), yaitu saat gaya dan lengan gaya saling tegak lurus.

Anda juga dapat menyatakan bahwa jika gaya searah dengan arah lengan gaya, tidak ada momen gaya yang ditimbulkan (benda tidak akan berotasi). Perhatikanlah **Gambar 6.11a** dan **6.11b**.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Arah gaya terhadap lengan gaya menentukan besarnya momen gaya yang ditimbulkan. Momen gaya yang dihasilkan oleh gaya sebesar F pada **Gambar 6.11b** lebih besar daripada momen gaya yang dihasilkan oleh gaya F yang sama pada **Gambar 6.11a**. Hal tersebut disebabkan sudut antara arah gaya terhadap lengan gayanya. Momen gaya yang dihasilkan juga akan semakin besar jika lengan gaya semakin panjang, seperti terlihat pada **Gambar 6.11c**. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa besar gaya F yang sama akan menghasilkan momen gaya yang lebih besar jika lengan gaya semakin besar. Prinsip ini dimanfaatkan oleh tukang pipa untuk membuka sambungan antarpipa.

Sebagai besaran vektor, momen gaya τ memiliki besar dan arah. Perjanjian tanda untuk arah momen gaya adalah sebagai berikut.

- Momen gaya, τ , diberi tanda positif jika cenderung memutar benda searah putaran jarum jam, atau arahnya mendekati pembaca.
- Momen gaya, τ , diberi tanda negatif jika cenderung memutar benda berlawanan arah putaran jarum jam, atau arahnya menjauhi pembaca.

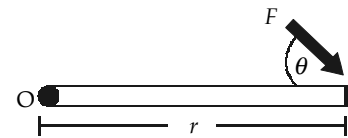
Perjanjian tanda untuk arah momen gaya ini dapat dijelaskan dengan aturan tangan kanan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.12**. Arah jari-jari merupakan arah lengan gaya, dan putaran jari merupakan arah gaya (searah putaran jarum jam atau berlawanan arah). Arah yang ditunjukkan oleh ibu jari Anda merupakan arah momen gaya (mendekati atau menjauhi pembaca).

Perhatikan **Gambar 6.13**. Jika pada benda bekerja beberapa gaya, momen gaya total benda tersebut adalah sebagai berikut. Besar τ yang ditimbulkan oleh F_1 dan F_2 terhadap titik O adalah τ_1 dan τ_2 . τ_1 bernilai negatif karena arah rotasi yang ditimbulkannya berlawanan arah putaran jarum jam. Sedangkan, τ_2 bernilai positif karena arah rotasi yang ditimbulkannya searah putaran jarum jam. Resultan momen gaya benda itu terhadap titik O dinyatakan sebagai jumlah vektor dari setiap momen gaya. Secara matematis dituliskan

$$\tau_{\text{total}} = \Sigma (r \times F)$$

atau

$$\tau_{\text{total}} = \tau_1 + \tau_2 \quad (6-20)$$

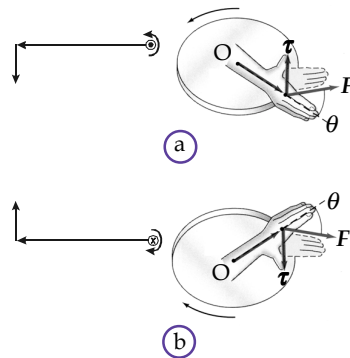


Gambar 6.10

Momen gaya yang ditimbulkan oleh gaya yang membentuk sudut θ terhadap benda (lengan gaya = r).

Gambar 6.11

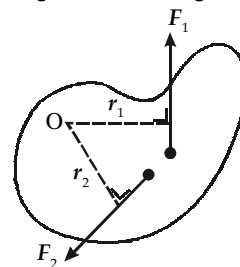
Semakin panjang lengan gaya, momen gaya yang dihasilkan oleh gaya F akan semakin besar.



Sumber: *Contemporary College Physics*, 2000

Gambar 6.12

- Gaya F yang menghasilkan momen gaya positif (mendekati pembaca) ditandai dengan titik.
- Gaya F yang menghasilkan momen gaya negatif (menjauhi pembaca) ditandai dengan tanda silang.



Gambar 6.13

Pada benda bekerja dua gaya, yaitu F_1 dan F_2 yang menghasilkan momen gaya $-\tau_1$ dan $+\tau_2$.



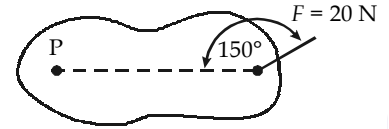
Contoh 6.1

Pada sebuah benda bekerja gaya 20 N seperti pada gambar. Jika titik tangkap gaya berjarak 25 cm dari titik P, berapakah besar momen gaya terhadap titik P?

Jawab

Diketahui: $F = 20 \text{ N}$, $r = 25 \text{ cm}$, dan $\theta = 150^\circ$.

$$\begin{aligned} \tau &= r F \sin \theta \\ &= (0,25 \text{ cm})(20 \text{ N})(\sin 150^\circ) \\ &= (0,25 \text{ cm})(20 \text{ N})\left(\frac{1}{2}\right) \\ &= 2,5 \text{ Nm.} \end{aligned}$$



Jangan Lupa

$\mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}$; $\mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i}$; $\mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j}$
 dan $\mathbf{j} \times \mathbf{i} = -\mathbf{k}$; $\mathbf{k} \times \mathbf{j} = -\mathbf{i}$;
 $\mathbf{i} \times \mathbf{k} = -\mathbf{j}$ serta $\mathbf{i} \times \mathbf{i} = 0$;
 $\mathbf{j} \times \mathbf{j} = 0$; $\mathbf{k} \times \mathbf{k} = 0$

Contoh 6.2

Sebuah gaya $F = (3\mathbf{i} + 5\mathbf{j}) \text{ N}$ memiliki lengan gaya $r = (4\mathbf{i} + 2\mathbf{j}) \text{ m}$ terhadap suatu titik poros. Vektor \mathbf{i} dan \mathbf{j} berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu- x dan sumbu- y pada koordinat Kartesius. Berapakah besar momen gaya yang dilakukan gaya F terhadap titik poros?

Jawab

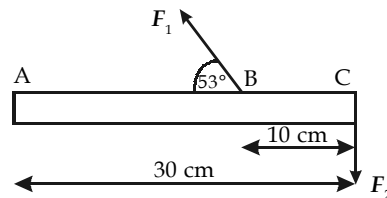
Diketahui: $F = (3\mathbf{i} + 5\mathbf{j})\text{N}$ dan $r = (4\mathbf{i} + 2\mathbf{j})\text{m}$.

$$\tau = r \times F = (4\mathbf{i} + 2\mathbf{j})\text{m} \times (3\mathbf{i} + 5\mathbf{j})\text{N} = (4)(5) (\mathbf{k}) \text{ Nm} + (2)(3) (-\mathbf{k}) \text{ Nm} = 14 \mathbf{k}$$

Jadi, besarnya momen gaya 14 Nm yang searah sumbu z .

Contoh 6.3

Batang AC yang panjangnya 30 cm diberi gaya seperti terlihat pada gambar.

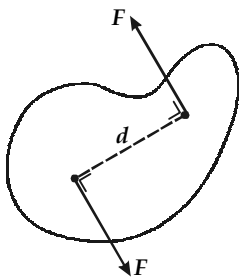


Jika $BC = 10 \text{ cm}$ dan $F_1 = F_2 = 20 \text{ N}$, berapakah momen gaya total terhadap titik A?

Jawab

Diketahui: $r_1 = 20 \text{ cm}$, $F_1 = F_2 = 20 \text{ N}$, $r_2 = 30 \text{ cm}$, $\theta_1 = 53^\circ$, dan $\theta_2 = 90^\circ$.

$$\begin{aligned} \tau &= -r_1 F_1 \sin \theta_1 + r_2 F_2 \sin \theta_2 \\ &= -(0,2 \text{ m})(20 \text{ N})(\sin 53^\circ) + (0,3 \text{ m})(20 \text{ N})(\sin 90^\circ) \\ &= -3,2 \text{ Nm} + 6 \text{ Nm} = 2,8 \text{ Nm.} \end{aligned}$$



Gambar 6.14

Kopel dari dua gaya F yang sama besar dan berlawanan arah.

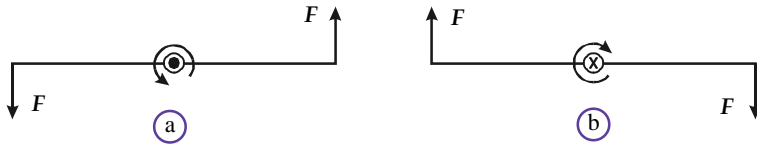
2. Momen Kopel

Kopel adalah pasangan dua buah gaya yang sejajar, sama besar, dan berlawanan arah. Kopel yang bekerja pada suatu benda akan mengakibatkan benda tersebut berotasi.

Momen kopel (M) adalah perkalian silang antara dua besaran vektor, yaitu gaya dan jarak antara kedua gaya tersebut. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$M = F \times d \quad (6-21)$$

Perjanjian tandanya, yaitu jika kopel menyebabkan perputaran benda searah putaran jarum jam, momen kopel (M) bernilai positif (mendekati pembaca, \odot). Sebaliknya, apabila kopel menyebabkan perputaran benda berlawanan arah dengan putaran jarum jam, momen kopel bernilai negatif (menjauhi pembaca \otimes).



Contoh aplikasi momen kopel dalam keseharian terdapat pada pedal sepeda. Kedua kaki akan memberikan gaya F yang sama pada pedal sepeda (panjang pedal sama) dengan arah keduanya saling berlawanan.

3. Momen Inersia

Sebuah benda yang berotasi pada sumbunya, cenderung untuk terus berotasi pada sumbu tersebut selama tidak ada gaya luar (momen gaya) yang bekerja padanya. Ukuran yang menentukan kelembaman benda terhadap gerak rotasi dinamakan momen inersia (I).

Momen inersia suatu bergantung pada massa benda dan jarak massa benda tersebut terhadap sumbu rotasi. Jika benda berupa partikel atau titik bermassa m berotasi mengelilingi sumbu putar yang berjarak r , momen inersia partikel itu dinyatakan dengan persamaan

$$I = mr^2 \quad (6-22)$$

Dari **Persamaan (6-22)** itu, Anda dapat menyimpulkan bahwa momen inersia suatu partikel berbanding lurus dengan massa partikel dan kuadrat jarak partikel tersebut terhadap sumbu rotasinya.

Dengan demikian, semakin jauh jarak poros benda (sumbu rotasinya), besar momen inersia benda tersebut akan semakin besar. Prinsip ini banyak digunakan dalam atraksi sirkus, misalnya atraksi berjalan pada seutas tali. Dalam atraksi tersebut, pemain akrobat membawa sepotong kayu panjang yang akan memperbesar momen inersianya sehingga ia dapat menyeimbangkan badannya saat berjalan pada tali tersebut.



Sumber: news.bbc.co.uk

Apabila terdapat banyak partikel dengan massanya masing-masing m_1 , m_2 , dan m_3 , serta memiliki jarak masing-masing r_1 , r_2 , dan r_3 terhadap poros (sumbu rotasi), momen inersia total partikel tersebut adalah penjumlahan momen inersia setiap partikelnya. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 \quad (6-23)$$

Gambar 6.15

- (a) Momen kopel positif mendekati pembaca diberi tanda \odot .
- (b) Momen kopel negatif menjauhi pembaca diberi tanda \otimes .



Sumber: kotaaraya.com

Gambar 6.16

Kopel digunakan dalam mengayuh sepeda.

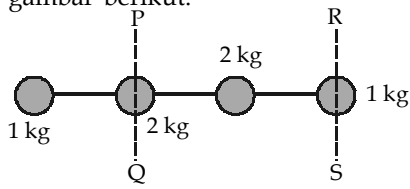
Gambar 6.17

Kayu panjang yang dibawa pemain akrobat memperbesar momen inersianya sehingga ia dapat menyeimbangkan tubuhnya saat berjalan menyusuri tali.



Contoh 6.4

Empat partikel dihubungkan dengan batang kayu yang ringan dan massanya diabaikan seperti pada gambar berikut.



Jika jarak antarpartikel sama, yaitu 20 cm, berapakah momen inersia sistem partikel tersebut terhadap

- poros PQ;
- poros RS.

Jawab

Diketahui: $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 2 \text{ kg}$, $m_3 = 2 \text{ kg}$, $m_4 = 1 \text{ kg}$, dan $r = 20 \text{ cm}$.

- Momen inersia sistem terhadap poros PQ, berarti PQ sebagai sumbu rotasi

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + m_4 r_4^2$$

$$= (1 \text{ kg})(0,2 \text{ m})^2 + (2 \text{ kg})(0 \text{ m})^2 + (2 \text{ kg})(0,2 \text{ m})^2 + (1 \text{ kg})(0,4 \text{ m})^2 = 0,28 \text{ kgm}^2$$

- Momen inersia sistem terhadap poros RS, berarti RS sebagai sumbu rotasi

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + m_4 r_4^2$$

$$= (1 \text{ kg})(0,6 \text{ m})^2 + (2 \text{ kg})(0,4 \text{ m})^2 + (2 \text{ kg})(0,2 \text{ m})^2 + (1 \text{ kg})(0 \text{ m})^2 = 0,76 \text{ kgm}^2$$

Jelajah Fisika

Momen Inersia



Sumber: antwrp.gsfc.nasa.gov

Dengan mengukur perubahan yang kecil pada orbit satelit-satelit, ahli geofisika dapat mengukur momen inersia Bumi. Hal ini menginformasikan pada kita bagaimana massa planet-planet terdistribusi di bagian dalamnya. Teknik yang sama juga telah digunakan di pesawat ruang angkasa antarplanet untuk menyelidiki struktur dalam dari dunia-dunia lain.

Sumber: *Fisika Universitas*, 2002

Benda tegar adalah suatu benda yang memiliki satu kesatuan massa yang kontinu (tidak terpisahkan antara satu sama lain) dan bentuknya teratur. Pada benda tegar, massa benda terkonsentrasi pada pusat massanya dan tersebar pada jarak yang sama dari titik pusat massa benda. Oleh karena itu, momen inersia benda tegar dapat dihitung menggunakan teknik integral dengan persamaan

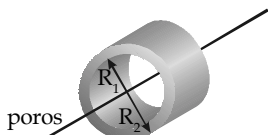
$$I = \int r^2 dm \quad (6-24)$$

Momen inersia berbagai bentuk benda tegar berdasarkan sumbu rotasinya dituliskan pada tabel berikut.

Tabel 6.2 Momen Inersia Berbagai Bentuk Benda Tegar

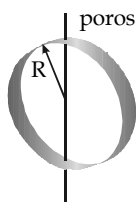
Nama	Gambar	Momen Inersia
Batang silinder, poros melalui pusat.		$I = \frac{1}{12} ml^2$
Batang silinder, poros melalui ujung.		$I = \frac{1}{3} ml^2$
Pelat besi persegi panjang, poros melalui pusat.		$I = \frac{1}{2} m(a^2 + b^2)$

Silinder berongga



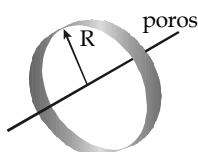
$$I = \frac{1}{2}m(R_1^2 + R_2^2)$$

Silinder pejal



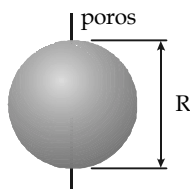
$$I = \frac{1}{2}mR^2$$

Silinder tipis berongga



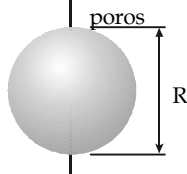
$$I = mR^2$$

Bola pejal



$$I = \frac{2}{5}mR^2$$

Bola tipis berongga



$$I = \frac{2}{3}mR^2$$

Sumber: *Fundamentals of Physics*, 2001 dan *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 2000

Dalam kasus benda tegar, apabila momen inersia benda terhadap pusat massa I_{pm} diketahui, momen inersia benda terhadap sumbu lain yang paralel dengan sumbu pusat massa dapat dihitung menggunakan teori sumbu paralel, yaitu

$$I = I_{pm} + md^2 \quad (6-25)$$

dengan: d = jarak dari sumbu pusat massa ke sumbu paralel (m), dan m = massa benda (kg).

Kata Kunci

- Momen gaya
- Lengan gaya
- Momen kopel
- Momen inersia
- Pusat massa
- Gerak rotasi

Contoh 6.5

Sebatang kayu silinder panjangnya 100 cm dan bermassa 800 g. Tentukan momen inersia batang kayu itu, jika batang kayu tersebut berputar dengan sumbu putarnya:

- di tengah-tengah,
- di ujung.

Jawab

Diketahui: $l = 100$ cm dan $m = 800$ g = 0,8 kg.

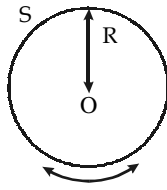
- Momen inersia batang kayu dengan sumbu putarnya di tengah:

$$I = \frac{1}{12}m\ell^2 = \frac{1}{12}(0,8 \text{ kg})(1 \text{ m})^2 = 0,067 \text{ kgm}^2.$$

- Momen inersia batang kayu dengan sumbu putarnya di ujung:

$$I = \frac{1}{3}m\ell^2 = \frac{1}{3}(0,8 \text{ kg})(1 \text{ m})^2 = 0,267 \text{ kgm}^2.$$

Contoh 6.6



Sebuah piringan yang bermassa M dirotasikan dengan poros melalui pusat massa O dan tegak lurus pada piringan. Momen inersia pusat massa piringan tersebut adalah $I_{pm} = \frac{1}{2}mR^2$ dengan R adalah jari-jari piringan. Tentukanlah momen inersia piringan tersebut jika poros digeser ke sisi piringan, yaitu di titik S yang sejajar dengan poros semula.

Jawab

Diketahui: $I_{pm} = \frac{1}{2}mR^2$ dan $d = R$.

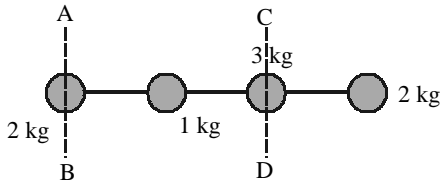
Karena sumbu putar digeser sejauh $d = R$ dari pusat massa, menurut teorema sumbu sejajar, momen inersia piringan adalah

$$I_s = I_{pm} + md^2 = \frac{1}{2}mR^2 + mR^2 = \frac{3}{2}mR^2.$$

Soal Penguasaan Materi 6.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Empat partikel dihubungkan dengan batang kaku yang ringan dan massanya diabaikan seperti pada gambar berikut.

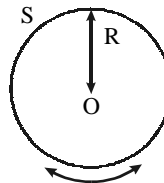


Jika jarak antarpartikel sama, yaitu 40 cm, berapakah momen inersia sistem partikel tersebut terhadap:

- poros AB;
 - poros CD.
- Sebatang kayu silinder memiliki panjang 80 cm dan massa 600 g. Tentukanlah momen inersianya, jika batang kayu tersebut berputar menurut sumbu putarnya:

- di tengah-tengah;
- di ujung;
- berjarak 20 cm dari ujung batang.

- Perhatikan gambar berikut.



Sebuah piringan bermassa 20 gram dan berjari-jari 10 cm. Tentukanlah momen inersia piringan tersebut jika dirotasikan dengan:

- poros melalui pusat massa O dan tegak lurus pada piringan;
- poros digeser ke sisi piringan di titik S yang sejajar poros semula.

C Dinamika Rotasi

Pada pembahasan materi sebelumnya, Anda telah mempelajari bahwa penyebab gerak translasi adalah gaya F dan penyebab gerak rotasi adalah momen gaya τ . Menurut Hukum Kedua Newton, persamaan gerak translasi benda diam bermassa m yang dikenai gaya F dan bergerak dengan percepatan a adalah $F = m \cdot a$. Demikian juga untuk benda dengan momen inersia I yang bergerak rotasi dengan percepatan sudut α karena adanya momen gaya τ , persamaannya adalah $\tau = I \cdot \alpha$.

Analogi dan hubungan antara gerak translasi dan gerak rotasi dapat dilihat pada Tabel 6.2 berikut.

Tabel 6.3 Analogi Gerak Translasi dan Rotasi

Gerak Translasi		Gerak Rotasi		Hubungannya
Jarak linear	s	Jarak Posisi (Sudut)	θ	$s = \theta R$
Kecepatan Linear	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	Kecepatan Sudut	$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$	$v = \omega R$
Percepatan Tangensial	$a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	Percepatan Sudut	$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$	$a = \alpha R$
Kelembaman Translasi (massa)	m	Kelembaman Rotasi (Momen Inersia)	I	$I = \sum_{i=1}^N m_i R_i^2$
Gaya	$F = ma$	Momen Gaya	$\tau = I\alpha$	$\tau = F \times r$
Energi Kinetik	$EK = \frac{1}{2} mv^2$	Energi Kinetik	$EK = \frac{1}{2} I\omega^2$	
Momentum Linear	$p = mv$	Momentum Sudut	$L = I\omega$	
Daya	$P = Fv$	Daya	$p = \tau\omega$	

1. Hubungan antara Momen Gaya dan Percepatan Sudut

Hubungan antara momen gaya dan percepatan sudut pada gerak rotasi analog dengan Hukum Kedua Newton pada gerak translasi. Pada gerak rotasi, berlaku hubungan sebagai berikut.

$$\tau = I\alpha \quad (6-26)$$

dengan: τ = momen gaya (Nm),
 I = momen inersia (kgm^2), dan
 α = percepatan sudut (rad/s^2).

Contoh 6.7

Sebuah roda berputar dari kecepatan 10 rad/s menjadi 70 rad/s karena mendapat momen gaya tetap dalam waktu 3 sekon. Jika momen kelembaman roda 4 kg m², tentukanlah besar momen gaya tersebut.

Jawab

Diketahui: $\omega_0 = 10 \text{ rad/s}$, $\omega = 70 \text{ rad/s}$, $I = 4 \text{ kg m}^2$, dan $t = 3 \text{ s}$.

$$\tau = I\alpha = I \left(\frac{\omega - \omega_0}{t} \right) = 4 \left(\frac{70 \text{ rad/s} - 10 \text{ rad/s}}{3 \text{ s}} \right) = 80 \text{ Nm.}$$

Contoh 6.8

Sebuah bola pejal yang berdiameter 40 cm berotasi dengan poros yang melalui pusat bola. Persamaan kecepatan sudut bola adalah $(5 + 20t) \text{ rad/s}$ dengan t dalam sekon. Apabila massa bola 4 kg, tentukan momen gaya yang bekerja pada bola.

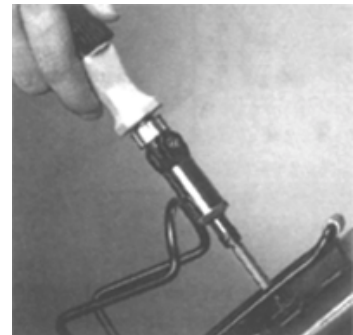
Jawab

Diketahui: $d = 40 \text{ cm}$, $\omega = (5 + 20t) \text{ rad/s}$, $m = 4 \text{ kg}$, dan $I = \frac{2}{5} mR^2$.

$$\tau = I\alpha = \frac{2}{5} mR^2 \left(\frac{d\omega}{dt} \right) = \frac{2}{5} (4 \text{ kg})(0,2 \text{ m})^2 (20 \text{ rad/s}) = 1,28 \text{ Nm.}$$

Jelajah Fisika

Obeng



Mengendurkan atau mengencangkan sebuah sekrup memerlukan pemberian percepatan sudut pada sekrup. Hal itu berarti memberikan torsi pada sekrup. Pemberian torsi ini mudah dilakukan dengan menggunakan obeng berjari-jari pegangan yang besar. Obeng ini akan menghasilkan lengan pengungkit besar untuk gaya yang diberikan oleh tangan Anda.

Sumber: Fisika Universitas, 2002

Jelajah Fisika

Torsi

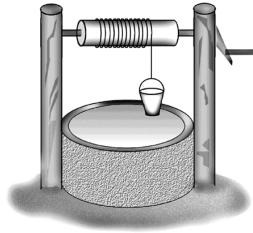


Sumber: www.rpi.edu

Sejak dahulu, pengukuran massa benda dilakukan dengan cara menyeimbangkan torsi antara dua lengan gaya suatu neraca yang dikenal dengan nama neraca lengan.

Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Contoh 6.9



Sebuah silinder pejal berjari-jari 15 cm dan bermassa 2 kg dijadikan katrol untuk sebuah sumur, seperti tampak pada gambar. Batang yang dijadikan poros memiliki permukaan licin sempurna. Seutas tali yang massanya dapat diabaikan, digulung pada silinder. Kemudian, sebuah ember bermassa 1 kg diikatkan pada ujung tali. Tentukan percepatan ember saat jatuh ke dalam sumur.

Jawab

Diketahui: $R = 15$ cm, massa katrol silinder $M = 2$ kg, dan massa ember $m = 1$ kg.

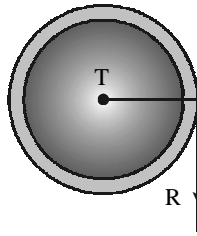
Rotasi pada katrol silinder:

Berdasarkan persamaan momen gaya didapatkan

$$\tau = I\alpha$$

$$RT = I \frac{a}{R}$$

$$T = I \frac{a}{R^2} \dots (a)$$

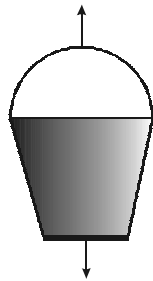


Translasi pada ember:

Berdasarkan Hukum Newton didapatkan

$$\sum F = ma$$

$$mg - T = ma \dots (b)$$



Dengan menggabungkan **Persamaan (a)** dan **Persamaan (b)**, diperoleh hubungan

$$mg - I \frac{a}{R^2} = ma \text{ atau } mg = \left(m + \frac{I}{R^2} \right) a$$

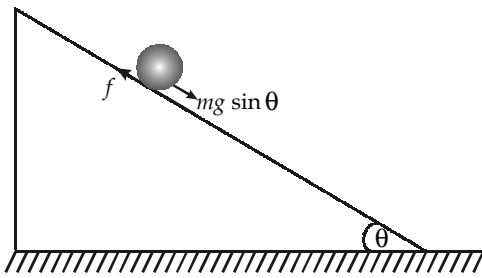
$$\text{sehingga } a = \frac{mg}{m + \frac{I}{R^2}} \text{ atau } a = \frac{g}{1 + \frac{I}{mR^2}} \dots (c)$$

Selanjutnya, substitusikan harga $I = \frac{1}{2} M R^2$ pada **Persamaan (c)** sehingga diperoleh

$$a = \frac{mg}{m + \frac{1}{2} M} = \frac{(1\text{kg})(10\text{m/s}^2)}{1\text{kg} + \frac{1}{2}(2\text{kg})} = \frac{10\text{kgm/s}^2}{2\text{kg}} = 5\text{m/s}^2$$

dengan m adalah massa ember dan M adalah massa katrol silinder.

Contoh 6.10



Sebuah benda pejal bermassa M dan berjari-jari R , memiliki momen inersia $I = kMR^2$. Benda tersebut menggelinding pada suatu bidang miring dengan sudut kemiringan, seperti tampak pada gambar.

- Berapakah percepatan yang dialami benda pejal tersebut?
- Tentukanlah percepatan yang terjadi, jika benda itu berupa bola dengan momen inersia $I = \frac{2}{5}MR^2$, atau silinder dengan $I = \frac{1}{2}MR^2$.

Jawab

Diketahui: $I_{\text{benda pejal}} = kMR^2$.

- Menurut Hukum Kedua Newton pada gerak translasi, diperoleh hubungan

$$Mg \sin \theta - f = Ma \text{ atau } Ma + f = Mg \sin \theta \dots (a)$$

Berdasarkan prinsip rotasi terhadap pusat benda, berlaku hubungan

$$\tau = I\alpha \rightarrow fR = kMR \alpha \rightarrow f = kMa \dots (b)$$

Substitusikan **Persamaan (b)** ke dalam **Persamaan (a)**, diperoleh

$$Ma + kMa = Mg \sin \theta \rightarrow a = \frac{g \sin \theta}{k+1}$$

- Untuk silinder dengan $k = \frac{1}{2}$, diperoleh $a = \frac{g \sin \theta}{\frac{1}{2} + 1} = \frac{2}{3} g \sin \theta$

2. Energi dan Usaha dalam Gerak Rotasi

Perhatikanlah roda delman, seperti terlihat pada **Gambar 6.18**. Agar dapat berjalan, roda delman tersebut harus dapat menggelinding di sepanjang jalan yang dilaluinya. Apakah gerak menggelinding itu? Gerak menggelinding adalah perpaduan antara gerak rotasi dengan gerak translasi. Perhatikanlah **Gambar 6.19**. Gerak translasi dicontohkan pada **Gambar 6.19a**. Pada gambar tersebut, gaya F bekerja di pusat massa (PM) roda sehingga roda berpindah atau bertranslasi. Pada **Gambar 6.19b**, gaya F bekerja di jari-jari roda sehingga menyebabkan roda berotasi pada pusat massanya. Jika kedua jenis gerak yang dilakukan pada **Gambar 6.19a** dan **6.19b** disatukan, roda akan menggelinding, seperti yang terlihat pada **Gambar 6.19c**.



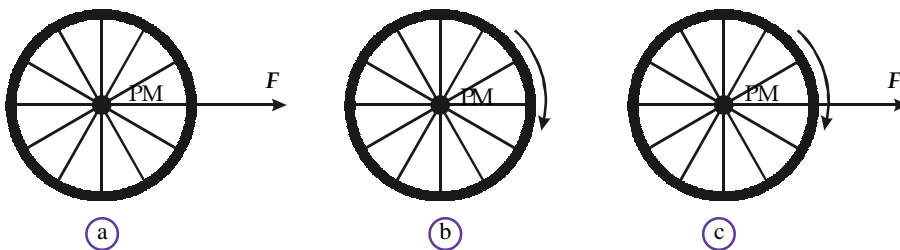
Sumber: mishuna.image.pbse.com

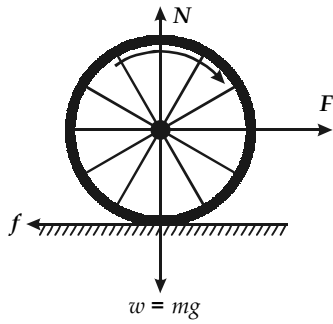
Gambar 6.18

Roda delman yang sedang berjalan merupakan salah satu contoh gerak menggelinding.

Gambar 6.19

- Roda bergerak translasi karena ditarik dengan gaya F yang bekerja pada titik pusat massanya (PM).
- Roda berotasi pada titik pusat massanya (PM).
- Roda menggelinding.





Gambar 6.20

Sebuah bola pejal yang menggelinding tanpa slip pada suatu permukaan datar.

Dalam melakukan gerak menggelinding, dibutuhkan gaya gesek antara benda dengan permukaan. Jika tidak ada gaya gesek maka benda tersebut akan tergelincir atau slip (benda hanya melakukan gerak translasi).

Perhatikanlah **Gambar 6.20**. Dari uraian gaya-gaya yang bekerja pada roda tersebut dapat Anda lihat bahwa gaya normal N , gaya F , dan gaya berat w bekerja pada titik pusat massa roda. Gaya F menyebabkan benda bertranslasi. Gaya gesek f menimbulkan momen gaya pada roda sebesar τ sehingga roda dapat berotasi dan menggelinding tanpa slip. Dapat disimpulkan bahwa gaya gesek yang bekerja pada benda, memegang peranan penting agar benda dapat menggelinding sempurna tanpa slip.

Dalam kehidupan sehari-hari, konsep menggelinding tanpa slip ini dapat Anda temukan pada desain ban kendaraan, misalnya mobil dan motor. Desain permukaan ban kendaraan dirancang sedemikian rupa agar gesekan yang ditimbulkan saat ban bersentuhan dengan jalan, dapat membuat roda menggelinding sempurna tanpa slip.

Kerjakanlah 6.2

Menganalisa Penerapan Konsep Menggelinding Pada Desain Ban

Desain ban suatu kendaraan berbeda-beda, sesuai dengan kebutuhan kendaraan tersebut. Jika Anda perhatikan, ban yang digunakan oleh para pembalap *Formula One* memiliki permukaan yang lebih licin daripada ban mobil biasa, bahkan terkadang tidak bergerigi sama sekali. Menurut Anda, adakah gaya gesek yang ditimbulkan oleh ban mobil balap itu? Apabila dihubungkan dengan konsep menggelinding tanpa slip, apakah fungsi ban seperti yang digunakan oleh para pembalap tersebut? Untuk mendukung jawaban Anda, cobalah Anda cari informasi lebih lanjut mengenai kegunaan desain ban mobil balap dan perbandingannya dengan desain ban mobil biasa di perpustakaan, internet, dan sumber-sumber lainnya. Diskusikan jawaban Anda tersebut bersama dengan teman-teman kelompok Anda serta guru Fisika Anda.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1993



Sumber: *files.turbosquid.com*

Ketika sedang menggelinding, benda memiliki energi kinetik yang terbagi atas dua jenis, yaitu energi kinetik translasi dan energi kinetik rotasi.

Anda telah mengetahui pada benda yang bergerak translasi, energi kinetiknya adalah energi kinetik translasi, yaitu

$$EK_{\text{trans}} = \frac{1}{2}mv^2$$

Sedangkan, pada benda yang berotasi murni, energi kinetiknya adalah energi kinetik rotasi, yaitu

$$EK_{\text{rot}} = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (6-27)$$

Pada benda yang menggelinding, gerak benda merupakan perpaduan antara gerak translasi dan gerak rotasi. Oleh karena itu, energi kinetik yang dimiliki benda adalah energi kinetik total, yaitu

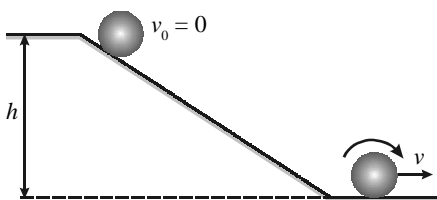
$$EK_{\text{tot}} = EK_{\text{trans}} + EK_{\text{rot}}$$

$$EK_{\text{tot}} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (6-28)$$

Jika resultan momen gaya luar yang bekerja pada benda sama dengan nol (tidak ada momen gaya luar yang bekerja pada benda), pada gerak rotasi tersebut berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik, yang dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta EP = \Delta EK_{\text{trans}} + \Delta EK_{\text{rot}} \quad (6-29)$$

Contoh 6.11



Sebuah benda pejal bermassa M , jari-jari R , dan momen inersia $I = kMR^2$ (k adalah sebuah konstanta) menggelinding menuruni bidang miring, seperti tampak pada gambar.

- Nyatakan kelajuan bola pada saat tiba di dasar bukit.
- Jika benda pejal adalah bola ($k = \frac{2}{5}$), berapakah kelajuan bola di dasar bukit?
- Tentukan juga kelajuannya apabila benda tersebut adalah silinder ($k = \frac{1}{2}$).

Jawab

Diketahui: $m = M$, $r = R$, dan $I = kMR^2$.

- Menurut Hukum Kekekalan Energi Mekanik, berlaku hubungan:

$$EP = EK_{\text{rot}} + EK_{\text{trans}} \rightarrow Mgh = \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}Mv^2$$

$$Mgh = \frac{1}{2}(kMR^2)\omega^2 + \frac{1}{2}Mv^2$$

$$Mgh = \frac{1}{2}kMv^2 + \frac{1}{2}Mv^2$$

$$gh = (k + 1) \frac{1}{2}v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{k+1}}$$

- Untuk bola dengan $k = \frac{2}{5}$ diperoleh besar $v = \sqrt{\frac{2gh}{\frac{2}{5}+1}} \rightarrow v = \sqrt{\frac{10}{7}gh}$
- Untuk silinder dengan $k = \frac{1}{2}$ diperoleh besar $v = \sqrt{\frac{2gh}{\frac{1}{2}+1}} \rightarrow v = \sqrt{\frac{4}{3}gh}$

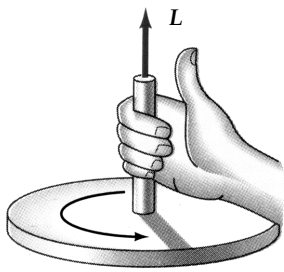
Perlu Anda

Ketahui

Syarat agar suatu roda berjari-jari R dan kelajuan sudut pusat massanya ω dapat menggelinding tanpa slip adalah roda tersebut harus memiliki kecepatan pusat massa $v_{\text{pm}} = R\omega$.



3. Momentum Sudut dan Hukum Kekalan Momentum Sudut



Gambar 6.21

Arah putaran keempat jari menunjukkan arah rotasi, sedangkan ibu jari menunjukkan arah momentum sudut.

Pada Bab 5, Anda telah mempelajari bahwa sebuah benda yang bergerak pada suatu garis lurus, memiliki momentum yang disebut momentum linear. Sekarang, bagaimana dengan benda yang berotasi? Pada benda yang melakukan gerak rotasi juga terdapat momentum yang disebut momentum sudut.

Momentum sudut didefinisikan sebagai perkalian antara momen inersia dan kecepatan sudut. Secara matematis, ditulis sebagai berikut.

$$L = I\omega \quad (6-30)$$

dengan: I = momen inersia (kgm^2),

ω = kecepatan sudut (rad/s), dan

L = momentum sudut (kgm^2/s).

Momentum sudut merupakan besaran vektor karena memiliki besar dan arah. Arah momentum sudut dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.21**.

Apabila jari-jari benda yang melakukan gerak rotasi jauh lebih kecil dibandingkan dengan jarak benda itu terhadap sumbu rotasi r , momentum sudut benda itu dinyatakan sebagai momentum sudut partikel yang secara matematis dituliskan sebagai

$$L = mvr \quad (6-31)$$

Jika momen gaya luar sama dengan nol, berlaku Hukum Kekalan Momentum Sudut, yaitu momentum sudut awal akan sama besar dengan momentum sudut akhir. Secara matematis, pernyataan tersebut ditulis sebagai berikut.

$$L_{\text{awal}} = L_{\text{akhir}}$$

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = I_1\omega_1' + I_2\omega_2' \quad (6-32)$$

Dari **Persamaan (6-32)**, dapat dilihat bahwa apabila I bertambah besar, ω akan semakin kecil. Sebaliknya, apabila ω semakin besar maka I akan mengecil. Prinsip ini diaplikasikan oleh pemain es skating dalam melakukan putaran (*spinning*). Saat akan memulai putaran badan, pemain es skating merentangkan lengannya (momen inersia pemain akan semakin besar karena jarak lengan dengan badan bertambah). Kemudian, ia merapatkan kedua lengannya ke arah badan agar momen inersianya mengecil sehingga putaran badannya akan semakin cepat (kecepatan sudutnya membesar).

Contoh 6.12

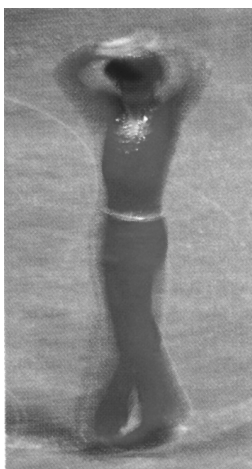
Diketahui sebuah piringan hitam bermassa m dan berjari-jari R . Piringan hitam ini diletakkan di atas sebuah meja putar dengan jari-jari R dan massa M yang sedang berputar dengan kecepatan sudut ω . Meja putar ini dapat berputar dengan bebas tanpa ada momen gaya luar yang bekerja padanya. Jika piringan hitam dan meja putar dapat dianggap sebagai silinder homogen, berapakah kecepatan sudut akhir sistem?

Jawab

Diketahui: $m_{\text{meja}} = M$, $r_{\text{meja}} = R$, $\omega_{\text{meja}} = \omega$, $m_{\text{piringan}} = m$, dan $r_{\text{piringan}} = R$.

Gunakan Hukum Kekalan Momentum Sudut, yaitu (momentum sudut awal = momentum sudut akhir)

$$L_{\text{meja}} = L_{\text{meja}} + L_{\text{piringan}} \rightarrow I_m\omega = I_m\omega^2 + I_p\omega^2$$



Sumber: Jendela Iptek, 1997

Gambar 6.23

Putaran badan (ω) dari pemain es skating ini bertambah cepat saat ia merapatkan kedua tangannya ke arah badan.

$$\left(\frac{1}{2}MR^2\right)\omega = \left(\frac{1}{2}MR^2 + \frac{1}{2}mR^2\right)\omega'$$

$$M\omega = (M + m)\omega'$$

$$\omega' = \frac{M}{M + m}\omega$$

Kecepatan sudut akhir sistem adalah $\omega' = \frac{M}{M + m}\omega$.

Kata Kunci

- Dinamika rotasi
- Momentum sudut
- Hukum kekentalan momentum sudut

Soal Penguasaan Materi 6.2

Kerjakanlah dalam buku latihan Anda.

1. Suatu roda yang berbentuk cakram homogen berjari-jari 50 cm dan massanya 300 kg. Pada saat berputar, roda tersebut memiliki momen gaya sebesar 375 Nm. Tentukan percepatan angular cakram tersebut.
2. Suatu roda berputar dari 20 rad/s menjadi 60 rad/s karena mendapat momen gaya tetap. Jika momen kelembaman roda 4 kgm², tentukan momen gaya tersebut setelah berputar 100 rad.
3. Suatu bola pejal diameternya 40 cm dan berotasi dengan poros yang melalui pusat bola. Persamaan kecepatan sudut bola adalah $\omega = (10 + 25t)$ rad/s dengan t dalam sekon. Jika massa bola 4 kg, tentukanlah momen gaya yang bekerja pada bola.
4. Sebuah bola pejal yang bermassa m dan lantai yang berjari-jari R menggelinding pada permukaan datar dengan kecepatan v . Tentukan nilai perbandingan energi kinetik translasi dan energi kinetik rotasi bola.
5. Sebuah roda dengan momen inersia 0,5 kg m² berputar dengan kecepatan sudut 10 rad/s. Roda tersebut diberi gaya tangensial sehingga momen gaya yang timbul sebesar 50 Nm dan arahnya berlawanan dengan arah putaran roda. Tentukan sudut yang ditempuh roda semenjak gaya mulai diberikan hingga berhenti.

D Keseimbangan Benda Tegar

1. Syarat Keseimbangan

Menurut Hukum Pertama Newton, apabila resultan gaya-gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol, percepatan benda tersebut juga akan sama dengan nol. Dalam hal ini, dapat diartikan bahwa benda berada dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan tetap. Kondisi ini berlaku untuk gerak translasi dan gerak rotasi. Apabila pada benda berlaku hubungan $\sum F = 0$ dan $\sum \tau = 0$ ($a = 0$ dan $\alpha = 0$) maka dikatakan benda tersebut dalam keadaan setimbang.

Benda yang berada dalam keadaan setimbang tidak harus diam, akan tetapi harus memiliki nilai percepatan linier $a = 0$ (untuk gerak translasi) dan percepatan sudut $\alpha = 0$ (untuk gerak rotasi). Sebaliknya, benda yang diam pasti berada dalam keadaan setimbang. Dengan demikian, keadaan setimbang itu terdapat dua macam, yaitu

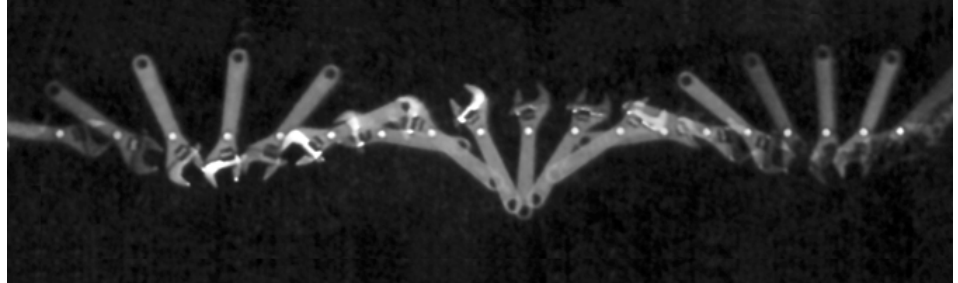
- a. Setimbang statik (benda diam).
 $v = 0$ dan $\omega = 0$
 $\sum F = 0$ dan $\sum \tau = 0$
- b. Setimbang mekanik (benda bergerak translasi atau rotasi).
 - a. Setimbang translasi \rightarrow benda bertranslasi dengan v konstan.
 - b. Setimbang rotasi (untuk benda tegar) \rightarrow benda berotasi dengan ω konstan.



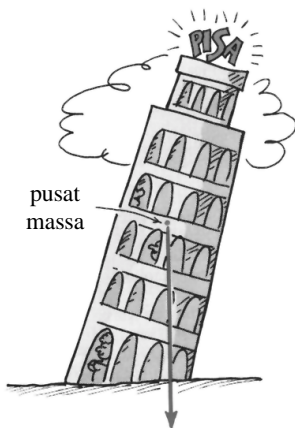
2. Pusat Massa dan Titik Berat Benda

Benda tegar yang melakukan gerak rotasi, memiliki pusat massa yang tidak melakukan gerak translasi ($v = 0$). Berbeda dengan sebuah partikel yang bergerak melingkar beraturan, partikel tersebut memiliki pusat massa yang melakukan gerak translasi ($v \neq 0$) dengan arah yang selalu berubah karena adanya percepatan sentripetal, a_s di mana $F \neq 0$. Perhatikanlah **Gambar 6.24** berikut.

Gambar 6.24
Pusat massa sebuah kunci Inggris yang sedang berputar berada dalam satu garis lurus. Pusat massa ini bertranslasi dengan arah yang selalu berubah.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1993



Sumber: *Conceptual Physics*, 1993

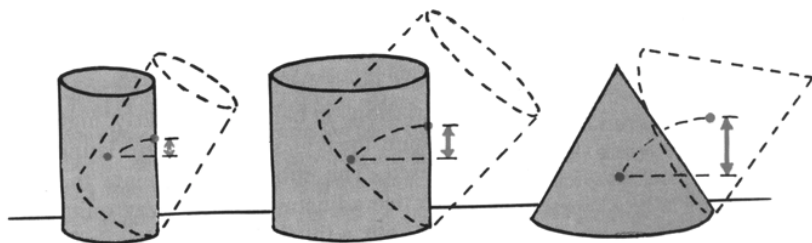
Gambar 6.25
Letak titik pusat massa menara Pisa masih berada di dalam alasnya sehingga menara tetap dalam keadaan stabil.

Letak pusat massa suatu benda menentukan kestabilan (kesetimbangan) benda tersebut. Jika dari titik pusat massa benda ditarik garis lurus ke bawah dan garis tersebut jatuh pada bagian alas benda, dikatakan benda berada dalam keadaan setimbang stabil. Namun, apabila garis lurus yang ditarik dari titik pusat massa jatuh di luar alas benda maka benda dikatakan tidak stabil.

Menara Pisa yang miring masih tetap dapat berdiri selama berabad-abad. Mengapa menara tersebut tidak jatuh? Dari ilustrasi **Gambar 6.25**, dapat dilihat bahwa garis yang ditarik dari pusat massa menara masih jatuh pada alasnya sehingga menara berada dalam keadaan stabil (setimbang).

Agar tidak mudah terguling, benda dirancang dengan dasar (alas) yang lebar dan titik pusat massa yang rendah. Perhatikan **Gambar 6.26** berikut.

Gambar 6.26
Benda berbentuk kerucut merupakan benda yang paling stabil dibandingkan dengan ketiga benda lainnya.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1993

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin lebar alas suatu benda, gaya yang dibutuhkan untuk menggulingkannya akan semakin besar karena jarak yang dibutuhkan untuk menaikkan titik pusat massa benda (ditandai tanda panah) sehingga benda dapat digulingkan juga besar.

Titik berat benda adalah titik tangkap gaya berat suatu benda, di mana titik tersebut dipengaruhi oleh medan gravitasi. Penentuan letak titik berat ini dapat dilakukan dengan mudah apabila benda bersifat homogen dan beraturan (seperti kubus, bola, dan silinder). Apabila benda tidak homogen atau tidak beraturan, penentuan titik beratnya adalah sebagai berikut.

Aggaplah benda berupa kumpulan titik-titik massa, yaitu $m_1, m_2, m_3,$ dan seterusnya yang terletak pada koordinat $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3),$ dan seterusnya. Titik berat benda terhadap sumbu- x adalah

$$(m_1 + m_2 + m_3 + \dots) gx_0 = m_1 gx_1 + m_2 gx_2 + m_3 gx_3 + \dots$$

Titik berat benda terhadap sumbu- y adalah

$$(m_1 + m_2 + m_3 + \dots) gy_0 = m_1 gy_1 + m_2 gy_2 + m_3 gy_3 + \dots$$

maka momen gaya berat benda terhadap sumbu- x adalah

$$x_0 = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots}$$

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

Untuk sumbu- y , momen gaya berat benda tersebut adalah

$$y_0 = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

Mahir Meneliti

Menentukan Titik Berat Benda Tidak Beraturan

Alat dan Bahan

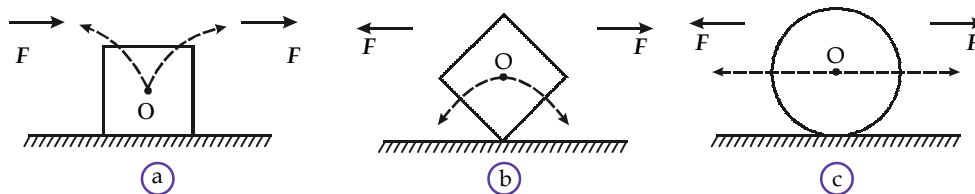
1. Sepotong karton dengan bentuk sembarang
2. Seutas tali dengan pemberat di ujungnya
3. Statif

Prosedur

1. Buatlah tiga lubang pada potongan karton (letak lubang sembarang) dan berilah nomor lubang 1, lubang 2, dan lubang 3.
2. Gantungkan karton itu pada lubang 1 dengan menggunakan statif seperti terlihat pada gambar.
3. Gantungkanlah tali yang memiliki pemberat pada statif. Pastikan tali dan pemberatnya dapat menggantung secara bebas dan tidak terhalang.
4. Setelah karton dan tali berada dalam keadaan setimbang, buatlah garis putus-putus yang berasal dari lubang 1 dan berimpit dengan tali. Kemudian, namai garis itu sebagai garis l_1 .
5. Lakukanlah langkah ke-2 sampai dengan ke-4 pada lubang 2 dan lubang 3.
6. Apakah kesimpulan yang Anda dapatkan dari kegiatan tersebut?
7. Diskusikan dan komunikasikanlah kesimpulan tersebut dengan teman-teman dan guru Fisika Anda.

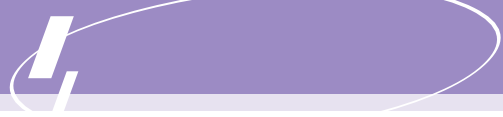


Perhatikanlah gambar tiga jenis kesetimbangan statis benda tegar, yaitu kesetimbangan stabil, labil, dan netral pada **Gambar 6.27** berikut.



Gambar 6.27

- (a) Benda setimbang stabil (mantap).
- (b) Benda setimbang labil (goyang).
- (c) Benda setimbang netral (*indifferent*/sembarang).



Jelajah Fisika

Menara Derek



Sumber: *iloveoregon.com*

Di kapal dan galangan kapal terdapat derek kapal, yaitu sebuah derek statis yang dioperasikan dengan kabel yang dihubungkan pada sebuah menara. Menara derek juga dapat dijumpai pada pembangunan gedung-gedung. Menara derek ini harus selalu berada dalam keadaan setimbang agar tidak timbul total momen gaya yang akan merobohkan menara derek tersebut.

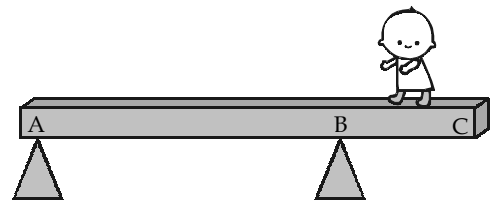
Salah satu derek yang terkenal adalah derek Gottwald MK 1000 yang diberi julukan "Birdie One" karena menara derek tersebut pernah mengangkat beban yang sangat berat, yaitu menempatkan reaktor berkapasitas 742 ton di kilang minyak Selandia Baru.

Sumber: *Oxford Encyclopedia, 1995*

- Kesetimbangan stabil (mantap), ialah jenis kesetimbangan benda di mana apabila benda diberi gangguan (gaya luar) maka benda akan bergerak. Kemudian, apabila gangguan gaya luar tersebut dihilangkan maka benda akan diam dan kembali pada kedudukannya semula. Perhatikanlah **Gambar 6.27a**. Titik berat benda akan naik, jika benda hendak menggelinding karena gaya F . Kedudukan benda setelah digelindingkan akan tetap.
- Kesetimbangan labil (goyah), ialah jenis kesetimbangan benda dimana benda tidak dapat kembali ke kedudukannya semula apabila gaya luar (gangguan) yang diberikan padanya dihilangkan. Perhatikanlah **Gambar 6.27b**. Titik berat benda O turun, apabila benda hendak menggelinding karena gaya F . Kedudukan benda sebelum dan sesudah digelindingkan berubah.
- Kesetimbangan netral (*indifferent*/sembarang), ialah jenis kesetimbangan benda di mana apabila benda diberi gangguan, benda akan bergerak. Kemudian, apabila gangguan dihilangkan, benda akan kembali diam pada posisinya yang baru. Perhatikanlah **Gambar 6.27c**. Titik berat benda, O , tidak naik maupun turun apabila benda menggelinding. Setelah menggelinding, benda kembali setimbang di posisinya yang baru.

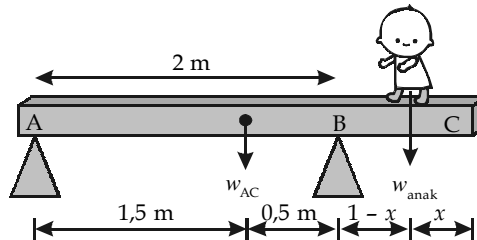
Contoh 6.13

Batang AC bermassa 40 kg dan panjangnya 3 m . Jarak tumpuan A dan B adalah 2 m (di B papan dapat berputar) seorang anak bermassa 25 kg berjalan dari A menuju C . Berapa jarak minimum anak dari titik C agar papan tetap setimbang (ujung batang A hampir terangkat)?



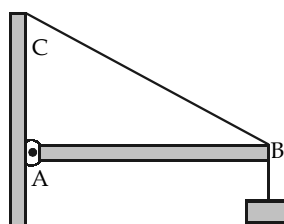
Jawab

Diketahui: $m_{\text{anak}} = 25\text{ kg}$, $m_{AC} = 40\text{ kg}$, $AC = 3\text{ m}$, dan $AB = 2\text{ m}$.



$$\begin{aligned} \sum \tau &= 0 \\ w_{AC} (0,5\text{ m}) &= w_{\text{anak}} (1 - x) \\ (400\text{ N}) (0,5\text{ m}) &= (250\text{ N})(1 - x) \\ 200\text{ Nm} &= (250\text{ N}) - (250x\text{ Nm}) \\ 250x\text{ Nm} &= 50\text{ N} \\ x &= 0,2\text{ m} \end{aligned}$$

Contoh 6.14



Pada sistem kesetimbangan benda tegar seperti pada gambar di samping, batang AB homogen dengan panjang 80 cm , beratnya 18 N , menyangga beban seberat 30 N , BC adalah tali.

- Berapakah tegangan pada tali (dalam newton) jika jarak $AC = 60\text{ cm}$?
- Tentukanlah besar gaya reaksi dinding terhadap batang di titik A ?

Jawab

Diketahui: $AB = 80 \text{ cm}$, $w_{AB} = 18 \text{ N}$, dan $w_{\text{beban}} = 30 \text{ N}$.

a. Perhatikan diagram gaya yang bekerja pada batang. Oleh karena $AB = 80 \text{ cm}$ dan $AC = 60 \text{ cm}$ maka $BC = \sqrt{(80 \text{ cm})^2 + (60 \text{ cm})^2} = 100 \text{ cm}$, $\sin \alpha = 0,6$ atau $\alpha = 37^\circ$.

Berdasarkan syarat kesetimbangan gaya pada titik A, diperoleh:

$$\sum \tau_A = 0$$

$$T(AD) + F_A(0) + (18 \text{ N})\left(\frac{1}{2} AB\right) + (30 \text{ N})(AB) = 0$$

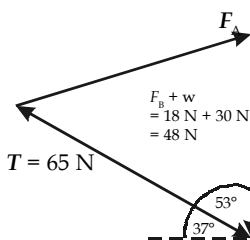
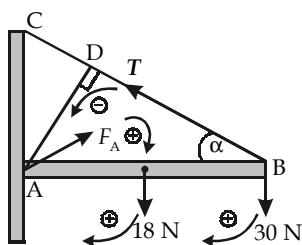
$$T(AB \sin 37^\circ) + 0 + (9 \text{ N})(AB) + (30 \text{ N})(AB) = 0$$

$$39 \text{ N} = 0,6T \text{ atau } T = 65 \text{ N}$$

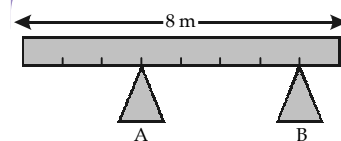
b. Gaya reaksi F_A dihitung dengan menggunakan metoda segitiga.

$$F_A = \sqrt{(48 \text{ N})^2 + (65 \text{ N})^2} - 2(48 \text{ N})(65 \text{ N}) \cos 53^\circ$$

$$F_A = \sqrt{2785 \text{ N}^2} = 52,78 \text{ N}$$



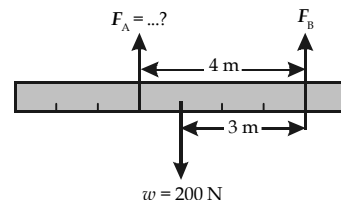
Solusi Cerdas



Balok kayu seragam di atas sepanjang 8 m dan berat 200 N berada di atas dua buah tiang penyangga A dan B. Besar beban yang dirasakan oleh titik A (dalam N) adalah

- a. 60
- b. 90
- c. 120
- d. 150
- e. 180

Penyelesaian



$$\sum \tau_B = 0$$

$$w(3 \text{ m}) - F_A(4 \text{ m}) = 0$$

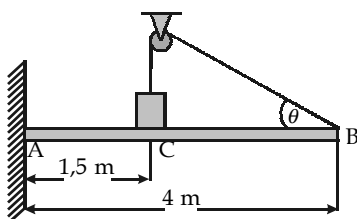
$$(200 \text{ N})(3 \text{ m}) - F_A(4 \text{ m}) = 0$$

$$F_A = 150 \text{ N}$$

Jawab: d

Soal UM-UGM 2003

Contoh 6.15



Sistem terlihat pada gambar. Massa batang homogen AB adalah 50 kg dan massa bebannya 150 kg. Ujung A diengselkan ke tembok, sedangkan beban dihubungkan ke ujung B dengan seutas tali melalui sebuah katrol. Massa tali dan gesekan pada katrol diabaikan,

$g = 10 \text{ m/s}^2$, dan $\sin \theta = \frac{7}{16}$.

- a. Gambarkanlah diagram gaya-gaya yang bekerja pada batang AB dan pada beban, serta hitunglah tegangan talinya.
- b. Berapakah besar gaya engsel di titik A?

Jawab

Diketahui: $m_1 = 150 \text{ kg}$, $m_2 = 50 \text{ kg}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $AC = 1,5 \text{ m}$, $AB = 4 \text{ m}$, dan $\sin \theta = \frac{7}{16}$.

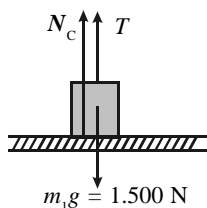
a. Gaya pada beban N_C adalah gaya normal dari batang pada beban. Dalam keadaan setimbang berlaku:

$$\sum F_v = 0$$

$$T + N_C = m_1 g$$

$$T + N_C = 1.500 \text{ N}$$

$$N_C = 1.500 \text{ N} - T \dots\dots\dots (a)$$



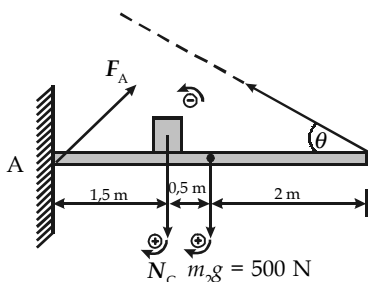
Perhatikanlah diagram gaya pada batang. Gaya reaksi beban terhadap batang adalah N_C' (bukan $m_1 g$) dengan $N_C' = N_C$ (pasangan gaya aksi-reaksi).

Gunakan syarat kesetimbangan batang pada titik A.

$$\sum \tau_A = 0$$

$$N_C' (AC) + m_2 g (CB) = T \sin \theta (AC)$$

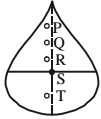
$$N_C' (1,5 \text{ m}) + m_2 g (2 \text{ m}) = T \sin \theta (4 \text{ m}) \dots\dots\dots (b)$$



Solusi Cerdas

Benda bidang tersebut dilubangi di lima titik. Kemudian, benda digantungkan pada paku di dinding. Benda tersebut akan mencapai keseimbangan indeferen apabila titik berat berada di titik

- P
- Q
- R
- S
- T



Penyelesaian

Apabila benda berada dalam keseimbangan indeferen (netral), pusat gravitasi benda tetap walaupun benda diberi gaya horizontal. Jadi, pada kasus tersebut benda akan setimbang netral jika pusat massanya di titik R. (Posisi R tetap walaupun benda diputar)

Jawab: c

Soal UAN Fisika SMA 2002/2003

Substitusikan **Persamaan (a)** pada **Persamaan (b)** sehingga diperoleh

$$(1.500 \text{ N} - T)(1,5 \text{ m}) + (500 \text{ N})(2 \text{ m}) = T\left(\frac{7}{16}\right)(4 \text{ m})$$

$$2.250 \text{ Nm} - 1,5 T \text{ m} + 1.000 \text{ Nm} = \frac{7}{4} T \text{ m}$$

$$9.000 \text{ Nm} - 6 T \text{ m} + 4.000 \text{ Nm} = 7 T \text{ m}$$

$$13 T \text{ m} = 13.000 \text{ Nm} \rightarrow T = 1.000 \text{ N.}$$

- b. Gunakan metoda segitiga untuk menghitung gaya engsel F_A .

$$\sin \theta = \frac{7}{16} \text{ atau } \theta = 25,94^\circ$$

$$\rightarrow \alpha = 90 - 25,94 = 64,06^\circ$$

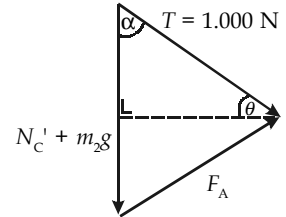
Karena $N_C' = 1.500 \text{ N} - T$,
maka $N_C' = 1.500 \text{ N} - 1.000 \text{ N} = 500 \text{ N}$

$$F_A = \sqrt{(N_C' + m_2g)^2 + T^2 + 2(N_C' + m_2g)(T)\cos \alpha}$$

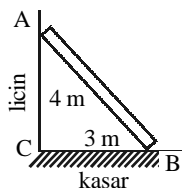
Oleh karena $N_C' + m_2g = 500 \text{ N} + 500 \text{ N} = 1.000 \text{ N}$ maka

$$F_A = \sqrt{(1.000 \text{ N})^2 + (1.000 \text{ N})^2 - 2(1.000 \text{ N})(1.000 \text{ N})\cos(64,06^\circ)}$$

$$F_A = \sqrt{2.000.000 \text{ N}^2 - 874.859,38 \text{ N}^2} = 1.060,73 \text{ N.}$$



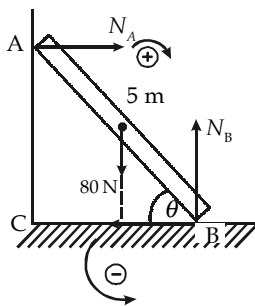
Contoh 6.16



Sebuah tangga homogen AB yang panjangnya 5 m dan massanya 8 kg disandarkan pada dinding vertikal yang licin. Ujung A bersandar pada dinding, sedangkan ujung B terletak di lantai kasar yang berjarak 3 m dari dinding. Tentukan koefisien gesek antara lantai dan ujung B , agar batang setimbang tepat akan bergerak. (percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$)

Jawab

Diketahui: $AB = 5 \text{ m}$, $m_{AB} = 8 \text{ kg} = 80 \text{ N}$, $BC = 3 \text{ m}$, $AC = 4 \text{ m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Perhatikanlah diagram gaya pada balok.



$$\bullet \quad \sum \tau_B = 0$$

$$N_A(AC) - W_{AB} \left(\frac{1}{2}CB\right) = 0$$

$$N_A(AC) - 80 \left(\frac{1}{2}CB\right) = 0$$

$$N_A(4 \text{ m}) - (40 \text{ N})(3 \text{ m}) = 0 \rightarrow N_A = 30 \text{ N}$$

$$\bullet \quad \sum F_y = 0 \rightarrow N_B = 80 \text{ N}$$

$$\bullet \quad \sum F_x = 0 \rightarrow f_B = N_A \text{ atau } \mu N_B = N_A$$

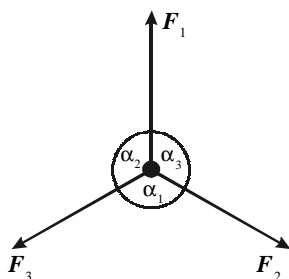
$$\mu (80 \text{ N}) = 30 \text{ N} \rightarrow \mu = \frac{3}{8}$$

3. Kesetimbangan Tiga Gaya

Apabila terdapat tiga gaya yang bekerja pada satu titik partikel dan partikel tersebut berada dalam keadaan setimbang, seperti pada **Gambar 6.28**, berlaku hubungan sebagai berikut.

$$\frac{F_1}{\sin \alpha_1} = \frac{F_2}{\sin \alpha_2} = \frac{F_3}{\sin \alpha_3} \quad (6-33)$$

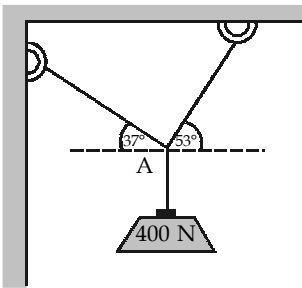
dengan α_1 , α_2 , dan α_3 merupakan sudut apit antara dua gaya yang berdekatan.



Gambar 6.28

Gaya F_1 , F_2 , dan F_3 bekerja pada titik partikel dengan sudut masing-masing

Contoh 6.17

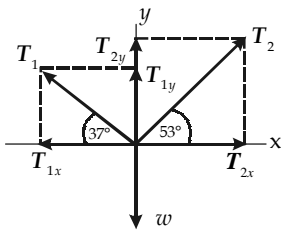


Benda pada gambar memiliki berat 400 N dan digantung dalam keadaan diam. Tentukanlah besar tegangan-tegangan yang terjadi pada kedua tali yang menahan benda.

(Ingat, tegangan adalah gaya yang terdapat pada seutas tali yang menarik suatu benda).

Jawab

Diketahui: $w = 400 \text{ N}$, $\theta_1 = 37^\circ$, dan $\theta_2 = 53^\circ$



Cara umum:

Perhatikan diagram uraian gaya yang bekerja pada titik A. Gaya T_1 dan T_2 menghasilkan komponen-komponen gaya menurut sumbu- x dan sumbu- y yang diproyeksikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_{1x} &= T_1 \cos 37^\circ = T_1 (0,8) = 0,8 T_1 \\ T_{1y} &= T_1 \sin 37^\circ = T_1 (0,6) = 0,6 T_1 \\ T_{2x} &= T_2 \cos 53^\circ = T_2 (0,6) = 0,6 T_2 \\ T_{2y} &= T_2 \sin 53^\circ = T_2 (0,8) = 0,8 T_2 \end{aligned}$$

Terapkan syarat kesetimbangan sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 &\rightarrow T_{2x} - T_{1x} = 0 \text{ atau } 0,6 T_2 - 0,8 T_1 = 0 \\ &-0,8 T_1 + 0,6 T_2 = 0 \dots (a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\rightarrow T_{1y} + T_{2y} - w = 0 \text{ atau } 0,6 T_1 + 0,8 T_2 - 400 = 0 \\ &0,6 T_1 + 0,8 T_2 = 400 \text{ N} \dots (b) \end{aligned}$$

Dari **Persamaan (a)** dan **Persamaan(b)**, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{array}{l} -0,8 T_1 + 0,6 T_2 = 0 \quad | \times 0,6 \\ 0,6 T_1 + 0,8 T_2 = 400 \text{ N} \quad | \times 0,8 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} -0,48 T_1 + 0,36 T_2 = 0 \\ 0,48 T_1 + 0,64 T_2 = 320 \text{ N} \\ \hline 1,00 T_2 = 320 \text{ N} \\ T_2 = 320 \text{ N} \end{array}$$

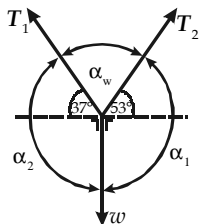
Masukkan nilai T_2 ke dalam **Persamaan (b)** maka T_1 dapat dihitung.

$$\begin{aligned} 0,6 T_1 + 0,8(320 \text{ N}) &= 400 \text{ N} \\ 0,6 T_1 + 256 \text{ N} &= 400 \text{ N} \\ 0,6 T_1 &= 400 \text{ N} - 256 \text{ N} \end{aligned}$$

$$T_1 = \frac{144 \text{ N}}{0,6} = 240 \text{ N}$$

Cara perbandingan sinus:

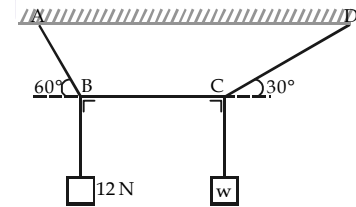
Menurut kesetimbangan tiga gaya, diperoleh



$$\frac{T_1}{\sin \alpha_1} = \frac{T_2}{\sin \alpha_2} = \frac{w}{\sin \alpha_w} \rightarrow \frac{T_1}{\sin 143^\circ} = \frac{T_2}{\sin 127^\circ} = \frac{w}{\sin 90^\circ}$$

$$\frac{T_1}{0,6} = \frac{T_2}{0,8} = \frac{400}{1} = 400 \rightarrow T_1 = 240 \text{ N dan } T_2 = 320 \text{ N.}$$

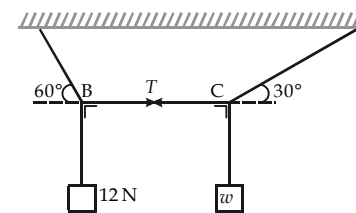
Solusi Cerdas



Seutas tali ABCD digantungkan pada titik A dan D. Pada titik B digantungkan beban seberat w . Tentukanlah besar w agar sistem dalam kesetimbangan

- 4 N
- 8 N
- 12 N
- 16 N
- 20 N

Penyelesaian



• Lihat titik B.

$$\frac{T}{\sin(90+60)} = \frac{12}{\sin(90+30)^\circ}$$

$$\frac{T}{\frac{1}{2}} = \frac{12}{\frac{1}{2}\sqrt{3}} \rightarrow T = 4\sqrt{3} \text{ N}$$

• Lihat titik C

$$\frac{T}{\sin(90+30)^\circ} = \frac{12}{\sin(90+60)}$$

$$\frac{4\sqrt{3}}{\frac{1}{2}} = \frac{w}{\frac{1}{2}} \rightarrow w = 4 \text{ N}$$

Jawab: a

Soal UM-UGM 2003



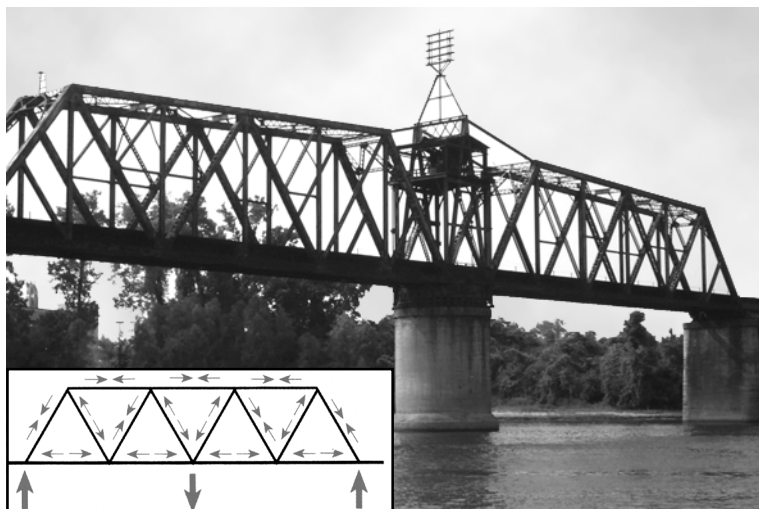
4. Kesetimbangan Gaya pada Jembatan

Kesetimbangan statis banyak diaplikasikan dalam bidang teknik, khususnya yang berhubungan dengan desain struktur jembatan. Anda mungkin sering melewati jembatan untuk menyeberangi sungai atau jalan. Menurut Anda, bagaimanakah kesetimbangan statis suatu jembatan jika dijelaskan secara Fisika?

Suatu jembatan sederhana dapat dibuat dari batang pohon atau lempengan batu yang disangga di kedua ujungnya. Sebuah jembatan, walaupun hanya berupa jembatan sederhana, harus cukup kuat menahan berat jembatan itu sendiri, kendaraan, dan orang yang menggunakannya. Jembatan juga harus tahan terhadap pengaruh kondisi lingkungan. Seiring dengan perkembangan jaman dan kemajuan teknologi, dibuatlah jembatan-jembatan yang desain dan konstruksinya lebih panjang dan indah, serta terbuat dari material yang lebih kuat dan ringan, seperti baja. Secara umum, terdapat tiga jenis konstruksi jembatan. Marilah pelajari pembahasan kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja pada setiap jenis jembatan berikut.

- a. Jembatan kantilever adalah jembatan panjang yang mirip dengan jembatan sederhana yang terbuat dari batang pohon atau lempengan batu, tetapi penyangganya berada di tengah. Pada bagian-bagiannya terdapat kerangka keras dan kaku (terbuat dari besi atau baja). Bagian-bagian kerangka pada jembatan kantilever ini meneruskan beban yang ditanggungnya ke ujung penyangga jembatan melalui kombinasi antara tegangan dan regangan. Tegangan timbul akibat adanya pasangan gaya yang arahnya menuju satu sama lain, sedangkan regangan ditimbulkan oleh pasangan gaya yang arahnya saling berlawanan.

Perhatikanlah **Gambar 6.29**. Kombinasi antara pasangan gaya yang berupa regangan dan tegangan, menyebabkan setiap bagian jembatan yang berbentuk segitiga membagi berat beban jembatan secara sama rata sehingga meningkatkan perbandingan antara kekuatan terhadap berat jembatan. Pada umumnya, jembatan kantilever digunakan sebagai penghubung jalan yang jaraknya tidak terlalu jauh, karena jembatan jenis ini hanya cocok untuk rentang jarak 200 m sampai dengan 400 m.



Gambar 6.29

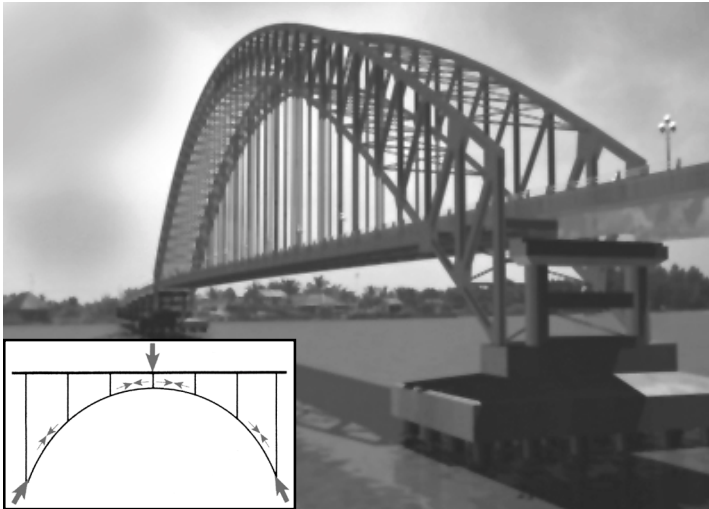
Jembatan kantilever ini banyak digunakan di Indonesia untuk menghubungkan wilayah antardaerah.

Sumber: anitasfocus.smugmug.com

- b. Jembatan lengkung adalah jembatan yang konstruksinya berbentuk busur setengah lingkaran dan memiliki struktur ringan dan terbuka. Rentang maksimum yang dapat dicapai oleh jembatan ini adalah sekitar 900 m. Pada jembatan lengkung ini, berat jembatan serta beban yang ditanggung



oleh jembatan (dari kendaraan dan orang yang melaluinya) merupakan gaya-gaya yang saling berpasangan membentuk tekanan. Oleh karena itu, selain menggunakan baja, jembatan jenis ini dapat menggunakan batuan-batuan sebagai material pembangunnya. Perhatikanlah **Gambar 6.30**. Desain busur jembatan menghasilkan sebuah gaya yang mengarah ke dalam dan ke luar pada dasar lengkungan busur.



Sumber: www.pu.go.id

Kata Kunci

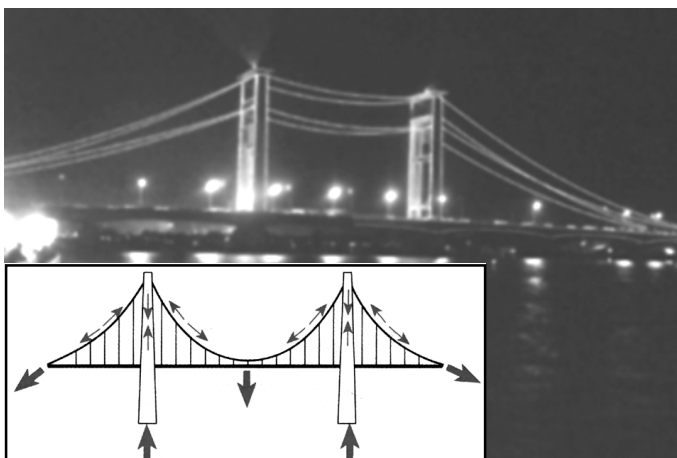
- Titik berat
- Kesetimbangan
- Kesetimbangan tiga gaya

Gambar 6.30

Salah satu contoh jembatan lengkung adalah jembatan Rumpyang yang terdapat di Kalimantan Selatan.

- c. Jembatan gantung adalah jenis konstruksi jembatan yang menggunakan kabel-kabel baja sebagai penggantungnya, dan terentang di antara menara-menara. Setiap ujung kabel-kabel penggantung tersebut ditanamkan pada jangkar yang tertanam di pinggiran pantai.

Perhatikanlah **Gambar 6.31**. Jembatan gantung menyangga bebannya dengan cara menyalurkan beban tersebut (dalam bentuk tekanan oleh gaya-gaya) melalui kabel-kabel baja menuju menara penyangga. Kemudian, gaya tekan tersebut diteruskan oleh menara penyangga ke tanah. Jembatan gantung ini memiliki perbandingan antara kekuatan terhadap berat jembatan yang paling besar, jika dibandingkan dengan jenis jembatan lainnya. Oleh karena itu, jembatan gantung dapat dibuat lebih panjang, seperti Jembatan Akashi-Kaikyo di Jepang yang memiliki panjang rentang antarmenara 1780 m.



Sumber: www.indomedia.com

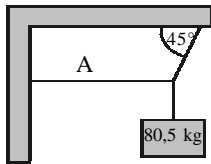
Gambar 6.31

Jembatan Ampera yang terdapat di Sumatra Selatan ini menggunakan konstruksi jembatan gantung dengan dua menara.

Soal Penguasaan Materi 6.3

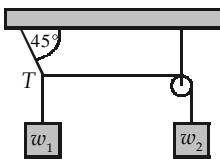
Kerjakanlah dalam buku latihan.

1.



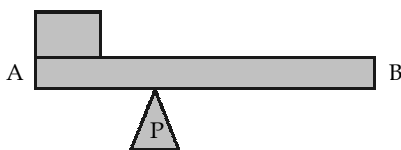
Sebuah balok bermassa 80,5 kg tergantung pada dua utas tali yang bersambungan seperti terlihat pada gambar. Jika percepatan gravitasi Bumi $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan besarnya tegangan pada tali horizontal A.

2.



Jika gesekan katrol diabaikan dan besar tegangan tali $T = 10 \text{ newton}$, tentukan w_1 dan w_2 .

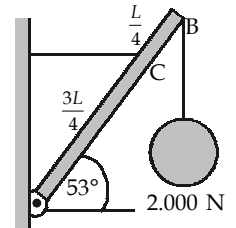
3.



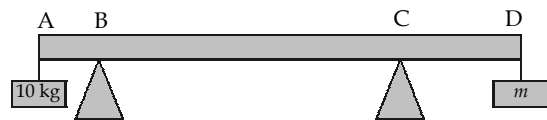
Pada gambar tersebut, batang AB yang homogen dengan sebuah beban di ujung A, seluruhnya dalam keadaan setimbang di atas penumpu P. Diketahui

untuk 1 m panjang AB massanya 1 kg. Jika massa beban A = 2 kg dan terletak 1 meter dari P, tentukanlah panjang PB.

4. Batang AB beratnya 400 N dan engselnya ditempatkan di A. Di titik C, batang AB itu diikatkan pada tembok dengan seutas tali yang massanya diabaikan. Jika sistem setimbang, hitunglah
- tegangan tali;
 - besar gaya engsel, jika diketahui $\sin 53^\circ = 0,8$.

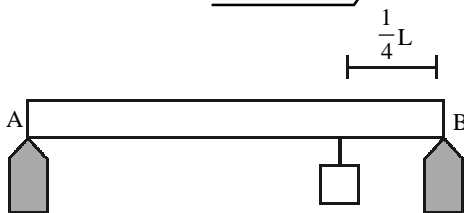


5.



Batang homogen AD panjangnya 8 m dan massanya 80 kg, seperti terlihat pada gambar sedemikian hingga $AB = 1 \text{ m}$ dan $BC = 5 \text{ m}$. Berapa besar massa m maksimum yang masih dapat digantungkan pada D agar batang AD masih tetap dalam keadaan setimbang?

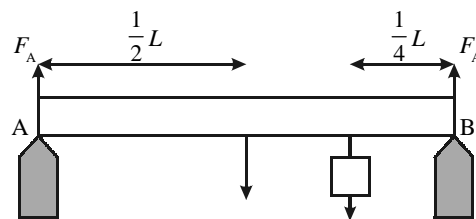
Pembahasan Soal SPMB



Pada batang homogen seberat 200 N digantungkan beban 440 N dengan panjang L (lihat gambar). Besar gaya yang dilakukan penyangga pada batang adalah

- $F_A = 210 \text{ N}$; $F_B = 330 \text{ N}$
- $F_A = 430 \text{ N}$; $F_B = 210 \text{ N}$
- $F_A = 200 \text{ N}$; $F_B = 440 \text{ N}$
- $F_A = 210 \text{ N}$; $F_B = 430 \text{ N}$
- $F_A = 440 \text{ N}$; $F_B = 200 \text{ N}$

Jawab:



Syarat kesetimbangan di titik A adalah $\Sigma \tau_A = 0$.

$$F_A L = 200 \text{ N} \left(\frac{1}{2} L \right) + 440 \text{ N} \left(\frac{1}{4} L \right)$$

$$F_A = 100 \text{ N} + 110 \text{ N}$$

$$F_A = 210 \text{ N}$$

Syarat kesetimbangan di titik B adalah $\Sigma \tau_B = 0$.

$$F_B L = 200 \text{ N} \left(\frac{1}{2} L \right) + 440 \text{ N} \left(\frac{3}{4} L \right)$$

$$F_B = 100 \text{ N} + 330 \text{ N}$$

$$F_B = 430 \text{ N}$$

Jawab: d

Soal Fisika UMPTN'89 Rayon C

Rangkuman

1. **Momen gaya** adalah penyebab terjadinya gerak rotasi.

$$\tau = r \times F$$

2. **Momen inersia** adalah ukuran kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan keadaannya terhadap gerak rotasi.

3. Momen inersia partikel, $I = mr^2$.

4. Momen inersia kumpulan partikel, $I = \sum mr^2$.

5. Momen inersia benda tegar, $I = \int r^2 dm$.

6. Momen inersia benda yang sumbu-nya dipindahkan paralel terhadap sumbu yang melalui pusat massa benda, $I = I_{PM} + md^2$

7. **Momentum sudut** adalah hasil perkalian antara momentum linear benda dengan jarak terhadap sumbu rotasinya.

$$L = r \times p$$

8. Besarnya momentum sudut dirumuskan sebagai

$$L = I\omega$$

9. Hukum Kekekalan Momentum Sudut.

$$L_1 = L_2 \rightarrow I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$$

10. Energi kinetik gerak rotasi.

$$EK_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

11. Energi kinetik total (pada benda menggelinding)

$$EK_{tot} = EK_{trans} + EK_{rot}$$

$$EK_{tot} = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

12. **Kopel** dirumuskan sebagai berikut.

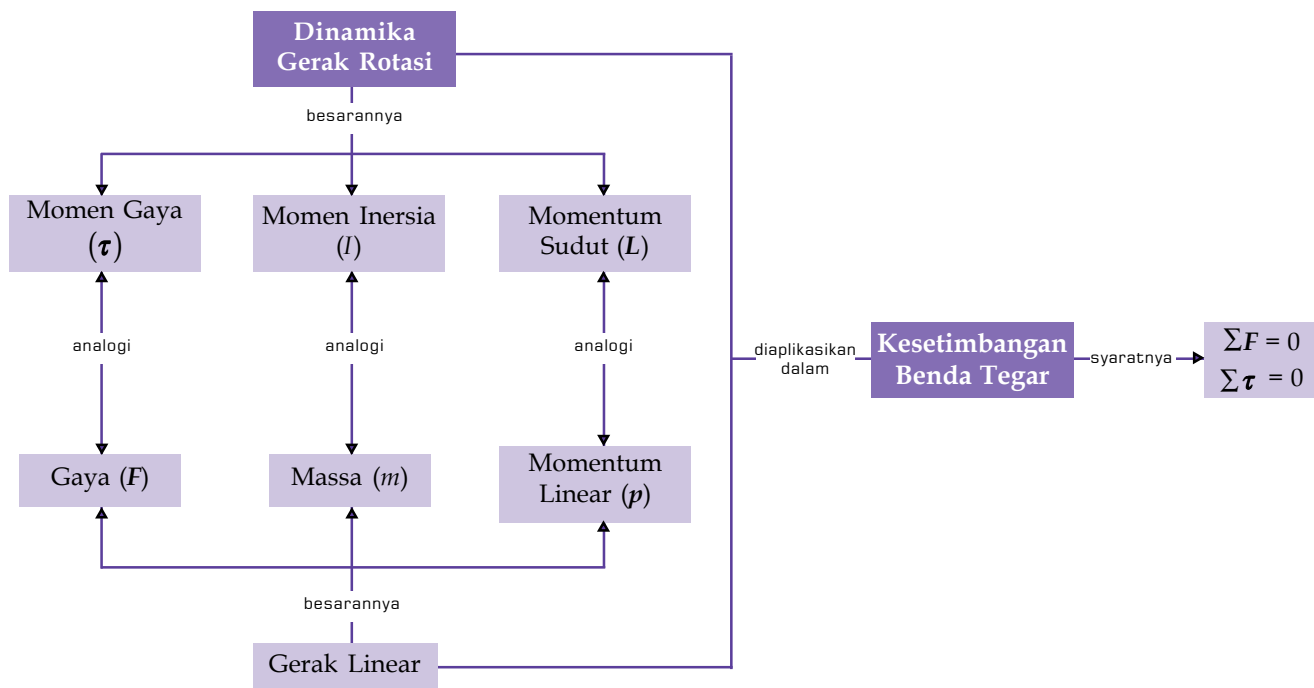
$$M = Fd$$

13. Syarat kesetimbangan benda tegar.

$$\sum F = 0$$

$$\sum \tau = 0$$

Peta Konsep



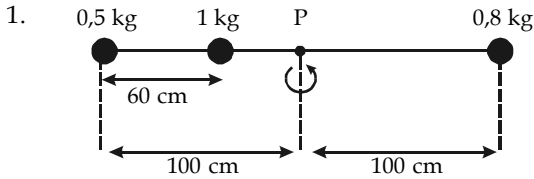
Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar, Anda dapat memformulasikan hubungan antara konsep torsi, momentum sudut, dan momen inersia, berdasarkan Hukum Kedua Newton serta penerapannya dalam masalah benda tegar. Jika Anda belum mampu memformulasikan hubungan antara konsep torsi, momentum sudut, dan momen inersia berdasarkan Hukum Kedua Newton

serta penerapannya dalam masalah benda tegar, Anda belum menguasai materi bab Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

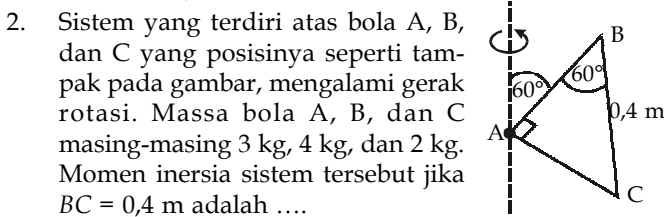
Evaluasi Materi Bab 6

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.



Beberapa bola dihubungkan dengan batang seperti pada gambar di atas. Besar momen inersia sistem yang berporos di titik P adalah

- 1,46 kgm²
- 1,66 kgm²
- 2,90 kgm²
- 170 kgm²
- 190 kgm²

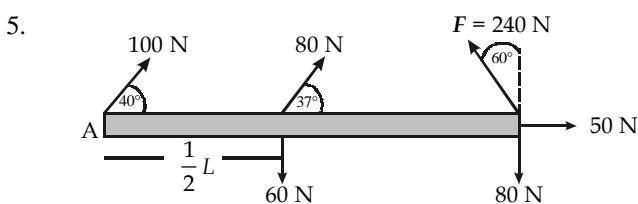


Sistem yang terdiri atas bola A, B, dan C yang posisinya seperti tampak pada gambar, mengalami gerak rotasi. Massa bola A, B, dan C masing-masing 3 kg, 4 kg, dan 2 kg. Momen inersia sistem tersebut jika $BC = 0,4$ m adalah

- 0,04 kgm²
- 0,18 kgm²
- 0,24 kgm²
- 0,28 kgm²
- 0,96 kgm²

3. Suatu batang homogen bermassa 4 kg dengan panjang 3 m diputar melalui poros yang terletak 1 m dari salah satu ujung batang. Momen inersia batang tersebut adalah

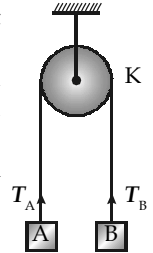
- 4 kgm²
- 5 kgm²
- 6 kgm²
- 7 kgm²
- 8 kgm²



Batang AB dengan panjang $L = 5$ m dipengaruhi oleh gaya-gaya seperti terlihat pada gambar. Apabila batang dianggap tidak bermassa, resultan momen gaya terhadap titik A adalah

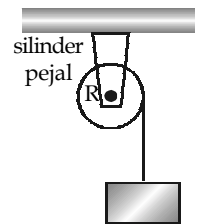
- 170 Nm
- 100 Nm
- 50 Nm
- 120 Nm
- 150 Nm

6. Sistem katrol pada gambar berikut memiliki data-data $m_K = 1$ kg, $m_A = 2$ kg, $m_B = 5$ kg, dan katrol K dianggap sebagai silinder pejal. Jika gesekan katrol dengan poros dan massa tali diabaikan, serta $g = 10$ m/s² maka percepatan benda selama gerak adalah



- 2 m/s²
- 4 m/s²
- 6 m/s²
- 8 m/s²
- 10 m/s²

7. Jika massa katrol 10 kg dan jari-jarinya 25 cm, percepatan benda yang massanya 5 kg dan digantungkan pada katrol adalah

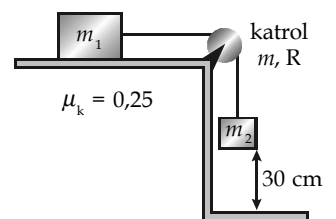


- 7,5 m/s²
- 10 m/s²
- 2,5 m/s²
- 5,0 m/s²
- 4,0 m/s²

8. Sebuah silinder pejal ($I = \frac{1}{2} mR^2$) dilepas tanpa kecepatan awal dari puncak suatu bidang miring yang kasar dan tanpa slip, serta kemiringannya membuat sudut θ terhadap bidang horizontal. Jika percepatan gravitasi g maka silinder tersebut akan

- meluncur dengan percepatan $g \sin \theta$
- menggelinding dengan percepatan $g \sin \theta$
- meluncur dengan percepatan $\frac{1}{2} g \sin \theta$
- menggelinding dengan percepatan $\frac{1}{2} g \sin \theta$
- menggelinding dengan percepatan $\frac{2}{3} g \sin \theta$

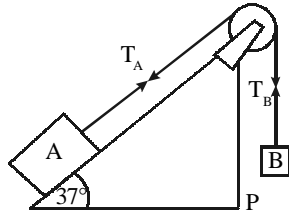
9. Dua benda bermassa sama, yaitu 4 kg dihubungkan dengan seutas tali melalui sebuah katrol, seperti ditunjukkan pada gambar. Apabila massa katrol 4 kg, waktu yang diperlukan m_2 untuk menyentuh lantai adalah (pada awalnya benda berada dalam keadaan diam).



- 2 sekon
- $\sqrt{5}$ sekon
- $2\sqrt{5}$ sekon
- 5 sekon
- $5\sqrt{5}$ sekon

10. Dua benda, yaitu A dan B yang masing-masing bermassa 2 kg dan 4 kg dihubungkan dengan seutas tali melalui sebuah katrol bermassa 2 kg dan berjari-

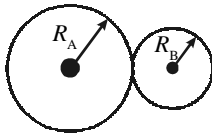
jari 10 cm. Benda A berada pada bidang miring kasar dengan koefisien gesek 0,3. Benda B tergantung pada sudut bidang miring 37° , seperti yang terlihat pada gambar



berikut. Percepatan sistem ini adalah

- a. $2,3 \text{ m/s}^2$
- b. $2,4 \text{ m/s}^2$
- c. $3,3 \text{ m/s}^2$
- d. $3,4 \text{ m/s}^2$
- e. $3,5 \text{ m/s}^2$

11. Dua bola bersinggungan seperti gambar di samping. Panjang jari-jari bola A dua kali jari-jari bola B. Jika momentum sudut kedua bola sama, perbandingan momen inersia bola A dan bola B adalah



- a. 2
- b. 0,5
- c. 0,25
- d. 4
- e. $\sqrt{2}$

12. Seorang penari balet dengan tangan terentang berputar dengan kecepatan sudut ω di atas lantai mendatar yang licin. Jika penari tersebut melipat tangannya, momen inersianya akan berkurang sebesar 25% dari semula. Perbandingan energi kinetik rotasi penari saat tangan dilipat dengan tangan terentang adalah

- a. $\frac{1}{4}$
- b. $\frac{3}{4}$
- c. $\frac{4}{3}$
- d. $\frac{4}{5}$
- e. 4

13. Sebuah roda berputar terhadap suatu sumbu dengan kecepatan sudut 810 rpm. Roda kedua yang mula-mula diam dengan momen inersia 2 kali roda pertama, tiba-tiba digabungkan pada sumbu yang sama dengan roda pertama. Persentase energi kinetik yang hilang akibat penggabungan kedua roda adalah

- a. 25%
- b. 33%
- c. 50%
- d. 67%
- e. 75%

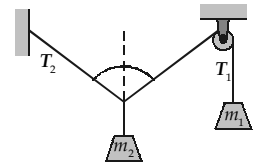
14. Seorang penari balet berputar dengan tangan terentang pada kecepatan 90 rpm di atas lantai licin dengan momen inersia 6 kgm^2 . Kemudian, kedua tangannya dilipat menyilang di dadanya. Pasangan yang mungkin dari ω dan I pada kondisi akhir tersebut adalah

- a. $\omega = 60 \text{ rpm}$ dan $I = 9 \text{ kgm}^2$
- b. $\omega = 120 \text{ rpm}$ dan $I = 4,5 \text{ kgm}^2$
- c. $\omega = 125 \text{ rpm}$ dan $I = 4,0 \text{ kgm}^2$
- d. $\omega = 140 \text{ rpm}$ dan $I = 3,5 \text{ kgm}^2$
- e. $\omega = 150 \text{ rpm}$ dan $I = 3,0 \text{ kgm}^2$

15. Sebuah bola pejal yang terbuat dari besi bergerak menggelinding pada lantai datar dengan kelajuan 54 km/jam. Massa bola 2 kg dan berdiameter 40 cm. Energi kinetik total bola adalah

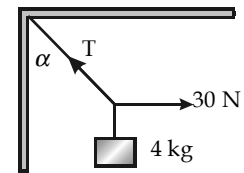
- a. 90 J
- b. 225 J
- c. 315 J
- d. 400 J
- e. 525 J

16. Diketahui $\text{tg } \alpha = \frac{3}{4}$, $\text{tg } \beta = \frac{4}{3}$, $m_2 = 4 \text{ kg}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$ maka nilai m_1 dan T_2 agar setimbang adalah



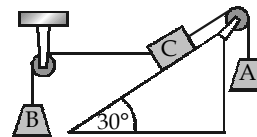
- a. 2,4 kg dan 32 N
- b. 3,2 kg dan 24 N
- c. 2,4 kg dan 24 N
- d. 3,2 kg dan 32 N
- e. 4,0 kg dan 24 N

17. Sistem benda berada dalam keadaan setimbang seperti yang terlihat pada gambar. Apabila $g = 10 \text{ m/s}^2$, besar tegangan tali T dan $\sin \alpha$ adalah



- a. 50 N dan $\frac{3}{5}$
- b. 50 N dan $\frac{4}{5}$
- c. 60 N dan $\frac{4}{6}$
- d. 60 N dan $\frac{3}{7}$
- e. 40 N dan $\frac{3}{5}$

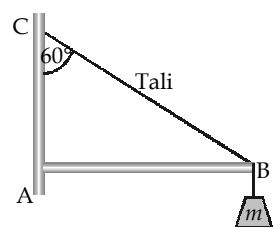
- 18.



Dari sistem pada gambar berikut, diketahui massa benda $B = 40 \text{ kg}$ dan massa benda $C = 50 \text{ kg}$. Massa benda A agar sistem setimbang adalah

- a. 80 kg
- b. 70 kg
- c. 60 kg
- d. 50 kg
- e. 40 kg

19. Diketahui sistem benda dalam keadaan setimbang, seperti gambar di samping. Batang AB homogen panjangnya 4 m dan massanya 10 kg. Gaya tegangan tali jika beban $m = 120 \text{ kg}$ adalah



- a. 1.300 N
- b. 2.500 N
- c. 2.800 N
- d. 3.000 N
- e. 5.000 N

20. Tangga AB yang panjangnya 5 m dan massa 5 kg disandarkan pada dinding vertikal yang licin. Ujung A terletak pada dinding dan ujung B terletak pada lantai. Ujung A terletak 4 m di atas lantai. Seorang

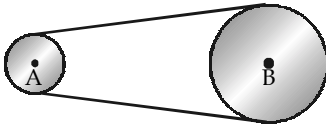
anak yang massanya 30 kg menaiki tangga sampai suatu ketinggian berjarak 2 m dari A. Koefisien gesek antara tangga dengan lantai pada saat tangga akan tergelincir adalah

- a. 0,25
- b. 0,27
- c. 0,35
- d. 0,44
- e. 0,5

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

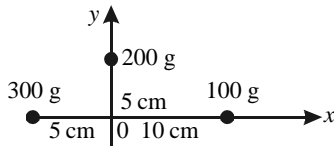
1. Suatu batang homogen bermassa m dengan panjang l diputar melalui poros yang terletak pada pertengahan batang sehingga momen inersia batang $I_{pm} = \frac{1}{12} ml^2$. Jika sumbu putar (poros) terletak pada jarak $\frac{1}{4} l$ dari salah satu ujung batang, berapakah momen inersia batang tersebut?

2.



Suatu motor listrik memutar roda A yang berjari-jari 10 cm. Roda A dihubungkan dengan roda B yang berjari-jari 50 cm seperti tampak pada gambar. Jika motor memberikan energi sebesar 1 joule pada roda A dan momen inersia roda A adalah 5×10^4 (sistem dalam satuan cgs.), tentukanlah kecepatan sudut roda B jika massa B diabaikan.

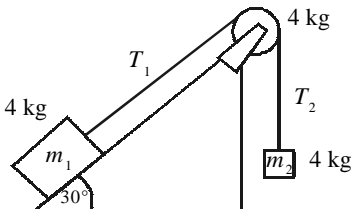
3.



Tiga benda dipasang pada ujung kerangka yang massanya dapat diabaikan. Jika sistem diputar terhadap sumbu- y , berapakah momen inersia sistem?

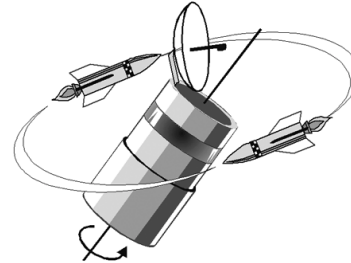
4. Sebuah batu gerinda memiliki massa 4 kg dan diameter 20 cm. Ketika momen gaya dikerjakan, batu gerinda mencapai kecepatan sudut 1.200 rpm dalam 10 sekon. Jika pada saat awal batu gerinda dalam keadaan diam, berapakah resultan momen gaya yang bekerja?

5.



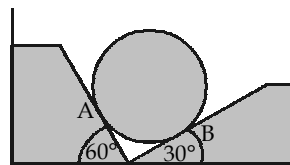
Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan permukaan bidang licin, tentukanlah:
 a) percepatan benda, dan
 b) tegangan tali T_1 dan T_2 .

6.



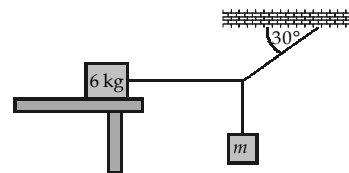
Sebuah satelit berbentuk silinder memiliki diameter 2 m, massa 1.000 kg, dan berotasi dengan laju $\frac{30}{\pi}$ rpm. Oleh karena ada perbaikan, satelit tersebut harus dihentikan. Dua roket kecil yang terpasang berseberangan pada satelit, menghasilkan gaya dorong 20 N dan menyinggung satelit, seperti yang terlihat pada gambar. Berapa lama roket harus dijalankan agar satelit berhenti berotasi?

7.



Sebuah bola bowling pada gambar memiliki berat 70 N. Bola itu diam dan terletak pada dinding yang licin. Jika bola dianggap homogen, tentukan gaya-gaya yang dikerjakan dinding pada bola di titik A dan B.

8.



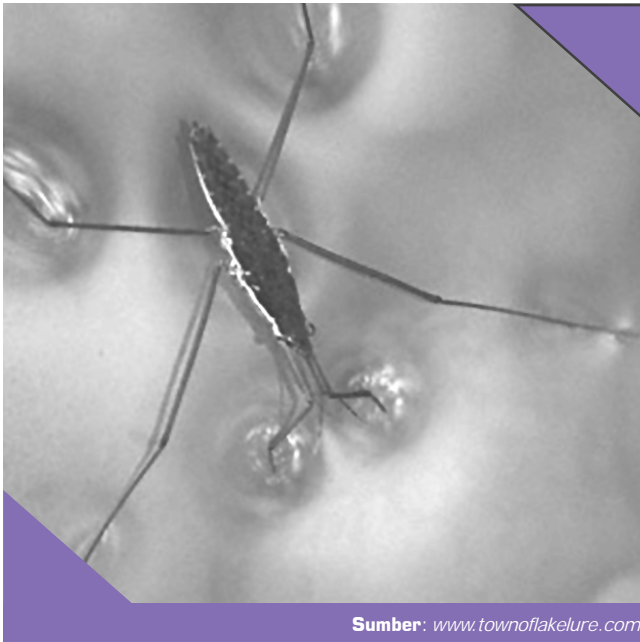
Sistem pada gambar berada dalam kesetimbangan. Jika gaya gesek maksimum pada balok adalah 15 N, tentukanlah:

- a. koefisien gesekan antara balok dan meja, dan
- b. nilai maksimum m .

7

B a b 7

Fluida



Sumber: www.townoflakelure.com

Pada bab ini, Anda diajak untuk dapat menerapkan konsep dan prinsip mekanika klasik sistem kontinu dalam menyelesaikan masalah dengan cara menganalisis hukum-hukum yang berhubungan dengan fluida statis dan dinamis serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

Perhatikanlah serangga yang sedang diam di atas permukaan air. Mengapa serangga tersebut dapat berdiri di atas permukaan air? Bagaimanakah hukum Fisika menerangkan peristiwa ini? Peristiwa serangga yang sedang berdiam diri di atas permukaan air seperti pada gambar, berhubungan dengan salah satu sifat air sebagai fluida, yaitu tegangan permukaan. Oleh karena adanya tegangan permukaan zat cair, serangga dan benda-benda kecil lainnya dapat terapung di atas permukaan air.

Fluida, yaitu zat cair dan gas telah memberikan banyak manfaat bagi manusia karena keistimewaan sifat yang dimilikinya. Kemudahan transportasi air dan udara merupakan salah satu contoh aplikasi teknologi yang berkaitan dengan sifat fluida. Tahukah Anda sifat-sifat fluida lainnya dan aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari?

Pada Bab 7 ini, Anda akan mendalami pembahasan mengenai fluida yang ditinjau dari keadaan statis dan dinamisnya.

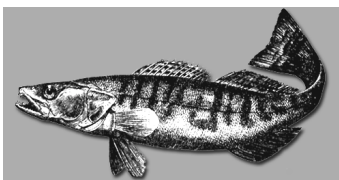
- A. Fluida Statis**
- B. Fluida Dinamis**

Soal Pramateri

1. Sebutkanlah sifat-sifat air dan udara yang Anda ketahui.
2. Terangkanlah oleh Anda, mengapa perahu atau kapal laut dapat mengapung di permukaan air?
3. Jelaskanlah menurut pemahaman Fisika Anda, mengapa burung dapat terbang?

Jelajah Fisika

Ikan Tulang



Ikan tulang (*bony fishes*) memiliki kantung udara di dalam tubuhnya yang berfungsi sebagai pelampung renang. Agar dapat tetap melayang di dalam air, tekanan udara dalam kantung diatur menurut kedalaman air. Dengan menekan udara dalam kantung tersebut, tulang ikan dapat turun lebih dalam lagi.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Fluida adalah zat yang dapat mengalir dan berubah bentuk (dapat dimampatkan) jika diberi tekanan. Jadi, yang termasuk ke dalam fluida adalah zat cair dan gas. Perbedaan antara zat cair dan gas terletak pada kompresibilitasnya atau kemampuannya. Gas mudah dimampatkan, sedangkan zat cair tidak dapat dimampatkan. Ditinjau dari keadaan fisisnya, fluida terdiri atas *fluida statis* atau *hidrostatika*, yaitu ilmu yang mempelajari tentang fluida atau zat alir yang diam (tidak bergerak) dan *fluida dinamis* atau *hidrodinamika*, yaitu ilmu yang mempelajari tentang zat alir atau fluida yang bergerak. Hidrodinamika yang khusus membahas mengenai aliran gas dan udara disebut *aerodinamika*.

A Fluida Statis

Sifat fisis fluida dapat ditentukan dan dipahami lebih jelas saat fluida berada dalam keadaan diam (statis). Sifat-sifat fisis fluida statis yang akan dibahas pada subbab ini di antaranya, massa jenis, tekanan, tegangan permukaan, kapilaritas, dan viskositas. Bahasan mengenai massa jenis dan tekanan telah Anda pelajari di SMP sehingga uraian materi yang disajikan dalam subbab ini hanya bertujuan mengingatkan Anda tentang materi tersebut.

1. Massa Jenis

Pernahkah Anda membandingkan berat antara kayu dan besi? Benarkah pernyataan bahwa besi lebih berat daripada kayu? Pernyataan tersebut tentunya kurang tepat, karena segelondong kayu yang besar jauh lebih berat daripada sebuah bola besi. Pernyataan yang tepat untuk perbandingan antara kayu dan besi tersebut, yaitu besi lebih padat daripada kayu.

Anda tentu masih ingat, bahwa setiap benda memiliki kerapatan massa yang berbeda-beda serta merupakan sifat alami dari benda tersebut. Dalam Fisika, ukuran kepadatan (densitas) benda homogen disebut massa jenis, yaitu massa per satuan volume. Secara matematis, massa jenis dituliskan sebagai berikut.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7-1)$$

dengan: m = massa (kg atau g),
 V = volume (m^3 atau cm^3), dan
 ρ = massa jenis (kg/m^3 atau g/cm^3).

Jenis beberapa bahan dan massa jenisnya dapat dilihat pada **Tabel 7.1** berikut.

Tabel 7.1 Massa Jenis atau Kerapatan Massa (*Density*)

Bahan	Massa Jenis (g/cm^3)	Nama Bahan	Massa Jenis (g/cm^3)
Air	1,00	Gliserin	1,26
Aluminium	2,7	Kuningan	8,6
Baja	7,8	Perak	10,5
Benzena	0,9	Platina	21,4
Besi	7,8	Raksa	13,6
Emas	19,3	Tembaga	8,9
Es	0,92	Timah Hitam	11,3
Etil Alkohol	0,81		

Sumber: *College Physics*, 1980

2. Tekanan Hidrostatik

Masih ingatkah Anda definisi tekanan? Tekanan adalah gaya yang bekerja tegak lurus pada suatu permukaan bidang dan dibagi luas permukaan bidang tersebut. Secara matematis, persamaan tekanan dituliskan sebagai berikut.

$$p = \frac{F}{A} \quad (7-2)$$

dengan: F = gaya (N),
 A = luas permukaan (m^2), dan
 p = tekanan ($\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pascal}$).

Persamaan (7-2) menyatakan bahwa tekanan p berbanding terbalik dengan luas permukaan bidang tempat gaya bekerja. Jadi, untuk besar gaya yang sama, luas bidang yang kecil akan mendapatkan tekanan yang lebih besar daripada luas bidang yang besar. Dapatkah Anda memberikan beberapa contoh penerapan konsep tekanan dalam kehidupan sehari-hari?

Tekanan hidrostatik disebabkan oleh fluida tak bergerak. Tekanan hidrostatik yang dialami oleh suatu titik di dalam fluida diakibatkan oleh gaya berat fluida yang berada di atas titik tersebut. Perhatikanlah **Gambar 7.1**. Jika besarnya tekanan hidrostatik pada dasar tabung adalah p , menurut konsep tekanan, besarnya p dapat dihitung dari perbandingan antara gaya berat fluida (F) dan luas permukaan bejana (A).

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\text{gaya berat fluida}}{\text{luas permukaan bejana}}$$

Gaya berat fluida merupakan perkalian antara massa fluida dengan percepatan gravitasi Bumi, ditulis $p = \frac{m_{\text{fluida}} g}{A}$. Oleh karena $m = \rho V$, persamaan tekanan oleh fluida dituliskan sebagai $p = \frac{\rho V g}{A}$.

Volume fluida di dalam bejana merupakan hasil perkalian antara luas permukaan bejana (A) dan tinggi fluida dalam bejana (h). Oleh karena itu, persamaan tekanan di dasar bejana akibat fluida setinggi h dapat dituliskan menjadi

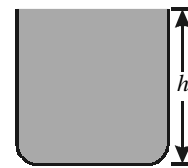
$$p = \frac{\rho (Ah) g}{A} = \rho h g$$

Jika tekanan hidrostatik dilambangkan dengan p_h , persamaannya dituliskan sebagai berikut.

$$p_h = \rho g h \quad (7-3)$$

dengan: p_h = tekanan hidrostatik (N/m^2),
 ρ = massa jenis fluida (kg/m^3),
 g = percepatan gravitasi (m/s^2), dan
 h = kedalaman titik dari permukaan fluida (m).

Semakin tinggi dari permukaan Bumi, tekanan udara akan semakin berkurang. Sebaliknya, semakin dalam Anda menyelam dari permukaan laut atau danau, tekanan hidrostatik akan semakin bertambah. Mengapa demikian? Hal tersebut disebabkan oleh gaya berat yang dihasilkan oleh udara dan zat cair. Anda telah mengetahui bahwa lapisan udara akan semakin tipis seiring bertambahnya ketinggian dari permukaan Bumi sehingga tekanan udara akan berkurang jika ketinggian bertambah. Adapun untuk zat cair, massanya akan semakin besar seiring dengan bertambahnya kedalaman. Oleh karena itu, tekanan hidrostatik akan bertambah jika kedalaman bertambah.



Gambar 7.1

Dasar bejana yang terisi dengan fluida setinggi h akan mengalami tekanan hidrostatik sebesar P_h .



Contoh 7.1

Tabung setinggi 30 cm diisi penuh dengan fluida. Tentukanlah tekanan hidrostatik pada dasar tabung, jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan tabung berisi:

- air,
- raksa, dan
- gliserin.

Gunakan data massa jenis pada Tabel 7.1.

Jawab

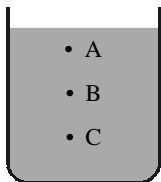
Diketahui: $h = 30 \text{ cm}$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- Tekanan hidrostatik pada dasar tabung yang berisi air:

$$P_h = \rho gh = (1.000 \text{ kg/m}^3) (10 \text{ m/s}^2) (0,3 \text{ m}) = 3.000 \text{ N/m}^2$$
- Tekanan hidrostatik pada dasar tabung yang berisi air raksa:

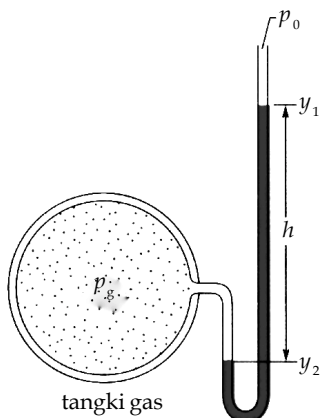
$$P_h = \rho gh = (13.600 \text{ kg/m}^3) (10 \text{ m/s}^2) (0,3 \text{ m}) = 40.800 \text{ N/m}^2$$
- Tekanan hidrostatik pada dasar tabung yang berisi gliserin:

$$P_h = \rho gh = (1.260 \text{ kg/m}^3) (10 \text{ m/s}^2) (0,3 \text{ m}) = 3.780 \text{ N/m}^2$$



Gambar 7.2

Semakin dalam kedudukan sebuah titik dalam fluida, tekanan hidrostatik di titik tersebut akan semakin besar.



Sumber: *Fundamental of Physics*, 2001

Gambar 7.3

Manometer pipa terbuka

Perhatikan Gambar 7.2. Pada gambar tersebut, tekanan hidrostatik di titik A, B, dan C berbeda-beda. Tekanan hidrostatik paling besar adalah di titik C. Dapatkah Anda menjelaskan alasannya?

Prinsip tekanan hidrostatik ini digunakan pada alat-alat pengukur tekanan. Alat-alat pengukur tekanan yang digunakan untuk mengukur tekanan gas, di antaranya sebagai berikut.

a. Manometer Pipa Terbuka

Manometer pipa terbuka adalah alat pengukur tekanan gas yang paling sederhana. Alat ini berupa pipa berbentuk U yang berisi zat cair. Perhatikan Gambar 7.3. Ujung yang satu mendapat tekanan sebesar p (dari gas yang hendak diukur tekanannya) dan ujung lainnya berhubungan dengan tekanan atmosfer (p_0).

Besarnya tekanan udara di titik $y_1 = p_0$, sedangkan tekanan udara di titik $y_2 = p$. y_1 memiliki selisih ketinggian $\Delta y_1 = 0$ dan y_2 memiliki selisih ketinggian $\Delta y_2 = h$. Berdasarkan Persamaan (7-3) tentang besar tekanan hidrostatik, besarnya tekanan udara dalam tabung pada Gambar 7.3 dinyatakan dengan persamaan berikut ini.

$$p_{\text{gas}} = p - p_0 = \rho gh \quad (7-4)$$

dengan $\rho =$ massa jenis zat cair dalam tabung.

b. Barometer

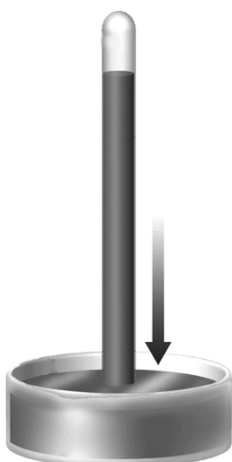
Barometer raksa ini ditemukan pada 1643 oleh **Evangelista Torricelli**, seorang ahli Fisika dan Matematika dari Italia. Ia mendefinisikan tekanan atmosfer dalam bukunya yang berjudul "*A Unit of Measurement, The Torr*"

Tekanan atmosfer (1 atm) sama dengan tekanan hidrostatik raksa (*mercury*) yang tingginya 760 mm. Cara mengonversikan satuannya adalah sebagai berikut.

ρ raksa \times percepatan gravitasi Bumi \times panjang raksa dalam tabung atau

$$(13.600 \text{ kg/cm}^3) (9,8 \text{ m/s}^2) (0,76 \text{ m}) = 1,103 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Jadi,
$$1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \quad (7-5)$$



Sumber: www.atmos.washington.edu

Gambar 7.4

Skema barometer raksa

Kerjakanlah

Lakukanlah analisis oleh Anda tentang cara kerja dari barometer, kemudian diskusikanlah bersama teman Anda dan buatlah laporan tertulisnya.

c. Pengukur Tekanan Ban

Alat ini digunakan untuk mengukur tekanan udara di dalam ban. Bentuknya berupa silinder panjang yang di dalamnya terdapat pegas. Saat ujungnya ditekan pada pentil ban, tekanan udara dari dalam ban akan masuk ke dalam silinder dan menekan pegas. Besarnya tekanan yang diterima oleh pegas akan diteruskan ke ujung lain dari silinder yang dihubungkan dengan skala. Skala ini telah dikalibrasi sehingga dapat menunjukkan nilai selisih tekanan udara luar (atmosfer) dengan tekanan udara dalam ban.

3. Tekanan Total

Tinjaulah sebuah tabung yang diisi dengan fluida setinggi h , seperti tampak pada **Gambar 7.6**. Pada permukaan fluida yang terkena udara luar, bekerja tekanan udara luar yang dinyatakan dengan p . Jika tekanan udara luar ikut diperhitungkan, besarnya tekanan total atau tekanan mutlak pada satu titik di dalam fluida adalah

$$p_A = p_0 + \rho gh \quad (7-6)$$

dengan: p_0 = tekanan udara luar = $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, dan
 p_A = tekanan total di titik A (tekanan mutlak).

Contoh 7.2

Jika diketahui tekanan udara luar 1 atm dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah tekanan total di bawah permukaan danau pada kedalaman:

- 10 cm,
- 20 cm, dan
- 30 cm.

Jawab

Diketahui: $p_0 = 1 \text{ atm}$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

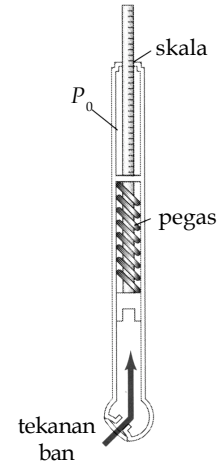
- Tekanan total di bawah permukaan danau pada kedalaman 10 cm:
 $p_A = p_0 + \rho gh = (1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + (1.000 \text{ kg/m}^3) (10 \text{ m/s}^2) (0,1 \text{ m})$
 $= 1,023 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- Tekanan total di bawah permukaan danau pada kedalaman 20 cm:
 $p_A = p_0 + \rho gh = (1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + (1.000 \text{ kg/m}^3) (10 \text{ m/s}^2) (0,2 \text{ m})$
 $= 1,033 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- Tekanan total di bawah permukaan danau pada kedalaman 30 cm:
 $p_A = p_0 + \rho gh = (1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + (1.000 \text{ kg/m}^3) (10 \text{ m/s}^2) (0,3 \text{ m})$
 $= 1,043 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

4. Hukum Utama Hidrostatik

Perhatikanlah **Gambar 7.7**. Gambar tersebut memperlihatkan sebuah bejana berhubungan yang diisi dengan fluida, misalnya air. Anda dapat melihat bahwa tinggi permukaan air di setiap tabung adalah sama, walaupun bentuk setiap tabung berbeda. Bagaimanakah tekanan yang dialami oleh suatu titik di setiap tabung? Samakah tekanan total di titik A, B, C, dan D yang letaknya segaris? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, Anda harus mengetahui Hukum Utama Hidrostatik.

Hukum Utama Hidrostatik menyatakan bahwa semua titik yang berada pada bidang datar yang sama dalam fluida homogen, memiliki tekanan total yang sama. Jadi, walaupun bentuk penampang tabung berbeda, besarnya tekanan total di titik A, B, C, dan D adalah sama.

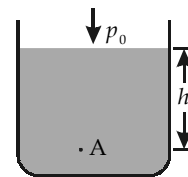
Persamaan Hukum Utama Hidrostatik dapat diturunkan dengan memerhatikan **Gambar 7.8**. Misalkan, pada suatu bejana berhubungan dimasukkan dua jenis fluida yang massa jenisnya berbeda, yaitu ρ_1 dan ρ_2 .



Sumber: Physics, 1995

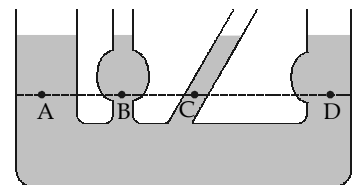
Gambar 7.5

Alat pengukur tekanan udara di dalam ban.



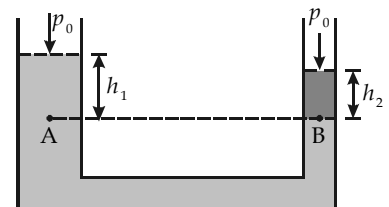
Gambar 7.6

Tekanan total atau tekanan mutlak yang dialami oleh titik A yang berada di dalam suatu fluida adalah sebesar P_A .



Gambar 7.7

Tekanan di titik A, B, C, dan D sama besar, serta tidak bergantung pada bentuk penampang tempat fluida tersebut.



Gambar 7.8

Tekanan total di titik A dan B pada bejana U yang terisi fluida homogen adalah sama besar, $p_A = p_B$.

Jelajah Fisika

Blaise Pascal



Sumber: www.philotheek.de

Blaise Pascal lahir di Clermont-Ferrand, Prancis. Ia dikenal sebagai seorang matematika-wan dan fisikawan yang handal. Penelitiannya dalam ilmu Fisika, membuat ia berhasil menemukan barometer, mesin hidrolik dan jarum suntik.

Sumber: www.allbiographies.com

Jika diukur dari bidang batas terendah antara fluida 1 dan fluida 2, yaitu titik B dan titik A, fluida 2 memiliki ketinggian h_2 dan fluida 1 memiliki ketinggian h_1 .

Tekanan total di titik A dan titik B sama besar. Menurut persamaan tekanan hidrostatis, besarnya tekanan di titik A dan titik B bergantung pada massa jenis fluida dan ketinggian fluida di dalam tabung. Secara matematis, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut.

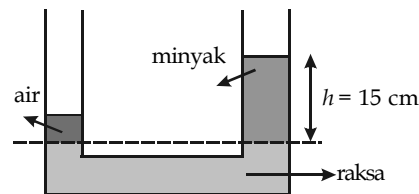
$$p_A = p_B$$

$$p_0 + \rho_1 g h_1 = p_0 + \rho_2 g h_2$$

$$\boxed{\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2} \quad (7-7)$$

dengan: h_1 = jarak titik A terhadap permukaan fluida 1,
 h_2 = jarak titik B terhadap permukaan fluida 2,
 ρ_1 = massa jenis fluida satu, dan
 ρ_2 = massa jenis fluida dua.

Contoh 7.3



Perhatikanlah gambar bejana di samping. Jika diketahui massa jenis minyak $0,8 \text{ g/cm}^3$, massa jenis raksa $13,6 \text{ g/cm}^3$, dan massa jenis air 1 g/cm^3 , tentukanlah perbedaan tinggi permukaan antara minyak dan air.

Jawab

Diketahui: $\rho_m = 0,8 \text{ g/cm}^3$, $\rho_r = 13,6$, dan $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$.

Air dan minyak batas terendahnya sama sehingga diperoleh persamaan berikut

$$\rho_a h_a = \rho_m h_m \rightarrow h_a = \frac{\rho_m}{\rho_a} h_m = \frac{0,8 \text{ g/cm}^3}{1 \text{ g/cm}^3} \times 15 \text{ cm} = 12 \text{ cm}$$

Jadi, perbedaan tinggi permukaan minyak dan air = $15 \text{ cm} - 12 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$.

5. Hukum Pascal

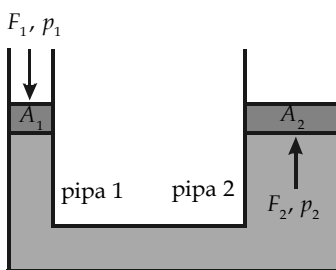
Bagaimana jika sebuah bejana U diisi dengan fluida homogen dan salah satu pipanya ditekan dengan gaya sebesar F ? Proses Fisika yang terjadi pada bejana U seperti itu diselidiki oleh **Blaise Pascal**. Melalui penelitiannya, Pascal berkesimpulan bahwa apabila tekanan diberikan pada fluida yang memenuhi sebuah ruangan tertutup, tekanan tersebut akan diteruskan oleh fluida tersebut ke segala arah dengan besar yang sama tanpa mengalami pengurangan. Pernyataan ini dikenal sebagai Hukum Pascal yang dikemukakan oleh Pascal pada 1653.

Secara analisis sederhana, Hukum Pascal dapat digambarkan seperti pada **Gambar 7.9**. Tekanan oleh gaya sebesar F_1 terhadap pipa 1 yang memiliki luas penampang pipa A_1 , akan diteruskan oleh fluida menjadi gaya angkat sebesar F_2 pada pipa 2 yang memiliki luas penampang pipa A_2 dengan besar tekanan yang sama. Oleh karena itu, secara matematis Hukum Pascal ditulis sebagai berikut.

$$p_1 = p_2$$

$$\boxed{\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}} \quad (7-8)$$

dengan: F_1 = gaya pada pengisap pipa 1,
 A_1 = luas penampang pengisap pipa 1,
 F_2 = gaya pada pengisap pipa 2, dan
 A_2 = luas penampang pengisap pipa 2.



Gambar 7.9

Tekanan F_1 di pipa satu sama besar dengan gaya angkat di pipa dua.

Contoh 7.4

Alat pengangkat mobil yang memiliki luas pengisap masing-masing sebesar $0,10 \text{ m}^2$ dan $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ digunakan untuk mengangkat mobil seberat $2 \times 10^4 \text{ N}$. Berapakah besar gaya yang harus diberikan pada pengisap yang kecil?

Jawab

Diketahui: $A_1 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $A_2 = 0,1 \text{ m}^2$, dan $F_2 = 2 \times 10^4 \text{ N}$.

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow F_1 = F_2 \frac{A_1}{A_2} = (2 \times 10^4 \text{ N}) \frac{4 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{0,1 \text{ m}^2} = 80 \text{ N}$$

Dengan demikian, gaya yang harus diberikan pada pengisap yang kecil adalah 80 N .

Contoh 7.5

Sebuah pompa hidrolis berbentuk silinder memiliki jari-jari 4 cm dan 20 cm . Jika pengisap kecil ditekan dengan gaya 200 N , berapakah gaya yang dihasilkan pada pengisap besar?

Jawab

Diketahui: $r_2 = 20 \text{ cm}$, $r_1 = 4 \text{ cm}$, dan $F_1 = 200 \text{ N}$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} = F_1 \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} = F_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = (200 \text{ N}) \left(\frac{20 \text{ cm}}{4 \text{ cm}} \right)^2 = 5.000 \text{ N}$$

Hukum Pascal dimanfaatkan dalam peralatan teknik yang banyak membantu pekerjaan manusia, antara lain dongkrak hidrolis, pompa hidrolis, mesin hidrolis pengangkat mobil, mesin pres hidrolis, dan rem hidrolis. Berikut pembahasan mengenai cara kerja beberapa alat yang menggunakan prinsip Hukum Pascal.

a. Dongkrak Hidrolis

Dongkrak hidrolis merupakan salah satu aplikasi sederhana dari Hukum Pascal. Berikut ini prinsip kerja dongkrak hidrolis. Saat pengisap kecil diberi gaya tekan, gaya tersebut akan diteruskan oleh fluida (minyak) yang terdapat di dalam pompa. Akibatnya, minyak dalam dongkrak akan menghasilkan gaya angkat pada pengisap besar dan dapat mengangkat beban di atasnya.

b. Mesin Hidrolis Pengangkat Mobil

Mesin hidrolis pengangkat mobil ini memiliki prinsip yang sama dengan dongkrak hidrolis. Perbedaannya terletak pada perbandingan luas penampang pengisap yang digunakan. Pada mesin pengangkat mobil, perbandingan antara luas penampang kedua pengisap sangat besar sehingga gaya angkat yang dihasilkan pada pipa berpenampang besar dan dapat digunakan untuk mengangkat mobil.



Sumber: Physics, 1995

Solusi Cerdas

Sebuah pipa berdiameter 9 cm dialiri air berkecepatan 5 m/s , kemudian terhubung dengan pipa berdiameter 3 cm . Kecepatan air pada pipa yang berdiameter 3 cm adalah

- a. 3 m/s
- b. 9 m/s
- c. 18 m/s
- d. 27 m/s
- e. 45 m/s

Penyelesaian

$$A_1 = \pi r_1^2 = \pi \left(\frac{81}{4} \times 10^{-4} \right) \text{ m}^2$$

$$A_2 = \pi r_2^2 = \pi \left(\frac{9}{4} \times 10^{-4} \right) \text{ m}^2$$

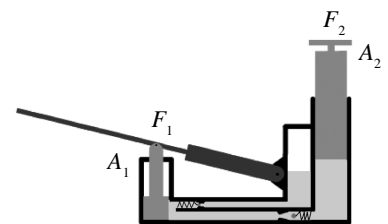
$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} = \frac{\pi \left(\frac{81}{4} \times 10^{-4} \right) \text{ m}^2 (5 \text{ m/s})}{\pi \left(\frac{9}{4} \times 10^{-4} \right) \text{ m}^2}$$

$$v_2 = \left(\frac{81}{9} \times 5 \right) \text{ m} = 45 \text{ m/s}$$

Jawab: e

Soal UNAS 2005/2006



Sumber: www.tcrj.edu

Gambar 7.10

Skema dongkrak hidrolis

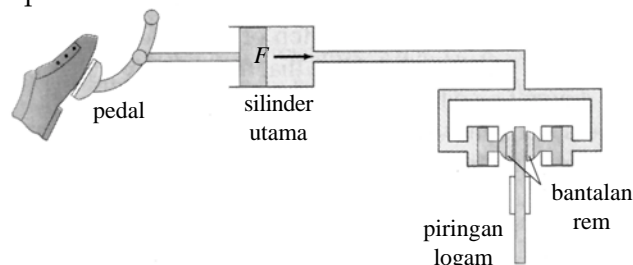
Gambar 7.11

Mesin hidrolis pengangkat mobil



c. Rem Hidrolik

Rem hidrolik digunakan pada mobil. Ketika Anda menekan pedal rem, gaya yang Anda berikan pada pedal akan diteruskan ke silinder utama yang berisi minyak rem. Selanjutnya, minyak rem tersebut akan menekan bantalan rem yang dihubungkan pada sebuah piringan logam sehingga timbul gesekan antara bantalan rem dengan piringan logam. Gaya gesek ini akhirnya akan menghentikan putaran roda.



Sumber: Physics, 1995

Gambar 7.12 Prinsip kerja rem hidrolik

Jelajah Fisika Archimedes



Sumber: www.katharinen.ingolstadt.de Archimedes lahir di Syracuse, Romawi. Ia dikenal dan dikenang karena sejumlah hasil karyanya di bidang Fisika dan Matematika yang memberikan banyak manfaat dalam kehidupan manusia. Hasil karyanya dalam ilmu Fisika antara lain alat penarik air dan hidrostatika. Ungkapannya yang terkenal saat ia menemukan gaya ke atas yang dialami oleh benda di dalam fluida, yaitu "Eureka" sangat melekat dengan namanya.

Sumber: www.allbiographies.com

6. Hukum Archimedes

Anda tentunya sering melihat kapal yang berlayar di laut, benda-benda yang terapung di permukaan air, atau batuan-batuan yang tenggelam di dasar sungai. Konsep terapung, melayang, atau tenggelamnya suatu benda di dalam fluida, kali pertama diteliti oleh Archimedes.

Menurut Archimedes, benda yang dicelupkan sebagian atau seluruhnya ke dalam fluida, akan mengalami gaya ke atas. Besar gaya ke atas tersebut besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda. Secara matematis, Hukum Archimedes dituliskan sebagai berikut.

$$F_A = \rho_f V_f g \quad (7-9)$$

dengan: F_A = gaya ke atas (N),
 ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3),
 V_f = volume fluida yang dipindahkan (m^3), dan
 g = percepatan gravitasi (m/s^2).

Berdasarkan Persamaan (7-9) dapat diketahui bahwa besarnya gaya ke atas yang dialami benda di dalam fluida bergantung pada massa jenis fluida, volume fluida yang dipindahkan, dan percepatan gravitasi Bumi.

Mahir Meneliti 7.1

Menguji Teori Archimedes

Alat dan Bahan

1. Dua buah bejana yang identik
2. Neraca sama lengan
3. Neraca pegas
4. Beban
5. Air

Prosedur

1. Gantungkan beban pada neraca pegas.
2. Catatlah nilai yang ditunjukkan oleh neraca pegas sebagai berat beban tersebut.
3. Isilah salah satu bejana dengan air, kemudian timbanglah beban di dalam air. Catatlah angka yang ditunjukkan oleh neraca pegas sebagai berat beban di dalam air.
4. Bandingkanlah berat beban saat ditimbang di udara dengan berat beban saat ditimbang di dalam air. Apakah yang dapat Anda simpulkan dari kegiatan tersebut?
5. Letakkan kedua bejana identik ke setiap lengan neraca sama lengan.

6. Isilah kedua bejana identik dengan air sampai penuh. Kemudian, secara perlahan masukkan beban ke dalam salah satu bejana, sambil menampung air yang tumpah dari dalam bejana.
7. Amatilah posisi neraca sama lengan setelah beban berada di dalam salah satu bejana.
8. Hitunglah volume beban yang digunakan, kemudian bandingkan volume tersebut dengan volume air yang dipindahkan ketika beban dimasukkan ke dalam air.
9. Apakah yang dapat Anda simpulkan?
10. Diskusikanlah bersama teman kelompok dan guru Fisika Anda.

Anda telah mengetahui bahwa suatu benda yang berada di dalam fluida dapat terapung, melayang, atau tenggelam. Agar Anda dapat mengingat kembali konsep Fisika dan persamaan yang digunakan untuk menyatakan ketiga peristiwa tersebut, pelajirlah uraian berikut.

a. Terapung

Benda yang dicelupkan ke dalam fluida akan terapung jika massa jenis benda lebih kecil daripada massa jenis fluida ($\rho_b < \rho_f$). Massa jenis benda yang terapung dalam fluida memenuhi persamaan berikut.

$$\rho_b = \frac{V_{bf}}{V_b} \rho_f \quad (7-10)$$

atau

$$\rho_b = \frac{h_{bf}}{h_b} \rho_f \quad (7-11)$$

dengan: V_{bf} = volume benda yang tercelup dalam fluida (m^3),
 V_b = volume benda (m^3),
 h_{bf} = tinggi benda yang tercelup dalam fluida (m),
 h_b = tinggi benda (m),
 ρ_b = massa jenis benda (kg/m^3), dan
 ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3).

Sebuah balok kayu ($\rho = 0,6 \text{ kg/m}^3$) bermassa 60 g dan volume 100 cm^3 dimasukkan ke dalam air. Ternyata, 60 cm^3 kayu tenggelam sehingga volume air yang dipindahkan sebesar 60 cm^3 ($0,6 \text{ N}$).

b. Melayang

Benda yang dicelupkan ke dalam fluida akan melayang jika massa jenis benda sama dengan massa jenis fluida ($\rho_b = \rho_f$). Dapatkah Anda memberikan contoh benda-benda yang melayang di dalam zat cair?

c. Tenggelam

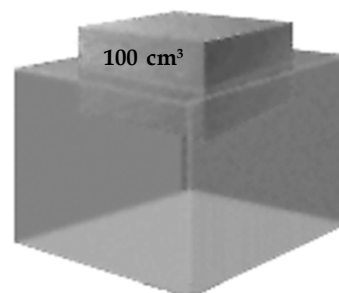
Benda yang dicelupkan ke dalam fluida akan tenggelam jika massa jenis benda lebih besar daripada massa jenis fluida ($\rho_b > \rho_f$). Jika benda yang dapat tenggelam dalam fluida ditimbang di dalam fluida tersebut, berat benda akan menjadi

$$w_{bf} = w - F_A \quad (7-12)$$

atau

$$w_{bf} = (\rho_b - \rho_f) V_b g \quad (7-13)$$

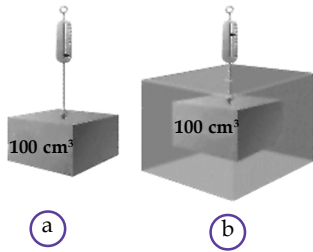
dengan: w_{bf} = berat benda dalam fluida (N), dan
 w = berat benda di udara (N).



Sumber: Microsoft Encarta, 2004

Gambar 7.13

Balok kayu bervolume 100 cm^3 dimasukkan ke dalam air.



Sumber: Microsoft Encarta, 2004

Gambar 7.14

- (a) Balok aluminium dengan volume 100 cm^3 di udara.
 (b) Balok aluminium dengan volume 100 cm^3 ditimbang di dalam air. Apakah beratnya sama?

Perhatikanlah **Gambar 7.14**. Aluminium ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$) yang bermassa 270 g dan memiliki volume 100 cm^3 , ditimbang di udara. Berat aluminium tersebut sebesar $2,7 \text{ N}$. Ketika penimbangan dilakukan di dalam air, volume air yang dipindahkan adalah 100 cm^3 dan menyebabkan berat air yang dipindahkan sebesar 1 N ($m = \rho V$ dan $w = mg$). Dengan demikian, gaya ke atas F_A yang dialami aluminium sama dengan berat air yang dipindahkan, yaitu sebesar 1 N . Berat aluminium di dalam air menjadi

$$\begin{aligned} w_{\text{bf}} &= w - F_A \\ &= 2,7 \text{ N} - 1 \text{ N} \\ &= 1,7 \text{ N} \end{aligned}$$

Contoh 7.6

Sebuah batu memiliki berat 30 N jika ditimbang di udara. Jika batu tersebut ditimbang di dalam air beratnya $= 21 \text{ N}$. Jika massa jenis air adalah 1 g/cm^3 , tentukanlah:

- gaya ke atas yang diterima batu,
- volume batu, dan
- massa jenis batu tersebut.

Jawab

Diketahui: $w = 30 \text{ N}$, $w_{\text{bf}} = 21 \text{ N}$, dan $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$.

$$w = 30 \text{ N} \rightarrow m = \frac{w}{g} = \frac{30 \text{ N}}{10 \text{ m/s}^2} = 3 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3 = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{a. } w_{\text{bf}} &= w - F_A \\ 21 \text{ N} &= 30 \text{ N} - F_A \\ F_A &= 9 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } F_A &= \rho_{\text{air}} V_{\text{batu}} g \\ 9 \text{ N} &= (1.000 \text{ kg/m}^3) (V_{\text{batu}}) (10 \text{ m/s}^2) \\ V_{\text{batu}} &= 9 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{c. } \rho_{\text{batu}} = \frac{m}{V} = \frac{3 \text{ kg}}{9 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = \frac{1}{3} \times 10^4 \text{ kg/m}^3 = 3.333,3 \text{ kg/m}^3$$

Contoh 7.7

Sebuah bola logam padat seberat 20 N diikatkan pada seutas kawat dan dicelupkan ke dalam minyak ($\rho_{\text{minyak}} = 0,8 \text{ g/cm}^3$). Jika massa jenis logam 5 g/cm^3 , berapakah tegangan kawat?

Jawab

Diketahui: $w_{\text{bola}} = 20 \text{ N}$, $\rho_{\text{minyak}} = 0,8 \text{ g/cm}^3$, dan $\rho_{\text{logam}} = 5 \text{ g/cm}^3$.

Berdasarkan uraian gaya-gaya yang bekerja pada bola, dapat dituliskan persamaan

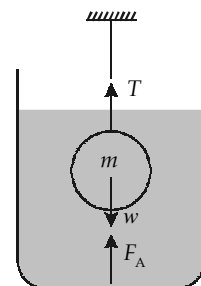
$$T + F_A = w$$

$$T = w - F_A = w - \rho_{\text{minyak}} V_{\text{bola}} g$$

$$T = w - \rho_{\text{minyak}} \left(\frac{m_{\text{bola}}}{\rho_{\text{bola}}} \right) g$$

$$T = 20 \text{ N} - (800 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{2 \text{ kg}}{5.000 \text{ kg/cm}^3} \right) (10 \text{ m/s}^2)$$

$$T = 16,8 \text{ N}$$



Contoh 7.8

Sebuah benda memiliki volume 20 m^3 dan massa jenisnya $= 800 \text{ kg/m}^3$. Jika benda tersebut dimasukkan ke dalam air yang massa jenisnya 1.000 kg/m^3 , tentukanlah volume benda yang berada di atas permukaan air.

Jawab

Diketahui: $V_{\text{benda}} = 20 \text{ m}^3$, $\rho_{\text{benda}} = 800 \text{ kg/m}^3$, dan $\rho_{\text{air}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$.

Volume air yang dipindahkan = volume benda yang tercelup

$$F_A = \rho_{\text{air}} V_{\text{air-pindah}} g = \text{berat benda}$$

$$= \rho_{\text{air}} V_{\text{bagian tercelup}} g = mg$$

$$\rho_{\text{air}} V_{\text{bagian tercelup}} = \rho_{\text{benda}} V_{\text{benda}}$$

$$(1 \text{ kg/m}^3) (V_{\text{bagian tercelup}}) = (800 \text{ kg/m}^3) (20 \text{ m}^3)$$

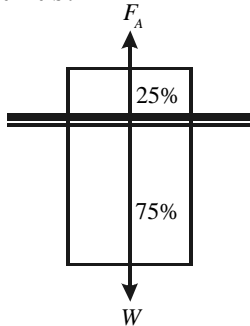
$$V_{\text{bagian tercelup}} = 16 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{muncul}} = 20 \text{ m}^3 - 16 \text{ m}^3 = 4 \text{ m}^3.$$

Contoh 7.9

Sebuah benda dimasukkan ke dalam air. Ternyata, 25% dari volume benda terapung di atas permukaan air. Berapakah massa jenis benda tersebut?

Jawab:



Diketahui: $V_{\text{benda terapung}} = 25\%$.

$$w_{\text{benda}} = F_A$$

$$mg = \rho_{\text{air}} V_{\text{benda tercelup}} g$$

$$\rho_{\text{air}} V_{\text{benda}} g = \rho_{\text{air}} V_{\text{benda tercelup}} g$$

$$\rho_{\text{benda}} = \rho_{\text{air}} \frac{V_{\text{benda tercelup}}}{V_{\text{benda}}}$$

$$= (1 \text{ g/cm}^3) \frac{75\%}{100\%} = 0,75 \text{ g/cm}^3.$$

7. Aplikasi Hukum Archimedes

Hukum Archimedes banyak diterapkan dalam kehidupan sehari-hari, di antaranya pada hidrometer, kapal laut, kapal selam, balon udara, dan galangan kapal. Berikut ini prinsip kerja alat-alat tersebut.

a. Hidrometer

Hidrometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur massa jenis zat cair. Proses pengukuran massa jenis zat cair menggunakan hidrometer dilakukan dengan cara memasukkan hidrometer ke dalam zat cair tersebut. Angka yang ditunjukkan oleh hidrometer telah dikalibrasi sehingga akan menunjukkan nilai massa jenis zat cair yang diukur. Berikut ini prinsip kerja hidrometer.

Gaya ke atas = berat hidrometer

$$F_A = w_{\text{hidrometer}}$$

$$\rho_1 V_1 g = mg$$

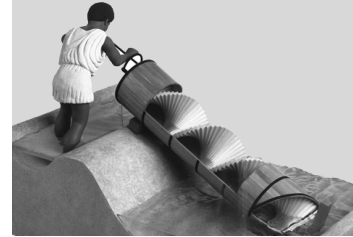
Oleh karena volume fluida yang dipindahkan oleh hidrometer sama dengan luas tangkai hidrometer dikalikan dengan tinggi yang tercelup maka dapat dituliskan

$$\rho_1 (Ah_1) = m$$

$$h_1 = \frac{m}{A\rho_1} \quad (7-14)$$

Jelajah Fisika

Penaik Air



Penaik air ini adalah alat yang diciptakan oleh Archimedes untuk menaikkan air dari sungai atau kanal. Prinsip dasar dari alat ini adalah bidang miring yang disusun menjadi pilinan (heliks). Apabila pegangan di ujung tabung di putar, pilinan tersebut akan mengangkat air ke atas.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997



Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Gambar 7.15

Hidrometer



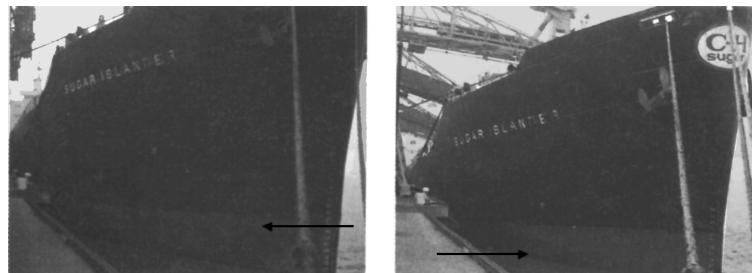
dengan: m = massa hidrometer (kg),
 A = luas tangkai (m^2),
 h_f = tinggi hidrometer yang tercelup dalam zat cair (m), dan
 ρ_f = massa jenis zat cair (kg/m^3).

Hidrometer digunakan untuk memeriksa muatan akumulator mobil dengan cara membenamkan hidrometer ke dalam larutan asam akumulator. Massa jenis asam untuk muatan akumulator penuh kira-kira = $1,25 kg/m^3$ dan mendekati $1 kg/m^3$ untuk muatan akumulator kosong.

b. Kapal Laut dan Kapal Selam

Mengapa kapal yang terbuat dari baja dapat terapung di laut? Peristiwa ini berhubungan dengan gaya apung yang dihasilkan oleh kapal baja tersebut. Perhatikan **Gambar 7.16** berikut.

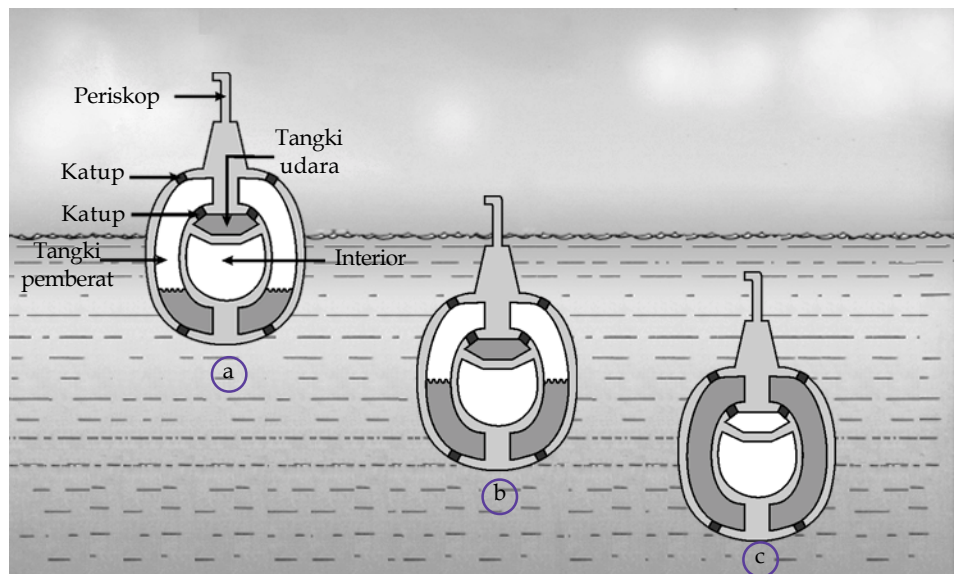
Gambar 7.16
 Kapal yang sama pada saat kosong dan penuh muatan. Volume air yang di pindahkan oleh kapal ditandai dengan tenggelamnya kapal hingga batas garis yang ditunjukkan oleh tanda panah.



Sumber: *Conceptual Physics*, 1993

Balok besi yang dicelupkan ke dalam air akan tenggelam, sedangkan balok besi yang sama jika dibentuk menyerupai perahu akan terapung. Hal ini disebabkan oleh jumlah fluida yang dipindahkan besi yang berbentuk perahu lebih besar daripada jumlah fluida yang dipindahkan balok besi. Besarnya gaya angkat yang dihasilkan perahu besi sebanding dengan volume perahu yang tercelup dan volume fluida yang dipindahkannya. Apabila gaya angkat yang dihasilkan sama besar dengan berat perahu maka perahu akan terapung. Oleh karena itu, kapal baja didesain cukup lebar agar dapat memindahkan volume fluida yang sama besar dengan berat kapal itu sendiri.

Gambar 7.17
 Penampang kapal selam ketika (a) terapung, (b) melayang, dan (c) tenggelam.



Sumber: www.yesmag.bc.ca

Tahukah Anda apa yang menyebabkan kapal selam dapat terapung, melayang, dan menyelam? Kapal selam memiliki tangki pemberat di dalam lambungnya yang berfungsi mengatur kapal selam agar dapat terapung,



melayang, atau tenggelam. Untuk menyelam, kapal selam mengisi tangki pemberatnya dengan air sehingga berat kapal selam akan lebih besar daripada volume air yang dipindahkannya. Akibatnya, kapal selam akan tenggelam. Sebaliknya, jika tangki pemberat terisi penuh dengan udara (air laut dipompakan keluar dari tangki pemberat), berat kapal selam akan lebih kecil daripada volume kecil yang dipindahkannya sehingga kapal selam akan terapung. Agar dapat bergerak di bawah permukaan air laut dan melayang, jumlah air laut yang dimasukkan ke dalam tangki pemberat disesuaikan dengan jumlah air laut yang dipindahkannya pada kedalaman yang diinginkan.

c. Balon Udara

Balon berisi udara panas kali pertama diterbangkan pada tanggal 21 November 1783. Udara panas dalam balon memberikan gaya angkat karena udara panas di dalam balon lebih ringan daripada udara di luar balon.

Balon udara bekerja berdasarkan prinsip Hukum Archimedes. Menurut prinsip ini, dapat dinyatakan bahwa sebuah benda yang dikelilingi udara akan mengalami gaya angkat yang besarnya sama dengan volume udara yang dipindahkan oleh benda tersebut.



Sumber: Microsoft Encarta, 2004

Gambar 7.18

Balon udara dapat mengambang di udara karena memanfaatkan prinsip Hukum Archimedes.

8. Tegangan Permukaan

Pernahkah Anda memerhatikan bentuk cairan obat yang keluar dari penetes obat atau bentuk raksa yang diteteskan di permukaan meja? Jika Anda perhatikan, tetesan cairan obat yang keluar dari alat penetesnya berbentuk bola-bola kecil. Demikian juga dengan bentuk air raksa yang diteteskan di permukaan meja.

Tetesan zat cair atau fluida cenderung untuk memperkecil luas permukaannya. Hal tersebut terjadi karena adanya tegangan permukaan. Apakah tegangan permukaan itu? Agar dapat memahami tentang tegangan permukaan zat cair, lakukanlah kegiatan **Mahir Meneliti 7.2** berikut.

Mahir Meneliti 7.2

Mengamati Tegangan Permukaan Zat Cair

Alat dan Bahan

1. Klip kertas atau silet
2. Bejana
3. Sabun cair

Prosedur

1. Isilah bejana dengan air.
2. Letakkanlah klip kertas atau silet dengan perlahan-lahan di permukaan air.
3. Amatilah apa yang terjadi pada klip kertas atau silet tersebut.
4. Selanjutnya, tuangkanlah sabun cair ke dalam bejana yang berisi air dan klip kertas atau silet.
5. Amatilah apa yang terjadi dengan klip kertas atau silet.
6. Bandingkanlah hasil pengamatan Anda pada langkah 5 dengan langkah 3. Apakah yang dapat Anda simpulkan dari kegiatan tersebut?
7. Dapatkah Anda menjelaskan pengaruh sabun cair terhadap tegangan permukaan?
8. Diskusikanlah dengan teman sekelompok dan guru Fisika Anda.

Contoh tegangan permukaan yang lain dapat Anda lihat jika Anda memasukkan sebuah gelang kawat yang dipasang benang ke dalam larutan sabun. Setelah dimasukkan ke dalam larutan sabun, pada gelang kawat akan



Sumber: Microsoft Encarta, 2004

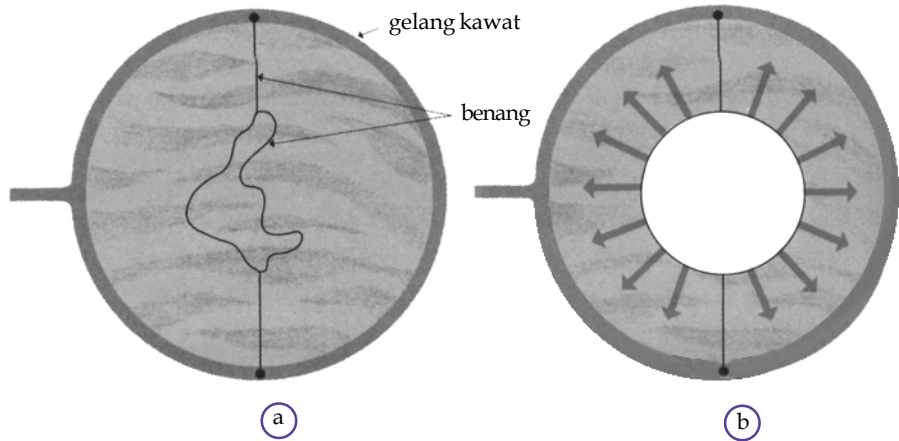
Gambar 7.19

Tegangan permukaan menyebabkan air yang jatuh pada daun membentuk permukaan sekecil mungkin. Peristiwa tersebut disebabkan adanya gaya kohesi antarmolekul air lebih besar daripada gaya adhesi antara air dan daun.



terdapat selaput tipis. Jika bagian tengah jerat benang ditusuk hingga pecah akan terlihat jerat benang yang pada mulanya berbentuk tidak beraturan, berubah menjadi berbentuk lingkaran.

Gelang kawat dan jerat benang yang dicelupkan ke dalam larutan sabun sebelum dan sesudah selaput tipis bagian tengahnya ditusuk terlihat seperti pada **Gambar 7.20** berikut.



Gambar 7.20

(a) Gelang kawat dengan bentangan benang di tengahnya ketika dimasukkan ke dalam larutan sabun. (b) Setelah gelang kawat dicelupkan ke dalam larutan sabun, benang menjadi teregang dan membentuk lingkaran.

Gambar 7.20b menunjukkan bahwa permukaan zat cair dapat dianggap berada dalam keadaan tegang sehingga zat-zat pada kedua sisi garis saling tarik-menarik.

Tegangan permukaan (γ) di dalam selaput didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya permukaan dan panjang permukaan yang tegak lurus gaya dan dipengaruhi oleh gaya tersebut.

Perhatikan **Gambar 7.21**. Gambar tersebut menunjukkan percobaan sederhana untuk melakukan pengukuran kuantitatif tentang tegangan permukaan. Seutas kawat dilengkungkan membentuk huruf U dan kawat kedua berperan sebagai peluncur yang diletakkan di ujung kawat berbentuk U. Ketika rangkaian kedua kawat tersebut dimasukkan ke dalam larutan sabun, kemudian dikeluarkan. Akibatnya, pada rangkaian kawat terbentuk selaput tipis cairan sabun. Selaput tipis tersebut akan memberikan gaya tegangan permukaan yang menarik peluncur kawat ke bagian atas kawat U (jika berat peluncur kawat sangat kecil). Ketika Anda menarik peluncur kawat ke bawah, luas permukaan selaput tipis akan membesar dan molekul-molekulnya akan bergerak dari bagian dalam cairan ke dalam lapisan permukaan.

Dalam keadaan setimbang, gaya tarik peluncur ke bawah sama dengan tegangan permukaan yang diberikan selaput tipis larutan sabun pada peluncur. Berdasarkan **Gambar 7.21**, gaya tarik peluncur ke bawah adalah

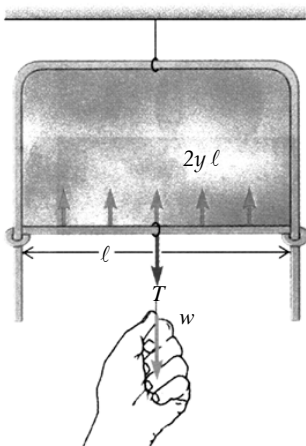
$$F = w + T$$

Jika ℓ adalah panjang peluncur kawat maka gaya F bekerja pada panjang total 2ℓ karena selaput tipis air sabun memiliki dua sisi permukaan. Dengan demikian, tegangan permukaan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya tegangan permukaan F dengan panjang d tempat gaya tersebut bekerja yang secara matematis dinyatakan dengan persamaan

$$\gamma = \frac{F}{d}$$

Oleh karena $d = 2\ell$, tegangan permukaan dinyatakan dengan persamaan

$$\gamma = \frac{F}{2\ell} \quad (7-15)$$



Gambar 7.21

Rangkaian kawat untuk mengukur tegangan permukaan selaput tipis larutan sabun. Dalam keadaan setimbang, gaya tegangan permukaan ke atas $2\gamma\ell$ sama dengan gaya tarik peluncur ke bawah $w + T$.

Tegangan permukaan suatu zat cair yang bersentuhan dengan uapnya sendiri atau udara hanya bergantung pada sifat-sifat dan suhu zat cair itu. Berikut harga tegangan permukaan berdasarkan eksperimen. Berikut ini nilai tegangan permukaan beberapa zat cair berdasarkan hasil eksperimen.

Tabel 7.2 Harga Tegangan Permukaan Berdasarkan Eksperimen

Zat Cair yang Berhubungan dengan Udara	t_1 °C	Tegangan Permukaan dyne/cm
Air	0	75,6
Air	20	72,8
Air	60	66,2
Air	100	58,9
Air sabun	20	25,0
Benzena	20	28,9
Etil Alkohol	20	22,3
Gliserin	20	63,1
Helium	-269	0,12
Karbon Tertrakhlorida	20	26,8
Minyak Zaitun	20	32,0
Neon	-247	5,15
Oksigen	-193	15,7
Raksa	20	465

Sumber: *College Physics*, 1980

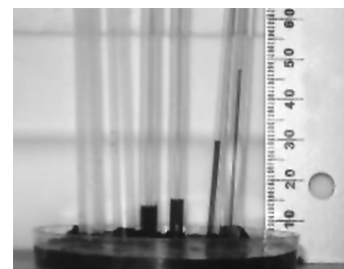
9. Kapilaritas

Kapilaritas adalah peristiwa naik atau turunnya permukaan zat cair pada pipa kapiler, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 7.22**. Pada gambar tersebut, diameter dalam pipa kapiler dari kiri ke kanan semakin kecil. Semakin kecil diameter dalam pipa kapiler, kenaikan permukaan air di dalam pipa kapiler akan semakin tinggi.

Permukaan zat cair yang membasahi dinding, misalnya air, akan naik. Adapun yang tidak membasahi dinding, seperti raksa, akan turun. Dalam kehidupan sehari-hari, contoh-contoh gejala kapiler adalah sebagai berikut. Minyak tanah naik melalui sumbu lampu minyak tanah atau sumbu kompor, dinding rumah basah pada musim hujan, air tanah naik melalui pembuluh kayu.

Peristiwa air membasahi dinding, atau raksa tidak membasahi dinding dapat dijelaskan dengan memperhatikan gaya tarik-menarik antarpartikel. Gaya tarik-menarik antarpartikel sejenis disebut *kohesi*, sedangkan gaya tarik-menarik antarpartikel tidak sejenis disebut *adhesi*. Air membasahi dinding kaca karena adanya gaya kohesi antarpartikel air yang lebih kecil daripada gaya adhesi antara partikel air dan partikel dinding kaca. Sedangkan, raksa memiliki gaya kohesi lebih besar daripada gaya adhesinya dengan dinding kaca sehingga tidak membasahi dinding kaca. Gaya adhesi air yang lebih besar dari kohesinya menyebabkan permukaan air berbentuk meniskus cekung, sedangkan gaya kohesi raksa lebih besar dari gaya adhesinya sehingga menyebabkan permukaan raksa berbentuk meniskus cembung.

Jika zat cair dimasukkan ke dalam suatu pipa kapiler, permukaan zat cair tersebut akan melengkung. Permukaan melengkung zat cair di dalam pipa disebut meniskus.



Sumber: www.wtamu.edu

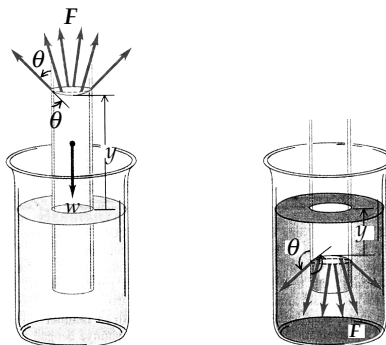
Gambar 7.22

Tabung pipa kapiler



Gambar 7.23

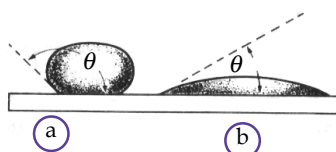
Gaya tegangan permukaan pada fluida dalam tabung kapiler:
 Fluida naik jika $\theta < 90^\circ$ dan turun jika $\theta > 90^\circ$.



Gambar 7.23 memperlihatkan gaya tegangan permukaan cairan di dalam pipa kapiler. Bentuk permukaan cairan di dalam pipa kapiler bergantung pada sudut kontak (θ) cairan tersebut. Permukaan cairan akan naik jika $\theta < 90^\circ$ dan turun jika $\theta > 90^\circ$.

Naik atau turunnya permukaan zat cair dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 mg &= F \cos \theta \\
 \rho Vg &= \gamma l \cos \theta \\
 \rho \pi r^2 hg &= \gamma 2 \pi r \cos \theta \\
 \boxed{h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}} & \quad (7-16)
 \end{aligned}$$



Gambar 7.24

Efek bertambah kecilnya sudut kontak yang ditimbulkan suatu zat pencemar.

dengan: h = kenaikan atau penurunan zat cair (m),

γ = tegangan permukaan (N/m),

g = percepatan gravitasi (m/s^2), dan

r = jari-jari alas tabung/pipa (m).

Jika suatu zat cair membasahi dinding pipa, sudut kontaknya kurang dari 90° dan zat cair itu naik hingga mencapai tinggi kesetimbangan. Zat pencemar yang ditambahkan pada zat cair akan mengubah sudut kontak itu, misalnya *detergent* mengubah sudut kontak yang besarnya lebih dari 90° menjadi lebih kecil dari 90° . Sebaliknya, zat-zat yang membuat kain tahan air (*waterproof*) menyebabkan sudut kontak air dengan kain menjadi lebih besar dari 90° . Berikut beberapa nilai sudut kontak antara zat cair dan dinding pipa kapilernya.

Tabel 7.3 Sudut Kontak

Zat Cair	Dinding	Sudut Kontak
α - Bromnaftalen ($C_{10}H_7Br$)	Gelas Biasa	5°
	Gelas Timbel	$6^\circ 45'$
	Gelas Tahan Panas (<i>Pyrex</i>)	$20^\circ 30'$
	Gelas Kuarsa	21°
Metenilena Yodida (CH_2I_2)	Gelas Biasa	29°
	Gelas Timbel	30°
	Gelas Tahan Panas (<i>Pyrex</i>)	29°
	Gelas Kuarsa	33°
Air	Parafin	107°
Raksa	Gelas Biasa	140°

Sumber: *College Physics*, 1980

Kata Kunci

- Hukum Archimedes
- Hukum Pascal
- Hukum Utama Hidrostatik
- Kapilaritas
- Sudut kontak
- Tegangan permukaan
- Tekanan hidrostatik
- Tekanan udara luar

Contoh 7.11

Suatu tabung berdiameter 0,4 cm jika dimasukkan secara vertikal ke dalam air, sudut kontaknya 60° . Jika tegangan permukaan air $0,5 \text{ N/m}$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah kenaikan air pada tabung.

Jawab

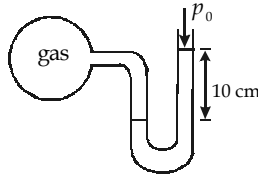
Diketahui: $d_{\text{tabung}} = 0,4 \text{ cm}$, $\theta = 60^\circ$, $\gamma = 0,5 \text{ N/m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} = \frac{2(0,5 \text{ N/m})(\cos 60^\circ)}{(10^3 \text{ kg/m}^3)(10 \text{ m/s}^2)(0,2 \times 10^{-2} \text{ m})} = 0,025 \text{ m} = 2,5 \text{ cm}.$$

Soal Penguasaan Materi 7.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Tiga buah tabung identik diisi fluida. Jika tabung pertama berisi raksa setinggi 2 cm, tabung kedua berisi air setinggi 12 cm dan tabung ketiga berisi gliserin setinggi 10 cm, tentukanlah tekanan hidrostatik di dasar tabung yang paling kecil dan paling besar ($g = 10 \text{ m/s}^2$).
2. Diketahui tekanan udara luar 1 atm (anggap 1 atm = 10^5 N dan $g = 10 \text{ m/s}^2$). Tentukanlah kedalaman danau yang tekanan total di bawah permukaannya 2 atm.
3. Pipa U seperti pada gambar dihubungkan dengan tabung yang berisi gas. Pipa U berisi raksa. Jika tekanan udara luar 1 atm, berapakah tekanan gas dalam satuan cmHg?
4. Alat pengangkat mobil yang memiliki luas pengisap dengan perbandingan 1 : 1000 digunakan untuk mengangkat mobil seberat $1,5 \times 10^4 \text{ N}$, berapakah besar gaya yang harus diberikan pada pengisap yang kecil?
5. Jika sebuah benda dicelupkan ke dalam air maka $\frac{1}{3}$ bagiannya muncul di permukaan air. Jika benda yang sama, kemudian dicelupkan ke dalam suatu



larutan lain yang memiliki massa jenis $\frac{8}{9} \text{ g/cm}^3$, berapa bagian benda yang muncul di permukaan larutan?

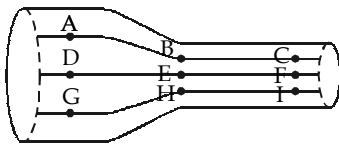
6. Sebuah benda memiliki berat 20 N. Jika benda dicelupkan ke dalam minyak ($\rho_{\text{minyak}} = 0,8 \text{ g/cm}^3$) maka berat benda seolah-olah 16 N. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, hitunglah:
 - a. gaya ke atas yang dialami benda, dan
 - b. volume benda.
7. Air raksa memiliki massa jenis $13,6 \text{ g/cm}^3$. Pada air raksa tersebut dimasukkan tabung kecil dengan diameter 5 mm. Ternyata air raksa di dalam tabung 2 cm lebih rendah dari air raksa di luar tabung. Jika sudut kontaknya 127° ($\tan 127^\circ = \frac{3}{4}$), berapakah tegangan permukaan raksa tersebut?
8. Jika sebuah pipa kapiler berdiameter 0,8 mm dice-lupkan ke dalam metanol, permukaan metanol naik sampai ketinggian 15,0 mm. Jika besar sudut kontak nol, hitunglah tegangan permukaan metanol (berat jenis metanol 0,79).

B Fluida Dinamis

Pada subbab ini Anda akan mempelajari hukum-hukum Fisika yang berlaku pada fluida bergerak (dinamis). Pada pembahasan mengenai fluida statis, Anda telah memahami bahwa hukum-hukum Fisika tentang fluida dalam keadaan statis bergantung pada massa jenis dan kedalaman titik pengamatan dari permukaan fluida. Tahukah Anda besaran-besaran yang berperan pada fluida dinamis? Untuk mengetahuinya, pelajarylaha bahasan dalam subbab ini.

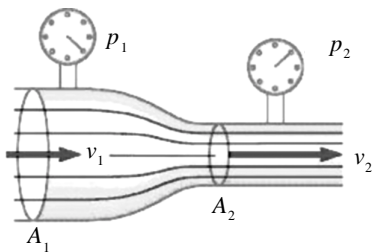
1. Persamaan Kontinuitas

Dalam mempelajari materi fluida dinamis, suatu fluida dianggap sebagai fluida ideal. Fluida ideal adalah fluida yang memiliki ciri-ciri berikut ini.



Gambar 7.25

Setiap partikel fluida ideal mengalir menurut garis alirannya masing-masing dan tidak pernah memotong garis aliran partikel lain.



Gambar 7.26

Kecepatan aliran fluida di pipa berpenampang besar (v_1) lebih kecil daripada kecepatan aliran fluida di pipa berpenampang kecil (v_2). Adapun, tekanan di pipa berpenampang besar (p_1) lebih besar daripada tekanan di pipa berpenampang kecil (p_2).

- Fluida tidak dapat dimampatkan (*incompressible*), yaitu volume dan massa jenis fluida tidak berubah akibat tekanan yang diberikan kepadanya.
- Fluida tidak mengalami gesekan dengan dinding tempat fluida tersebut mengalir.
- Kecepatan aliran fluida bersifat laminar, yaitu kecepatan aliran fluida di sembarang titik berubah terhadap waktu sehingga tidak ada fluida yang memotong atau mendahului titik lainnya.

Jika lintasan sebuah titik dalam aliran fluida ideal dilukiskan, akan diperoleh suatu garis yang disebut garis aliran (*streamline* atau *laminar flow*). Perhatikanlah **Gambar 7.25**. Suatu fluida ideal mengalir di dalam pipa. Setiap partikel fluida tersebut akan mengalir mengikuti garis aliran laminernya dan tidak dapat berpindah atau berpotongan dengan garis aliran yang lain.

Pada kenyataannya, Anda akan sulit menemukan fluida ideal. Sebagian besar aliran fluida di alam bersifat turbulen (*turbulent flow*). Garis aliran turbulen memiliki kecepatan aliran yang berbeda-beda di setiap titik.

Debit aliran adalah besaran yang menunjukkan volume fluida yang mengalir melalui suatu penampang setiap satuan waktu. Secara matematis, persamaannya dituliskan sebagai berikut.

$$Q = \frac{V}{t} = Av \quad (7-17)$$

dengan: V = volume fluida yang mengalir (m^3),
 t = waktu (s),
 A = luas penampang (m^2),
 v = kecepatan aliran (m/s), dan
 Q = debit aliran fluida (m^3/s).

Untuk fluida sempurna (ideal), yaitu zat alir yang tidak dapat dimampatkan dan tidak memiliki kekentalan (viskositas), hasil kali laju aliran fluida dengan luas penampangnya selalu tetap. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (7-18)$$

Persamaan 7.18 di atas disebut juga persamaan kontinuitas.

Contoh 7.11

Sebuah pipa lurus memiliki dua macam penampang, masing-masing dengan luas penampang 200 mm^2 dan 100 mm^2 . Pipa tersebut diletakkan secara horisontal, sedangkan air di dalamnya mengalir dari penampang besar ke penampang kecil. Jika kecepatan arus di penampang besar adalah 2 m/s , tentukanlah:

- kecepatan arus air di penampang kecil, dan
- volume air yang mengalir setiap menit.

Jawab

Diketahui: $A_1 = 200 \text{ mm}^2$, $A_2 = 100 \text{ mm}^2$, dan $v_1 = 2 \text{ m/s}$.

$$\begin{aligned} \text{a. } A_1 v_1 &= A_2 v_2 \\ (200 \text{ mm}^2) (2 \text{ m/s}) &= (100 \text{ mm}^2) v_2 \\ v_2 &= 4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } Q &= \frac{V}{t} = Av \rightarrow V = Avt \\ &= (200 \times 10^{-6} \text{ m}^2) (2 \text{ m/s}) (60 \text{ s}) = 24 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 2,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3. \end{aligned}$$

2. Persamaan Bernoulli

Perhatikanlah **Gambar 7.27**. Suatu fluida bergerak dari titik A yang ketinggiannya h_1 dari permukaan tanah ke titik B yang ketinggiannya h_2 dari permukaan tanah. Pada pelajaran sebelumnya, Anda telah mempelajari Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada suatu benda. Misalnya, pada benda yang jatuh dari ketinggian tertentu dan pada anak panah yang lepas dari busurnya. Hukum Kekekalan Energi Mekanik juga berlaku pada fluida yang bergerak, seperti pada **Gambar 7.27**. Menurut penelitian Bernoulli, suatu fluida yang bergerak mengubah energinya menjadi tekanan.

Secara lengkap, Hukum Bernoulli menyatakan bahwa jumlah tekanan, energi kinetik per satuan volume, dan energi potensial per satuan volume memiliki nilai yang sama di setiap titik sepanjang aliran fluida ideal. Persamaan matematisnya, dituliskan sebagai berikut.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{konstan} \quad (7-19)$$

atau

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (7-20)$$

dengan: p = tekanan (N/m^2),
 v = kecepatan aliran fluida (m/s),
 g = percepatan gravitasi (m/s^2),
 h = ketinggian pipa dari tanah (m), dan
 ρ = massa jenis fluida.

3. Penerapan Persamaan Bernoulli

Hukum Bernoulli diterapkan dalam berbagai peralatan yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Berikut uraian mengenai cara kerja beberapa alat yang menerapkan Hukum Bernoulli.

a. Alat Ukur Venturi

Alat ukur venturi (venturimeter) dipasang dalam suatu pipa aliran untuk mengukur laju aliran suatu zat cair.

Suatu zat cair dengan massa jenis ρ mengalir melalui sebuah pipa dengan luas penampang A_1 pada daerah (1). Pada daerah (2), luas penampang mengecil menjadi A_2 . Suatu tabung manometer (pipa U) berisi zat cair lain (raksa) dengan massa jenis ρ' dipasang pada pipa. Perhatikan **Gambar 7.28**. Kecepatan aliran zat cair di dalam pipa dapat diukur dengan persamaan.

$$v = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \quad (7-21)$$

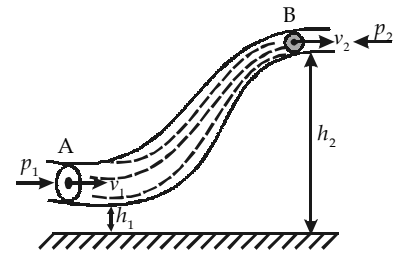
Contoh 7.12

Pipa venturi meter yang memiliki luas penampang masing-masing $8 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ dan $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ digunakan untuk mengukur kelajuan air. Jika beda ketinggian air raksa di dalam kedua manometer adalah 0,2 m dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah kelajuan air tersebut ($\rho_{\text{raksa}} = 13.600 \text{ kg/m}^3$).

Jawab

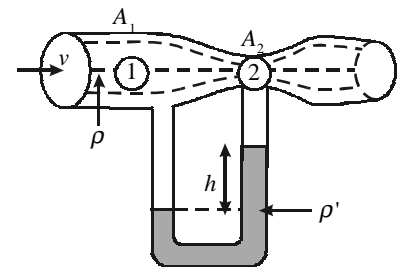
Diketahui: $A_1 = 8 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, $A_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $h = 0,2 \text{ m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$v = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} = 5 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{2(13.600 \text{ kg/m}^3 - 1.000 \text{ kg/m}^3)(10 \text{ m/s}^2)(0,2 \text{ m})}{1.000 \text{ kg/m}^3[(8 \times 10^{-2} \text{ m}^2)^2 - (5 \times 10^{-3} \text{ m}^2)^2]}} = 0,44 \text{ m/s}$$



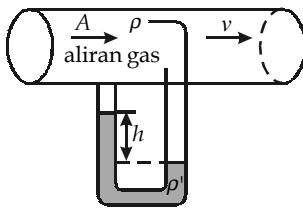
Gambar 7.27

Fluida bergerak dalam pipa yang ketinggian dan luas penampangnya yang berbeda. Fluida naik dari ketinggian h_1 ke h_2 dan kecepatannya berubah dari v_1 ke v_2 .



Gambar 7.28

Penampang pipa menyempit di A_2 sehingga tekanan di bagian pipa sempit lebih kecil dan fluida bergerak lebih lambat.



Gambar 7.29
Prinsip kerja pipa Prandtl.

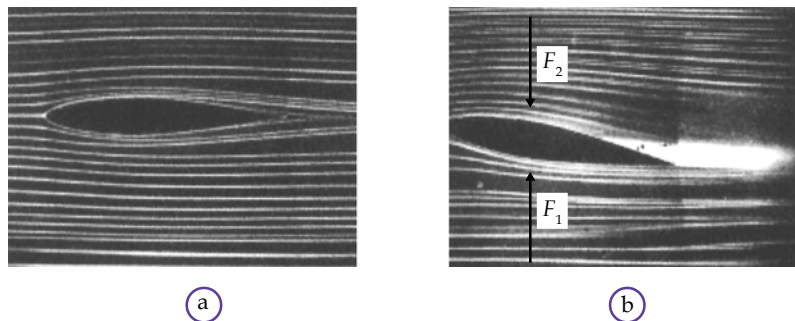
b. Tabung Pitot (Pipa Prandtl)

Tabung pitot digunakan untuk mengukur kelajuan aliran suatu gas di dalam sebuah pipa. Perhatikanlah **Gambar 7.29**. Misalnya udara, mengalir melalui tabung A dengan kecepatan v . Kelajuan udara v di dalam pipa dapat ditentukan dengan persamaan

$$v = \sqrt{\frac{2\rho'gh}{\rho}} \quad (7-22)$$

c. Gaya Angkat pada Sayap Pesawat Terbang

Penampang sayap pesawat terbang memiliki bagian belakang yang lebih tajam dan sisi bagian atasnya lebih melengkung daripada sisi bagian bawahnya. Bentuk sayap tersebut menyebabkan kecepatan aliran udara bagian atas lebih besar daripada di bagian bawah sehingga tekanan udara di bawah sayap lebih besar daripada di atas sayap. Hal ini menyebabkan timbulnya daya angkat pada sayap pesawat. Agar daya angkat yang ditimbulkan pada pesawat semakin besar, sayap pesawat dimiringkan sebesar sudut tertentu terhadap arah aliran udara. Perhatikanlah **Gambar 7.30**.



Gambar 7.30
(a) Ketika sayap pesawat horizontal, sayap tidak mengalami gaya angkat.
(b) Ketika sayap pesawat dimiringkan, pesawat mendapat gaya angkat sebesar $F_1 - F_2$.

Gaya angkat pada sayap pesawat terbang dirumuskan sebagai berikut

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{2}\rho A(v_2^2 - v_1^2) \quad (7-23)$$

dengan: $F_1 - F_2$ = gaya angkat pesawat terbang (N),
 A = luas penampang sayap pesawat (m^2),
 v_1 = kecepatan udara di bagian bawah sayap (m/s),
 v_2 = kecepatan udara di bagian atas sayap (m/s), dan
 ρ = massa jenis fluida (udara).

Contoh 7.13

Sebuah pesawat terbang bergerak dengan kecepatan tertentu sehingga udara yang melalui bagian atas dan bagian bawah sayap pesawat yang luas permukaannya 50 m^2 bergerak dengan kelajuan masing-masing 320 m/s dan 300 m/s . Berapakah besarnya gaya angkat pada sayap pesawat terbang tersebut? ($\rho_{\text{udara}} = 1,3 \text{ kg/m}^3$)

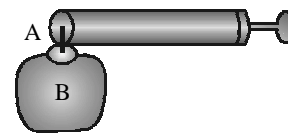
Jawab

Diketahui: $A = 50 \text{ m}^2$, $v_2 = 320 \text{ m/s}$, $v_1 = 300 \text{ m/s}$, dan $\rho_{\text{udara}} = 1,3 \text{ kg/m}^3$.

$$\begin{aligned} F_1 - F_2 &= \frac{1}{2}\rho A(v_2^2 - v_1^2) \\ &= \frac{1}{2}(1,3 \text{ kg/m}^3)(50 \text{ m}^2)(320 \text{ m/s})^2 - (300 \text{ m/s})^2 = 403.000 \text{ N} \end{aligned}$$

d. Penyemprot Nyamuk

Alat penyemprot nyamuk juga bekerja berdasarkan Hukum Bernoulli. Tinjaulah alat penyemprot nyamuk pada **Gambar 7.31**. Jika pengisap dari pompa ditekan maka udara yang melewati pipa sempit pada bagian A akan memiliki kelajuan besar dan tekanan kecil. Hal tersebut menyebabkan cairan obat nyamuk yang ada pada bagian B akan naik dan ikut terdorong keluar bersama udara yang tertekan oleh pengisap pompa.



Gambar 7.31

$p_B < p_A$ sehingga cairan obat nyamuk di B bisa memancar keluar.

e. Kebocoran Pada Dinding Tangki

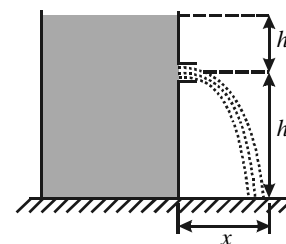
Jika air di dalam tangki mengalami kebocoran akibat adanya lubang di dinding tangki, seperti terlihat pada **Gambar 7.32**, kelajuan air yang memancar keluar dari lubang tersebut dapat dihitung berdasarkan Hukum Toricelli.

Menurut Hukum Toricelli, jika diameter lubang kebocoran pada dinding tangki sangat kecil dibandingkan diameter tangki, kelajuan air yang keluar dari lubang sama dengan kelajuan yang diperoleh jika air tersebut jatuh bebas dari ketinggian h . Perhatikanlah kembali **Gambar 7.32** dengan saksama. Jarak permukaan air yang berada di dalam tangki ke lubang kebocoran dinyatakan sebagai h_1 , sedangkan jarak lubang kebocoran ke dasar tangki dinyatakan h_2 . Kecepatan aliran air pada saat kali pertama keluar dari lubang adalah

$$v = \sqrt{2gh_1} \quad (7-24)$$

Jarak horizontal tibanya air di tanah adalah

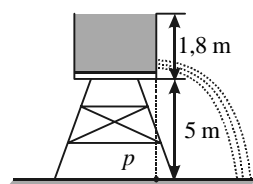
$$x = 2\sqrt{h_1 h_2} \quad (7-25)$$



Gambar 7.32

Tangki dengan sebuah lubang kecil di dindingnya. Kecepatan aliran air yang keluar dari tangki sama dengan kecepatan benda yang jatuh bebas.

Contoh 7.14



Gambar di samping menunjukkan sebuah reservoir yang penuh dengan air. Pada dinding bagian bawah reservoir itu bocor hingga air memancar sampai di tanah. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah:

- kecepatan air keluar dari bagian yang bocor;
- waktu yang diperlukan air sampai ke tanah;
- jarak pancaran maksimum di tanah diukur dari titik P.

Jawab

Diketahui: $h_1 = 1,8 \text{ m}$, $h_2 = 5 \text{ m}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

a. $v = \sqrt{2gh_1} = \sqrt{(2)(10 \text{ m/s}^2)(1,8 \text{ m})} = 6 \text{ m/s}$

b. $h_2 = \frac{1}{2}gt^2 \rightarrow t = \sqrt{\frac{2h_2}{g}} = \sqrt{\frac{(2)(5 \text{ m})}{10}} = 1 \text{ sekon}$

c. $x = vt = (6 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = 6 \text{ m}$ atau $x = 2\sqrt{(h_1)(h_2)} = 2\sqrt{(1,8 \text{ m})(5 \text{ m})} = 6 \text{ m}$

4. Viskositas

Viskositas (kekentalan) fluida menyatakan besarnya gesekan yang dialami oleh suatu fluida saat mengalir. Pada pembahasan sebelumnya, Anda telah mengetahui bahwa fluida ideal tidak memiliki viskositas. Dalam kenyataannya, fluida yang ada dalam kehidupan sehari-hari adalah fluida sejati. Oleh karena itu, bahasan mengenai viskositas hanya akan Anda temukan pada fluida sejati, yaitu fluida yang memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

- Dapat dimampatkan (kompresibel);
- Mengalami gesekan saat mengalir (memiliki viskositas);
- Alirannya turbulen.

Jelajah Fisika

Bacharuddin Jusuf Habibie



Habibie adalah seorang putra Indonesia yang dilahirkan di Pare-Pare, Sulawesi Selatan pada tanggal 25 Juli 1936. Kecermelangannya dalam ilmu pengetahuan dan teknologi dibuktikan dengan ditemukannya Teori Habibie, Faktor Habibie, dan Metode Habibie yang diaplikasikan dalam teknologi pesawat terbang. Prestasi keilmuan Habibie ini mendapat pengakuan di dunia internasional. Ia juga berhasil menciptakan pesawat terbang pertama buatan Indonesia, yaitu CN-235 dan N-250.

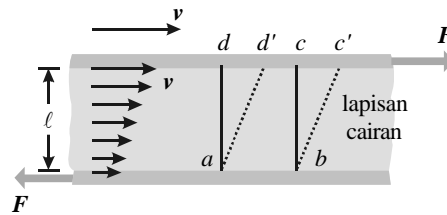
Sumber: www.jaist.ac.jp



Zat cair dan gas memiliki viskositas, hanya saja zat cair lebih kental (*viscous*) daripada gas. Dalam penggunaan sehari-hari, viskositas dikenal sebagai ukuran ketahanan oli untuk mengalir dalam mesin kendaraan. Viskositas oli didefinisikan dengan nomor SAE'S (Society of Automotive Engineer's). Contoh pada sebuah pelumas tertulis

API SERVICE SJ
SAE 20W - 50

Klasifikasi *service* minyak pelumas ini dikembangkan oleh API (*American Petroleum Institute*) yang menunjukkan karakteristik *service* minyak pelumas dari skala terendah (SA) sampai skala tertinggi (SJ) untuk mesin-mesin berbahan bakar bensin.



Gambar 7.33

Aliran laminar cairan kental

Koefisien viskositas fluida η , didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan luncur $\left(\frac{F}{A}\right)$ dengan kecepatan perubahan regangan luncur $\left(\frac{v}{\ell}\right)$. Secara matematis, persamaannya ditulis sebagai berikut.

$$\eta = \frac{\text{tegangan luncur}}{\text{cepat perubahan tegangan luncur}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{v}{\ell}}$$

atau

$$F = \eta A \frac{v}{\ell} \tag{7-26}$$

Nilai viskositas setiap fluida berbeda menurut jenis material tempat fluida tersebut mengalir. Nilai viskositas beberapa fluida tertentu dapat Anda pelajari pada **Tabel 7.2**.

Tabel 7.2 Harga Tegangan Permukaan Berdasarkan Eksperimen

Fluida	Viskositas	Keterangan
Uap Air 100°C	0,125 cP	Poiseuille dan Poise adalah satuan viskositas dinamis, juga disebut viskositas absolut. 1 Poiseuille (PI) = 10 Poise (P) = 1.000 cP
Air 99°C	0,2848 cP	
Light Machine Oil 20°C	102 cP	
Motor Oil SAE 10	50-100 cP, 65 cP	
Motor Oil SAE 20	125 cP	
Motor Oil SAE 30	150-200 cP	
Sirup Cokelat pada 20°C	25.000 cP	
Kecap pada 20°C	50.000 cP	

Sumber: *people.ece.cornell.edu*

Jelajah Fisika

Daniel Bernoulli (1700-1782)



Bernoulli adalah seorang ahli Fisika dan Matematika yang berasal dari Swiss. Penemuannya yang sangat terkenal adalah mengenai hidrodinamika, yaitu Hukum Bernoulli. Ia juga menemukan bahwa perilaku gas berhubungan dengan perubahan tekanan dan suhu gas tersebut. Penemuan tersebut mendasari teori kinetik gas.

Sumber: *people.ece.cornell.edu*

Benda yang bergerak dalam fluida kental mengalami gaya gesek yang besarnya dinyatakan dengan persamaan

$$F_f = \eta A \frac{v}{\ell} = \frac{A}{\ell} \eta v = k \eta v$$

Untuk benda berbentuk bola, $k = 6r$ (perhitungan laboratorium) sehingga, diperoleh

$$F_f = 6\pi r \eta v \quad (7-27)$$

Persamaan (7-27) dikenal sebagai Hukum Stokes.

Jika sebuah benda berbentuk bola (kelereng) jatuh bebas dalam suatu fluida kental, kecepatannya akan bertambah karena pengaruh gravitasi Bumi hingga mencapai suatu kecepatan terbesar yang tetap. Kecepatan terbesar yang tetap tersebut dinamakan *kecepatan terminal*.

Pada saat kecepatan terminal tercapai, berlaku keadaan

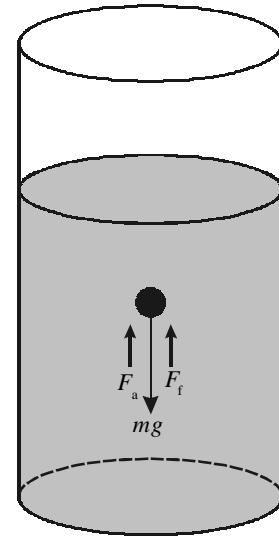
$$\begin{aligned} \sum F &= 0 \\ F_f + F_A &= mg \\ F_f &= mg - F_A \\ 6\pi r \eta v_T &= \rho_b v_b g - \rho_f v_b g \\ &= (\rho_b - \rho_f) V_b g \\ v_T &= \frac{g v_b (\rho_b - \rho_f)}{6\pi \eta r} \end{aligned}$$

Pada benda berbentuk bola, volumenya $v_b = \frac{4}{3} \pi r^3$ sehingga diperoleh persamaan

$$v_T = \frac{g \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) (\rho_b - \rho_f)}{6\pi \eta r}$$

$$v_T = \frac{2 r^2 g}{9 \eta} (\rho_b - \rho_f) \quad (7-28)$$

dengan: v_t = kecepatan terminal (m/s),
 F_f = gaya gesek (N),
 F_A = gaya ke atas (N),
 ρ_b = massa jenis bola (kg/m^3), dan
 ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3).



Gambar 7.34

Sebuah bola jatuh bebas ke dalam fluida yang memiliki viskositas tertentu.

Kata Kunci

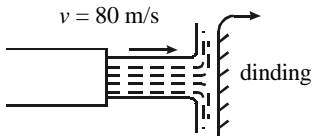
- Fluida ideal
- Fluida sejati
- Hukum Stokes
- Persamaan kontinuitas
- Persamaan Bernoulli
- Viskositas

Soal Penguasaan Materi 7.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sejumlah fluida ideal dengan kecepatan 3 m/s di dalam pipa bergaris tengah 4 cm masuk ke dalam pipa bergaris tengah 8 cm. Tentukanlah kecepatan fluida dalam pipa bergaris tengah 8 cm.
- Sebuah pipa lurus memiliki dua macam penampang, masing-masing 0,1 m² dan 0,05 m². Pipa tersebut diletakkan miring sehingga penampang kecil berada 2 m lebih tinggi daripada penampang besar. Tekanan air pada penampang kecil $2 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$ dan kelajuan air pada penampang besar 5 m/s, tentukanlah:
 - laju air pada penampang kecil dan tekanan air pada penampang besar, dan
 - volume air yang melalui pipa setiap menit.
- Sebuah pancuran yang diameter lubangnya 1 cm terletak pada permukaan tanah. Pancuran tersebut dibuat untuk menyemburkan kolom air vertikal ke atas setinggi 16 m. Untuk keperluan itu pipa pancur dengan diameter 4 cm dihubungkan ke sebuah pompa air yang terletak 10 m di bawah tanah. Jika besar tekanan udara luar 1 atm, berapakah tekanan pompa tersebut?

4.



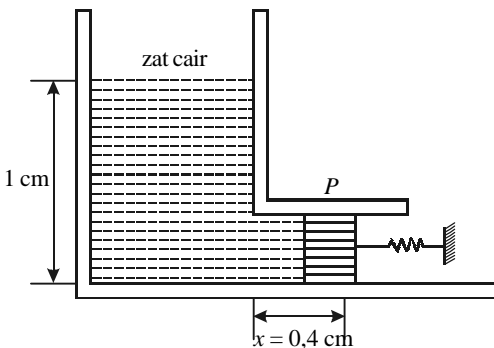
Sebuah pipa memancarkan air dengan kecepatan 80 cm/s dengan debit 30 cm³/s sehingga mengenai dinding. Setelah mengenai dinding, air bergerak sejajar dengan dinding, seperti tampak pada gambar. Jika massa 1cm³ air adalah 1 gram, tentukanlah besar gaya yang dialami dinding.

5. Air mengalir dengan kecepatan 3 m/s dalam sebuah pipa horizontal pada tekanan 200 kPa. Pipa mengecil menjadi setengah diameternya semula.

- Berapakah kelajuan aliran di bagian pipa yang sempit?
- Berapakah tekanan di bagian pipa yang sempit?
- Bagaimanakah perbandingan kelajuan aliran air di kedua bagian pipa tersebut?

- Tentukanlah koefisien viskositas udara apabila kecepatan terminal satu tetes air hujan berdiameter 0,5 mm yang jatuh adalah 7,5 m/s. (Diketahui massa jenis udara = 1,3 kg/m³ dan percepatan gravitasi Bumi = 10 m/s²)
- Sebuah kelereng berdiameter 1 cm dijatuhkan secara bebas dalam oli yang massa jenisnya = 0,8 g/cm³. Jika koefisien kekentalan oli 0,03 Pas, massa jenis kelereng 2,6 g/cm³ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah kecepatan terbesar yang dicapai kelereng?

Pembahasan Soal SPMB



Untuk menentukan massa jenis zat cair, dibuat rangkaian alat seperti gambar di atas. Pengisap P dapat bergerak bebas dengan luas penampang 1 cm². Jika konstanta pegas = 100 N/m dan pegas tertekan sejauh 0,4 cm, massa jenis zat cair adalah

- 400 kg/m³
- 500 kg/m³
- 750 kg/m³
- 800 kg/m³
- 1.000 kg/m³

Penyelesaian

Pegas tertekan oleh gaya yang besarnya

$$F = k \Delta x$$

$$F = (100 \text{ N/m})(0,4 \times 10^{-2} \text{ m})$$

$$F = 0,4 \text{ N}$$

Tekanan zat cair (p):

$$p = \rho gh$$

$p = \frac{F}{A}$ merupakan besar tekanan zat cair yang menekan pegas, dengan F = gaya yang menekan pegas.

$$\rho gh = \frac{F}{A}$$

$$\rho = \frac{F}{Agh}$$

$$\rho = \frac{0,4 \text{ N}}{(1 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(10 \text{ m/s}^2)(1 \text{ m})}$$

$$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$$

Jawab: a

Soal UMPTN IPA 2001

Rangkuman

- Tekanan** adalah gaya yang bekerja pada suatu permukaan dibagi luas permukaan tersebut.

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{N/m}^2 = \text{Pascal})$$

- Tekanan hidrostatik** adalah tekanan yang disebabkan oleh fluida tak bergerak.

$$p_h = \rho gh \quad (\text{N/m}^2)$$

Apabila tekanan udara luar (ρ_0) diperhitungkan, tekanan hidrostatik ditulis

$$p_A = p_0 + \rho gh$$

- Hukum Pascal** menyatakan tentang sifat fluida yang meneruskan tekanan ke segala arah sama besar.

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

- Hukum Archimedes** menyatakan bahwa gaya ke atas yang dialami oleh sebuah benda dalam suatu fluida sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut.

$$F_A = \rho_f V_f g$$

5. **Tegangan permukaan** (γ) terjadi karena adanya gaya kohesi dan adhesi pada fluida. Secara matematis, dinyatakan dengan persamaan

$$\gamma = \frac{F}{2\ell}$$

6. **Kapilaritas** adalah peristiwa naik atau turunnya permukaan zat cair pada pipa kapiler. Gaya kohesi dan adhesi menyebabkan timbulnya meniskus cekung atau meniskus cembung pada permukaan fluida. Persamaan kapilaritas tersebut adalah

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r}$$

7. **Fluida ideal** adalah fluida yang tidak dapat dimampatkan, tidak mengalami gaya gesek ketika mengalir, dan alirannya stasioner.

8. **Fluida sejati** adalah fluida yang memiliki sifat dapat dimampatkan, memiliki viskositas, dan alirannya tidak stasioner (turbulen).

9. Persamaan kontinuitas menyatakan bahwa debit air (Q) selalu tetap.

$$Q_1 = Q_2 \\ A_1 v_1 = A_2 v_2$$

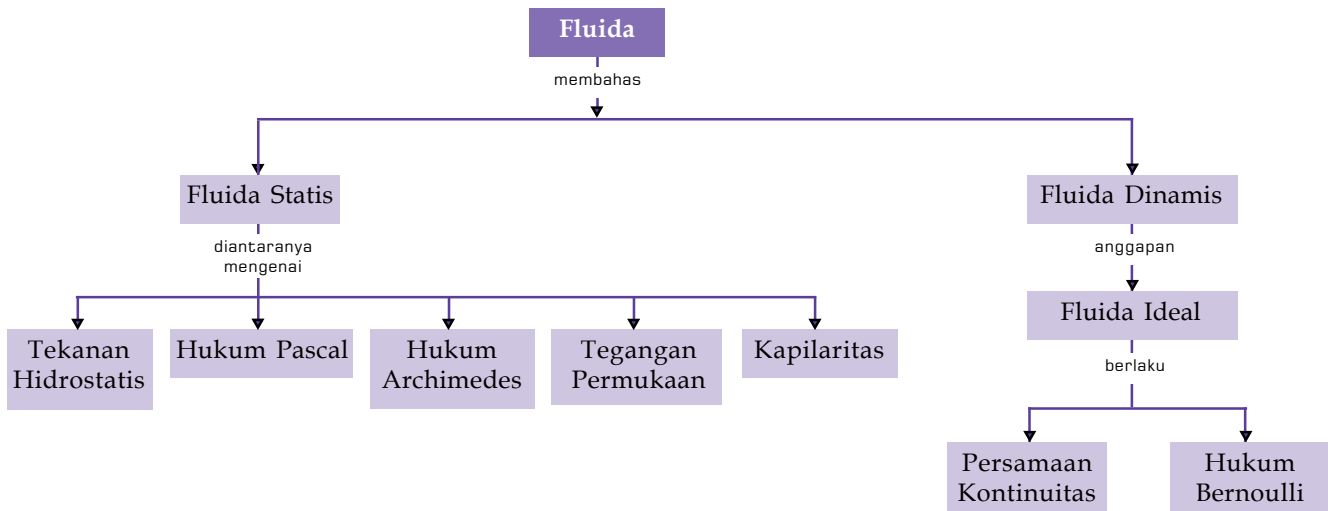
10. **Hukum Bernoulli** menyatakan bahwa tekanan, energi kinetik dan energi potensial per satuan volume fluida yang mengalir, nilainya sama di setiap titik aliran fluida.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{konstan}$$

11. **Viskositas** (kekentalan) suatu fluida dirumuskan dalam Hukum Stokes sebagai berikut.

$$F = 6\pi\eta r.$$

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Fluida, Anda dapat menganalisis hukum-hukum yang berhubungan dengan fluida statis, fluida dinamis, serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari. Jika Anda belum mampu menganalisis, Anda belum menguasai materi bab Fluida dengan baik. Rumuskan materi yang belum

Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

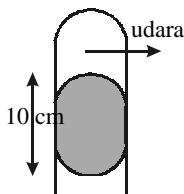
Evaluasi Materi Bab 7

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Tekanan udara luar sekitar 1×10^5 Pa. Besarnya gaya yang dilakukan udara dalam kamar pada kaca jendela berukuran $40 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ adalah
 - a. $1,2 \times 10^4 \text{ N}$
 - b. $1,6 \times 10^4 \text{ N}$
 - c. $2,4 \times 10^4 \text{ N}$
 - d. $3,2 \times 10^4 \text{ N}$
 - e. $6,4 \times 10^4 \text{ N}$

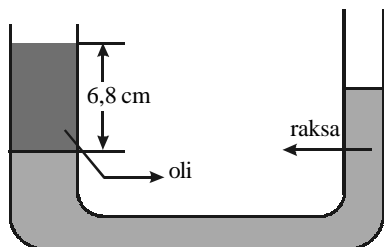
2. Pada sebuah tabung dimasukkan air setinggi 8 cm, kemudian minyak setinggi 2 cm ($\rho_m = 0,8 \text{ g/cm}^3$). Besar tekanan hidrostatis di dasar tabung tersebut adalah ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)
 - a. 695 Pa
 - b. 768 Pa
 - c. 856 Pa
 - d. 941 Pa
 - e. 1000 Pa

3. Gambar berikut menunjukkan sebatang pipa kaca yang berisi udara. Ujung atas pipa tertutup, sedangkan ujung bawah pipa tertutup oleh raksa yang tingginya 10 cm. Jika tekanan udara di luar 76 cmHg, tekanan udara di dalam pipa kaca adalah sebesar



- a. 0 cmHg
- b. 10 cmHg
- c. 66 cmHg
- d. 76 cmHg
- e. 86 cmHg

4.



Perhatikan gambar bejana di atas. Jika diketahui massa jenis oli $0,8 \text{ g/cm}^3$ dan massa jenis raksa sebesar $13,6 \text{ g/cm}^3$, perbedaan tinggi permukaan raksa dengan oli adalah

- a. 62 mm
 - b. 64 mm
 - c. 66 mm
 - d. 68 mm
 - e. 70 mm
5. Alat pengangkat mobil memiliki luas pengisap masing-masing $0,10 \text{ m}^2$ dan $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Alat tersebut digunakan untuk mengangkat mobil yang memiliki berat $15 \times 10^3 \text{ N}$. Gaya yang harus diberikan pada pengisap yang kecil adalah
 - a. 10 N
 - b. 20 N
 - c. 30 N
 - d. 45 N
 - e. 60 N
 6. Sebuah benda jika ditimbang di udara memiliki berat 4,9 N. Akan tetapi jika ditimbang dalam minyak tanah ($\rho_m = 0,8 \text{ g/cm}^3$) beratnya menjadi 4,74 N. Gaya ke atas yang dialami benda tersebut adalah

- a. 39,2 N
- b. 16,0 N
- c. 9,87 N
- d. 2 N
- e. 0,16 N

7. Massa sebuah benda adalah 300 gram. Jika benda ditimbang dalam air, massa benda itu seolah-olah menjadi 225 gram. Jika benda ditimbang dalam suatu cairan lain, massanya seolah-olah menjadi 112,5 g. Jika kerapatan massa air 1 g/cm^3 , kerapatan massa cairan tersebut adalah

- a. $0,83 \text{ g/cm}^3$
- b. $1,20 \text{ g/cm}^3$
- c. $1,25 \text{ g/cm}^3$
- d. $2,50 \text{ g/cm}^3$
- e. $2,67 \text{ g/cm}^3$

8. Sebuah balon udara berisi gas hidrogen sebanyak 600 m^3 yang massa jenisnya $= 0,09 \text{ kg/m}^3$ dan massa balon $= 250 \text{ kg}$. Jika massa jenis udara di sekitar balon $= 1,2 \text{ kg/m}^3$, balon udara tersebut mampu mengangkat beban bermassa

- a. 240 kg
- b. 250 kg
- c. 304 kg
- a. 416 kg
- e. 720 kg

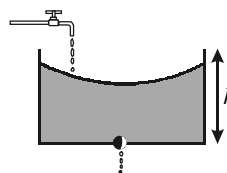
9. Sebuah tabung berdiameter 0,4 cm dimasukkan secara vertikal ke dalam air. Sudut kontak antara dinding tabung dan permukaan air 60° . Jika tegangan permukaan air $= 0,5 \text{ N/m}$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, air pada tabung akan naik setinggi

- a. 0,015 m
- b. 0,025 m
- c. 0,035 m
- d. 0,045 m
- e. 0,055 m

10. Sebuah pipa air luas penampangnya $= 0,5 \text{ cm}^2$. Jika kecepatan aliran air $= 1 \text{ m/s}$, volume air yang keluar selama 5 menit adalah

- a. $0,015 \text{ m}^3$
- b. $0,15 \text{ m}^3$
- c. $1,5 \text{ m}^3$
- d. 15 m^3
- e. 150 m^3

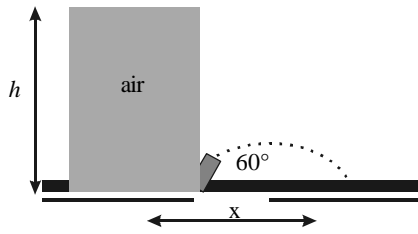
11.



Air mengalir ke dalam bak dengan debit $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Akan tetapi, bak tersebut bocor di bagian bawah melalui lubang yang luasnya 1 cm^2 . Ketinggian maksimum air dalam bak adalah

- a. 5 cm
- b. 4 cm
- c. 3 cm
- d. 2 cm
- e. $\frac{1}{2} \text{ cm}$

12. Pada bagian bawah sebuah tangki air terdapat lubang sehingga air memancar keluar membentuk sudut 60° seperti terlihat pada gambar.



Jika jarak pancar air $x = 80\sqrt{3}$ cm, untuk $g = 10 \text{ m/s}^2$, tinggi air (h) dalam tangki adalah

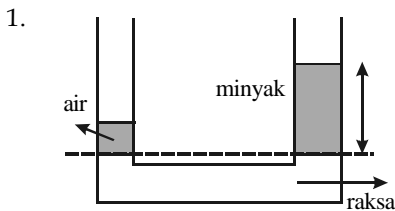
- a. 20 cm
- b. 40 cm
- c. 60 cm
- d. 80 cm
- e. 100 cm

13. Gaya angkat pada pesawat terbang timbul karena:
1. Tekanan udara di depan sayap lebih besar daripada di belakang sayap.
 2. Kecepatan udara di atas sayap lebih besar daripada di bawah sayap.
 3. Kecepatan udara di belakang sayap lebih besar daripada di depan sayap.
 4. Tekanan udara di atas sayap lebih kecil daripada di bawah sayap.

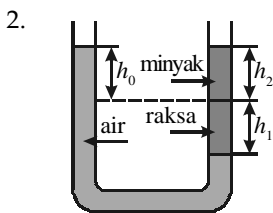
Pernyataan yang benar adalah

- a. 1 dan 2
- b. 1 dan 3
- c. 1, 3, dan 4
- d. 2, 3, dan 4
- e. 2 dan 4

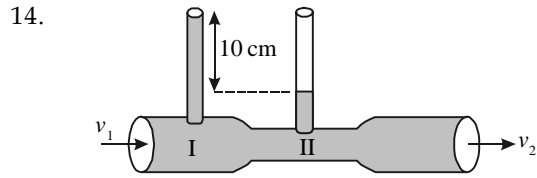
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.



Perhatikan gambar bejana di atas. Diketahui massa jenis minyak = $0,8 \text{ g/cm}^3$, massa jenis raksa = $13,6 \text{ g/cm}^3$, dan massa jenis air = 1 g/cm^3 . Jika perbedaan tinggi permukaan minyak dan air adalah 5 cm, berapakah tinggi air dan tinggi minyak?



Perhatikan gambar di atas. Massa jenis minyak = $0,8 \text{ g/cm}^3$, massa jenis raksa = $13,6 \text{ g/cm}^3$, dan massa jenis air = 1 g/cm^3 . Jika tinggi $h_1 = 1 \text{ cm}$ dan $h_2 = 0 \text{ cm}$, berapakah besar $h_0 = ?$



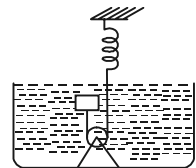
Air mengalir dalam venturimeter seperti tampak pada gambar di atas. Jika kecepatan aliran air pada penampang I sebesar 2 m/s , dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, besar kecepatan aliran air pada penampang II adalah

- a. 2 m/s
- b. $\sqrt{5} \text{ m/s}$
- c. $\sqrt{6} \text{ m/s}$
- d. 3 m/s
- e. 5 m/s

15. Air terjun setinggi 10 m digunakan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) berdaya listrik 1.000 W. Jika efisiensi generator 80% dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, debit air yang sampai ke kincir adalah

- a. $12,5 \text{ l/s}$
- b. 251 l/s
- c. $27,5 \text{ l/s}$
- d. 125 l/s
- e. 250 l/s

3. Sebuah gabus dicelupkan ke dalam air seperti terlihat pada gambar berikut. Volume gabus 250 cm^3 dan massa jenis gabus adalah $0,2 \text{ g/cm}^3$. Oleh karena pengaruh tarikan gabus, pegas meregang sebesar $0,2 \text{ cm}$. Tentukanlah konstanta pegas tersebut.



4. Sebuah pipa silinder yang lurus memiliki dua jenis penampang berdiameter masing-masing 20 mm dan 10 mm. Pipa tersebut diletakkan secara horizontal dan air di dalamnya mengalir dari arah penampang yang besar ke penampang yang lebih kecil. Jika kecepatan arus di penampang besar adalah 2 m/s , tentukanlah kecepatan arus air di penampang kecil.
5. Pesawat terbang modern dirancang untuk gaya angkat sebesar 1.300 N/m^2 per luas penampang sayap. Anggap udara mengalir melalui sayap sebuah pesawat terbang dengan garis arus aliran udara. Jika kecepatan aliran udara yang melalui bagian yang lebih rendah adalah 100 m/s dan massa jenis udara $1,3 \text{ kg/m}^3$, berapakah kecepatan udara pada sisi atas sayap untuk menghasilkan gaya angkat 1.300 N/m^2 pada setiap sayap?

Kegiatan Semester 2

Konsep Fisika yang Anda pelajari dapat Anda aplikasikan dalam kehidupan sehari-hari. Jika Anda jeli dalam mengamati lingkungan Anda secara saksama, Anda akan menemukan suatu alat yang cara kerjanya menggunakan konsep Fisika. Tentu saja, dalam melakukan hal tersebut diperlukan kerja keras, ketelitian, dan sikap tidak mudah menyerah.

Dalam kegiatan Semester 2 ini, Anda dan teman-teman kelompok Anda akan melakukan kegiatan yang dapat menggabungkan antara kesenangan membuat perahu motor mainan dan aplikasi konsep Fisika tentang kesetimbangan gaya (Bab 6), gaya Archimedes (Bab 7), dan rangkaian listrik sederhana (Kelas X). Bahan utama untuk membuat perahu motor mainan ini adalah bahan-bahan bekas sederhana yang mudah ditemukan di lingkungan sekitar Anda.

Tujuan

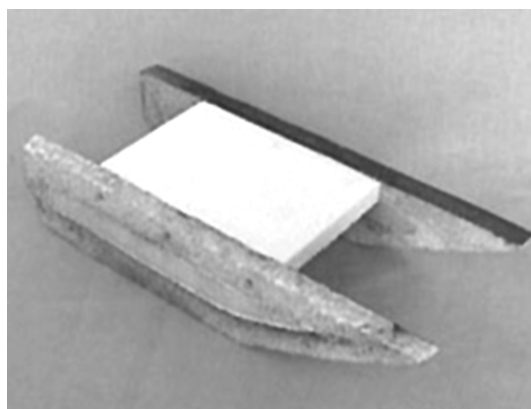
Memahami dan mengaplikasikan konsep Fisika mengenai kesetimbangan gaya, gaya Archimedes, dan rangkaian listrik sederhana untuk membuat perahu motor sederhana.

Alat dan Bahan

1. Sebuah sakelar sederhana
2. Sebuah motor listrik
3. Tempat baterai
4. Kipas pendorong
5. Baut, paku, selotip, dan kabel
6. *Styrofoam* dan papan
7. Pisau atau *cutter*
8. Lem putih atau lem kayu
9. Cat minyak

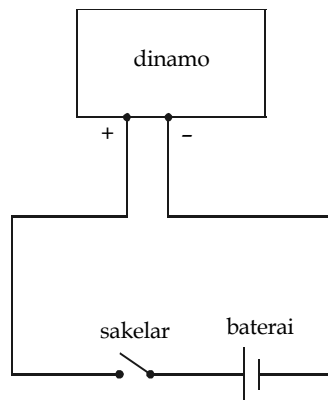
Prosedur

1. Potonglah bahan *styrofoam* menurut bentuk bagian-bagian perahu motor. Anda juga dapat membuat bentuk-bentuk perahu kreasi Anda sendiri. Kemudian, tempelkanlah setiap bagian perahu motor Anda sehingga terlihat seperti tampak pada gambar berikut.

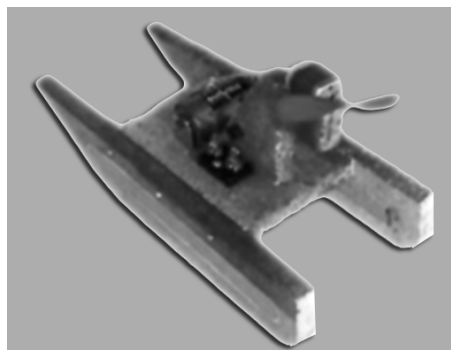
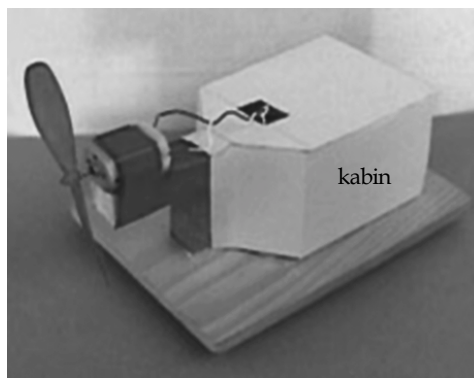
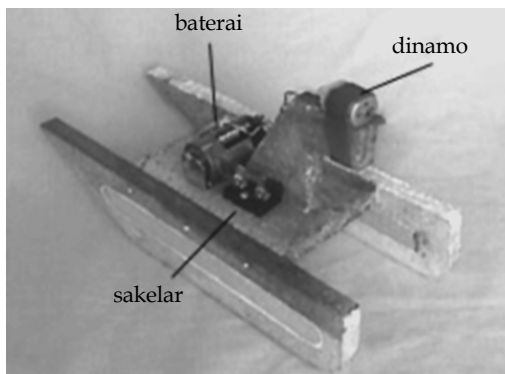


Sumber: www.MiniScience.com

2. Rangkailah motor listrik, baterai, dan sakelar menurut skema rangkaian listrik berikut.



Kemudian, pasanglah rangkaian listrik tersebut pada papan kayu menggunakan baut. Pakukanlah papan tersebut ke kaki perahu yang terbuat dari bahan *styrofoam*. Agar rangkaian listrik perahu Anda aman dari air, tutuplah rangkaian listrik tersebut dengan kabin yang terbuat dari bahan *styrofoam* tipis atau karton.



Sumber: www.MiniScience.com



3. Anda dapat mengatur letak motor listrik dan kipas pendorongnya di tempat yang Anda sukai, namun perhatikanlah bahwa penempatan baterai dan motor listrik tersebut harus tetap menjaga kesetimbangan perahu motor.
4. Sebagai sentuhan akhir, Anda dapat mengecat perahu motor hasil karya Anda dengan cat minyak.

Menyusun Laporan

Setelah Anda menyelesaikan kegiatan ini, buatlah laporan yang menceritakan hasil kegiatan Anda. Laporan tersebut terdiri atas pendahuluan, teori dasar, cara pembuatan, analisis pembahasan berkaitan dengan konsep kesetimbangan gaya, gaya Archimedes, dan rangkaian listrik pada perahu yang Anda buat, kesimpulan dan saran, serta daftar pustaka.

Anda diharapkan dapat membuat laporan sebaik mungkin, agar orang lain yang membaca laporan Anda dapat mengerti dan memahami isi laporan Anda. Jika Anda mengalami kesulitan untuk menyusun laporan tersebut, Anda dapat mendiskusikannya dengan guru Fisika Anda.

Mempresentasikan Hasil Kegiatan

Setelah Anda berhasil membuat perahu motor tersebut dan menyusun laporannya, presentasikanlah hasil karya Anda tersebut di depan kelas. Dalam mempresentasikan perahu motor hasil karya Anda tersebut, Anda diharapkan mampu menjawab pertanyaan dari teman-teman sekelas Anda dan mendiskusikannya dengan guru Fisika Anda.



B a b 8

Teori Kinetik Gas



Sumber: *encarta encyclopedia*

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep termodinamika dalam mesin kalor dengan cara mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik.

Seseorang yang ingin menerbangkan sebuah balon udara-panas akan memanaskan udara di dalam balon tersebut agar balon dapat terbang ke angkasa. Pemanasan tersebut mengakibatkan temperatur udara di dalam balon meningkat dan memaksa sebagian udara keluar dari bagian bawah balon yang terbuka. Tahukah Anda mengapa balon udara-panas tersebut hanya dapat terbang saat udara di dalamnya dipanaskan?

Penggunaan balon udara-panas merupakan salah satu contoh aplikasi dari sifat gas saat energi kinetiknya meningkat dan kerapatan rata-ratanya sama dengan udara di sekeliling balon sehingga balon dapat melayang di langit. Apa sajakah sifat-sifat gas tersebut? Bagaimanakah aplikasi sifat tersebut dalam teknologi? Anda dapat mengetahui jawaban pertanyaan tersebut pada pembahasan Bab 8 mengenai teori kinetik gas.

- A. Persamaan Gas Ideal**
- B. Prinsip Ekuipartisi Energi**



A Persamaan Gas Ideal

Soal Pramateri

1. Ketika Anda memompa ban sepeda, Anda memasukkan gas atau udara ke dalam ban dengan cara menekan piston pompa. Menurut pemahaman Anda, besaran Fisika apakah yang dapat diukur pada proses tersebut?
2. Udara dapat bergerak dari tempat bersuhu tinggi ke tempat bersuhu rendah. Menurut Anda, mengapa hal tersebut dapat terjadi?

1. Gas Ideal

Anda tentu telah mengetahui bahwa setiap zat, baik itu zat padat, cair, maupun gas, terdiri atas materi-materi penyusun yang disebut atom. Sebagai partikel penyusun setiap jenis zat yang ada di Bumi dan di seluruh alam semesta, atom-atom berukuran sangat kecil dan tidak dapat dilihat, walaupun menggunakan alat yang paling canggih. Oleh karena itu, gaya yang ditimbulkan oleh interaksi antarpartikel dan energi setiap partikel hanya dapat diamati sebagai sifat materi yang dibentuk oleh sejumlah partikel tersebut secara keseluruhan. Analogi pernyataan ini dijelaskan sebagai berikut. Misalkan, Anda memiliki sejumlah gas oksigen yang berada di dalam tabung tertutup. Jika Anda ingin mengetahui gaya-gaya yang bekerja pada setiap atom oksigen, Anda hanya dapat mengamati perilaku seluruh gas oksigen yang ada di dalam tabung dan menganggap bahwa hasil pengamatan Anda sebagai penjumlahan dari gaya-gaya yang bekerja pada setiap atom gas oksigen.

Sifat mekanika gas yang tersusun atas sejumlah besar atom-atom atau molekul-molekul penyusunnya dijelaskan dalam teori kinetik gas. Dalam menjelaskan perilaku gas dalam keadaan tertentu, teori kinetik gas menggunakan beberapa pendekatan dan asumsi mengenai sifat-sifat gas yang disebut *gas ideal*.

Sifat-sifat gas ideal dinyatakan sebagai berikut.

1. Jumlah partikel gas sangat banyak, tetapi tidak ada gaya tarik menarik (interaksi) antarpartikel.
2. Setiap partikel gas selalu bergerak dengan arah sembarang atau acak.
3. Ukuran partikel gas dapat diabaikan terhadap ukuran ruangan tempat gas berada.
4. Setiap tumbukan yang terjadi antarpartikel gas dan antara partikel gas dan dinding bersifat lenting sempurna.
5. Partikel gas terdistribusi merata di dalam ruangan.
6. Berlaku Hukum Newton tentang gerak.

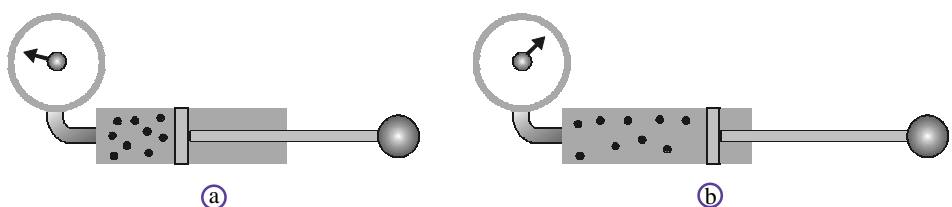
Pada kenyataannya, tidak ditemukan gas yang memenuhi kriteria gas ideal. Akan tetapi, sifat itu dapat didekati oleh gas pada temperatur tinggi dan tekanan rendah.

2. Hukum-Hukum tentang Gas

Teori kinetik gas membahas hubungan antara besaran-besaran yang menentukan keadaan suatu gas. Jika gas yang diamati berada di dalam ruangan tertutup, besaran-besaran yang menentukan keadaan gas tersebut adalah volume (V), tekanan (p), dan suhu gas (T). Menurut proses atau perlakuan yang diberikan pada gas, terdapat tiga jenis proses, yaitu isothermal, isobarik, dan isokhorik. Pembahasan mengenai setiap proses gas tersebut dapat Anda pelajari dalam uraian berikut.

a. Hukum Boyle

Perhatikanlah Gambar 8.1 berikut.



Gambar 8.1

- (a) Gas di dalam tabung memiliki volume V_1 dan tekanan P_1 .
- (b) Volume gas di dalam tabung diperbesar menjadi V_2 sehingga tekanannya P_2 menjadi lebih kecil.

Suatu gas yang berada di dalam tabung dengan tutup yang dapat diturunkan atau dinaikkan, sedang diukur tekanannya. Dari gambar tersebut dapat Anda lihat bahwa saat tuas tutup tabung ditekan, volume gas akan mengecil dan mengakibatkan tekanan gas yang terukur oleh alat pengukur menjadi membesar. Hubungan antara tekanan (p) dan volume (V) suatu gas yang berada di ruang tertutup ini diteliti oleh Robert Boyle.

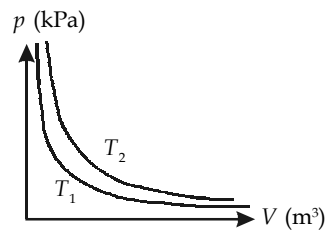
Saat melakukan percobaan tentang hubungan antara tekanan dan volume gas dalam suatu ruang tertutup, **Robert Boyle** menjaga agar tidak terjadi perubahan temperatur pada gas (isotermal). Dari data hasil pengamatannya, Boyle mendapatkan bahwa hasil kali antara tekanan (p) dan volume (V) gas pada suhu tetap adalah konstan. Hasil pengamatan Boyle tersebut kemudian dikenal sebagai Hukum Boyle yang secara matematis dinyatakan dengan persamaan

$$pV = \text{konstan} \quad (8-1)$$

atau

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (8-2)$$

Dalam bentuk grafik, hubungan antara tekanan (p) dan volume (V) dapat dilihat pada **Gambar 8.2**.

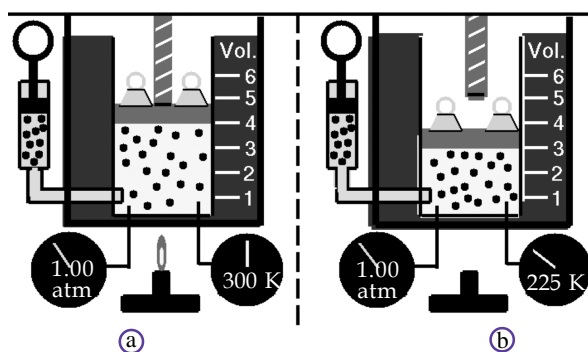


Gambar 8.2

Grafik p - V suatu gas pada dua suhu yang berbeda, di mana $T_1 > T_2$.

b. Hukum Gay-Lussac

Gay-Lussac, seorang ilmuwan asal Prancis, meneliti hubungan antara volume gas (V) dan temperatur (T) gas pada tekanan tetap (isobarik). Perhatikanlah **Gambar 8.3**.



Sumber: www.nasa.gov

Gambar 8.3

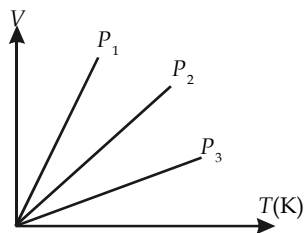
Pada tekanan 1 atm, (a) gas bervolume 4 m³ memiliki temperatur 300 K, sedangkan (b) gas bervolume 3 m³ memiliki temperatur 225 K.

Misalnya, Anda memasukkan gas ideal ke dalam tabung yang memiliki tutup piston di atasnya. Pada keadaan awal, gas tersebut memiliki volume 4 m³ dan temperatur 300 K.

Jika kemudian pemanas gas tersebut dimatikan dan gas didinginkan hingga mencapai temperatur 225 K, volume gas itu menurun hingga 3 m³. Jika Anda membuat perbandingan antara volume terhadap suhu pada kedua

keadaan gas tersebut $\left(\frac{V}{T}\right)$, Anda akan mendapatkan suatu nilai konstan

$$\left(\frac{4}{300} = \frac{3}{225} = 0,013\right).$$



Gambar 8.4

Grafik hubungan $V-T$.

Berdasarkan hasil penelitiannya mengenai hubungan antara volume dan temperatur gas pada tekanan tetap, Gay-Lussac menyatakan Hukum Gay-Lussac, yaitu hasil bagi antara volume (V) dengan temperatur (T) gas pada tekanan tetap adalah konstan. Persamaan matematisnya dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \quad (8-3)$$

atau

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (8-4)$$

Agar Anda dapat lebih memahami Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac, lakukanlah kegiatan **Mahir Meneliti 8.1**.

Mahir Meneliti 8.1

Membuktikan Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac

Alat dan Bahan

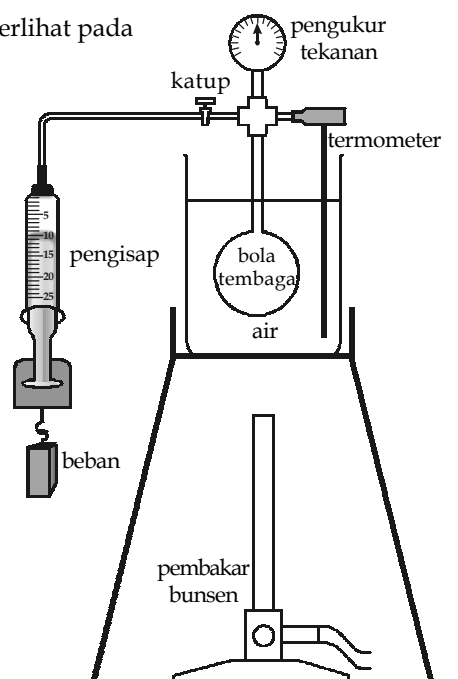
1. Bola tembaga dengan katup dan alat pengukur tekanan
2. Alat pengisap
3. Pembakar bunsen
4. Gelas kimia
5. Penyangga kaki tiga
6. Termometer
7. Beban dan jangka sorong
8. Klem dan statip

Prosedur

A. Percobaan Gay-Lussac

1. Susunlah alat-alat percobaan, seperti terlihat pada gambar.
2. Bukalah katup, kemudian tutuplah katup pada bola tembaga pada suhu kamar. Catatlah nilai tekanan gas di dalam bola tembaga yang ditunjukkan oleh alat pengukur tekanan. Catatlah kedua nilai besaran tersebut ke dalam tabel berikut.

No	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Tekanan (mmHg)



3. Benamkan bola tembaga ke dalam air es. Pastikan jumlah es yang terdapat di dalam gelas kimia cukup banyak sehingga dicapai suhu stabil sistem antara $0-10^{\circ}\text{C}$. Pastikan juga bahwa bola tembaga tidak menyentuh dasar gelas kimia dan air es menutupi seluruh bola tembaga.
4. Masukkan termometer ke dalam gelas kimia (perhatikan agar termometer tidak menyentuh bola tembaga dan dasar gelas kimia).

Jelajah Fisika

Robert Boyle
(1627–1691)



Sumber: www.biografiasyidas.com

Robert Boyle ialah seorang ilmuwan Fisika berkebangsaan Inggris. Melalui usaha dan kerja kerasnya, ia berhasil menemukan pompa vakum. Ia pun menemukan Hukum Boyle berdasarkan penelitian yang dilakukan dengan cermat dan teliti pada gas. Hukum Boyle banyak diterapkan dalam teknologi dan telah memberikan banyak manfaat dalam kehidupan manusia.

- Setelah temperatur stabil, catatlah nilai temperatur dan tekanan tersebut ke dalam tabel.
- Nyalakanlah pembakar bunsen. Kemudian, catatlah nilai tekanan dan temperatur untuk setiap kenaikan tekanan yang ditunjukkan oleh alat pengukur tekanan.
- Lakukanlah langkah ke-6 sampai air di dalam gelas kimia mendidih.
- Bagaimanakah hubungan antara suhu dan tekanan yang Anda peroleh dari data pengamatan?
- Sesuaikan hasil data pengamatan Anda dengan Hukum Gay-Lussac? Jika tidak sesuai, dapatkan Anda menjelaskan bagian apa yang menyebabkan timbulnya perbedaan tersebut? Diskusikanlah dengan teman-teman kelompok dan guru Fisika Anda.

B. Percobaan Boyle

- Dalam percobaan Boyle ini, digunakan pompa yang memiliki katup yang dapat ditutup. Sejumlah gas yang telah ditentukan banyaknya, terperangkap di dalam pompa. Temperatur gas selalu sama dengan temperatur kamar, sedangkan tekanan gas diubah dengan cara menggantungkan beban yang berbeda-beda pada silinder pompa.
- Bukalah katup di ujung pompa, kemudian aturlah pompa agar menunjukkan volume udara sebesar 9 cm^3 . Tutuplah katup pompa. Catatlah tekanan dan volume gas pada tabel berikut.

Massa (kg)	Gaya (N)	Tekanan (N/m^2)	Volume (m^3)	$\frac{1}{\text{Volume}}$ ($1/\text{m}^3$)
0	0	0	9×10^{-6}	$1,11 \times 10^5$
0,2				
0,4				
...				

Oleh karena tekanan gas yang diperhitungkan dalam percobaan ini adalah tekanan netto gas, Anda dapat menganggap tekanan udara luar pada keadaan awal gas adalah nol.

- Tambahkan beban 200 g ke dalam pengisap. Bacalah volume gas dalam pengisap. Catatlah massa dan volume tersebut ke dalam tabel di atas.
- Lakukanlah langkah ke-3 hingga massa beban mencapai 1,6 kg.
- Hitunglah tekanan di dalam pengisap dengan cara membagi gaya yang diberikan pada pengisap dengan luas penampang pengisap.
- Ukurlah diameter pengisap menggunakan jangka sorong, kemudian hitunglah luas penampang pengisap tersebut.
- Bagaimanakah hubungan antara tekanan dan volume pada percobaan tersebut?
- Sesuaikah hasil data pengamatan Anda dengan Hukum Boyle?

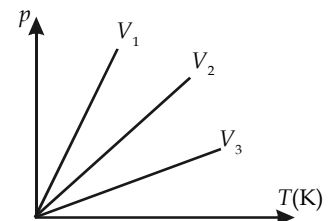
c. Hukum Charles

Seorang ilmuwan Perancis lainnya, **Charles**, menyatakan hubungan antara tekanan (p) terhadap temperatur (T) suatu gas yang berada pada volume tetap (isokhorik). Hasil penelitiannya kemudian dikenal sebagai Hukum Charles yang menyatakan hasil bagi tekanan (p) dengan temperatur (T) suatu gas pada volume tetap adalah konstan. Persamaan matematis dari Hukum Charles dinyatakan dengan

$$\frac{p}{T} = \text{konstan} \quad (8-5)$$

atau

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (8-6)$$



Gambar 8.5

Grafik p - T suatu gas pada volume yang berbeda.



Anda dapat melakukan kegiatan **Mahir Meneliti 8.2** berikut secara berkelompok untuk lebih memahami Hukum Charles.

Mahir Meneliti 8.2

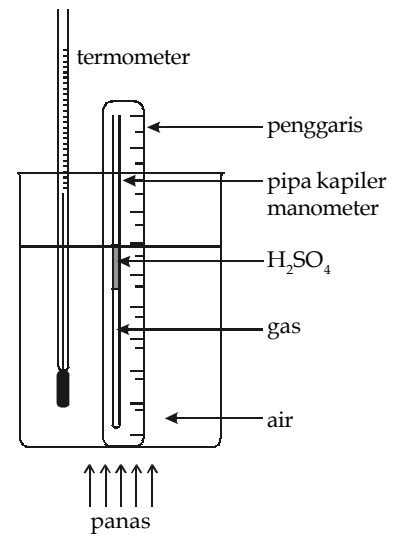
Memahami Hukum Charles

Alat dan Bahan

1. Termometer
2. Air
3. Gelas kimia
4. Pemanas
5. Manometer
6. Batang pengaduk

Prosedur

1. Susunlah alat-alat dan bahan percobaan, seperti tampak pada gambar.
2. Catatlah suhu awal dan perbedaan tinggi yang ditunjukkan manometer.
3. Nyalakan pemanas, kemudian catatlah perbedaan tinggi raksa dalam kolom manometer setiap kenaikan suhu 5°C.
4. Agar suhu air dalam gelas kimia merata, aduklah air tersebut dengan batang pengaduk.
5. Diskusikan hubungan antara temperatur terhadap tekanan gas. Sesuaikan data hasil pengamatan Anda dengan Hukum Charles?



Kata Kunci

- Gas ideal
- Hukum Boyle
- Hukum Gay-Lussac
- Hukum Charles
- Proses isotermal
- Proses isokhorik
- Proses isobarik
- Persamaan gas ideal

d. Persamaan Keadaan Gas Ideal

Pada proses isobarik, tekanan gas tetap, sedangkan volume dan temperatur gas berubah. Demikian juga dalam proses isokhorik dan isotermal, terdapat satu variabel atau besaran gas yang berada dalam keadaan tetap, sedangkan kedua variabel gas lainnya berubah. Bagaimanakah jika ketiga besaran yang menyatakan keadaan gas tersebut (tekanan, volume, dan suhu) berubah?

Dari ketiga hubungan antara tekanan, volume, dan suhu gas yang didapatkan dari Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac dapat diturunkan suatu persamaan yang disebut persamaan keadaan gas ideal. Secara matematis, persamaan keadaan gas ideal dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{pV}{T} = \text{konstan} \quad (8-7)$$

atau

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (8-8)$$

Oleh karena setiap proses yang dilakukan pada gas berada dalam ruang tertutup, jumlah molekul gas yang terdapat di dalam ruang tersebut dapat ditentukan sebagai jumlah mol gas (n) yang jumlahnya selalu tetap. Anda tentu sudah mengetahui bahwa mol adalah suatu besaran yang digunakan untuk menyatakan massa suatu zat dalam gram yang besarnya sama dengan jumlah molekul zat tersebut. Dengan demikian, persamaan keadaan gas ideal dapat dituliskan menjadi

$$\frac{pV}{T} = nR \quad (8-9)$$

atau

$$pV = nRT \quad (8-10)$$

dengan: n = jumlah mol gas,
 R = tetapan umum gas = $8,31 \times 10^3$ J/kmolK (SI) = 8,31 J/molK,
 p = tekanan (N/m²),
 V = volume (m³), dan
 T = temperatur (K).

Dari definisi mol zat yang menyatakan bahwa

$$\text{jumlah mol} = \frac{\text{massa}}{\text{massa relatif molekul}}$$

atau $n = \frac{m}{M_r}$, **Persamaan (8-10)** dapat dituliskan menjadi

$$pV = \left(\frac{m}{M_r} \right) RT \quad (8-11)$$

Anda telah mempelajari bahwa massa jenis suatu zat adalah perbandingan antara massa dengan volume zat tersebut. Oleh karena itu, dari **Persamaan (8-11)** dapat diperoleh persamaan massa jenis gas

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM_r}{RT} \quad (8-12)$$

Menurut prinsip Avogadro, satu mol gas mengandung jumlah molekul yang sama. Jumlah molekul gas ini dinyatakan dengan bilangan Avogadro (N_A) yang besarnya sama dengan $6,02 \times 10^{23}$ molekul/mol. Dengan demikian, **Persamaan (8-12)** dapat dinyatakan menjadi

$$pV = \left(\frac{N}{N_A} \right) RT \quad \text{atau} \quad pV = N \left(\frac{R}{N_A} \right) T \quad (8-13)$$

dengan: N = Banyak partikel gas, dan
 N_A = Bilangan avogadro = $6,02 \times 10^{23}$ molekul/mol
 = $6,02 \times 10^{26}$ molekul/kmol.

Oleh karena nilai pada **Persamaan (8-13)** merupakan suatu nilai tetapan yang disebut konstanta Boltzmann, k , di mana $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K maka persamaan keadaan gas ideal dapat juga dituliskan menjadi persamaan berikut.

$$pV = NkT \quad (8-14)$$

Contoh 8.1

Setetes raksa berbentuk bola memiliki jari-jari, $r = 0,4$ mm. Berapa banyak atom raksa dalam tetesan tersebut jika diketahui M_r raksa = 202 kg/kmol dan massa jenis raksa $\rho = 13.600$ kg/m³?

Jawab

Diketahui: $r = 0,4$ mm, $M_r = 202$ kg/kmol, dan $\rho = 13.600$ kg/m³.

Massa raksa:

$$\begin{aligned} m &= \rho V = \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \\ &= 13.600 \text{ kg/m}^3 \times \frac{4}{3} \times \pi \times (0,4 \times 10^{-3} \text{ m})^3 \end{aligned}$$

Jangan Lupa

- Hati-hati memilih satuan R . Sesuaikan satuan R dengan satuan-satuan besaran yang lain. Dalam hal ini, ada kalanya diperlukan faktor konversi: $1 \text{ atm} \sim 1 \times 10^5$ Pascal (Pa).
- Jangan lupa T adalah suhu mutlak, satuannya harus kelvin (K).
- Jika m dalam gram dan M_r dalam g/mol, maka n dalam mol, tetapi jika m dalam kg dan M_r dalam kg/kmol, maka n dalam kmol.

Perlu Anda

Ketahui

Dalam keadaan standar (STP), yaitu tekanan $p = 1 \text{ atm} = 1 \times 10^5$ Pa, dan suhu gas $t = 0^\circ \text{C}$ atau $T = 273$ K, maka setiap $n = 1$ mol (gas apa saja) memiliki volume 22,4 liter.



$$m = 3,6 \times 10^{-6} \text{ kg} = 3,6 \times 10^{-3} \text{ g}$$

Jumlah mol raksa:

$$n = \frac{m}{M_r} = \frac{3,6 \times 10^{-3}}{202} \text{ mol} = 1,78 \times 10^{-5} \text{ mol.}$$

$$\text{Banyak atom raksa } N = n N_A = (1,78 \times 10^{-5}) (6,02 \times 10^{23}) = 1,07 \times 10^{19} \text{ atom.}$$

Contoh 8.2

Sebuah silinder mengandung 20 liter gas pada tekanan $2,5 \times 10^6 \text{ Pa}$. Keran yang ada pada silinder dibuka sampai tekanannya turun menjadi $2,0 \times 10^6 \text{ Pa}$, kemudian keran ditutup. Jika suhu dijaga tetap, berapakah volume gas yang dibebaskan pada atmosfer bertekanan $1 \times 10^5 \text{ Pa}$?

Jawab

Diketahui pada keadaan awal:

$$V_1 = 20 \text{ L} = 20 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ dan } p_1 = 2,5 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Keadaan akhir:

$$V_2 = \text{volume semestinya dan } p_2 = 2,0 \times 10^6 \text{ Pa.}$$

Dengan menggunakan rumus $p_1 V_1 = p_2 V_2$ atau $V_2 = \frac{p_1}{p_2} V_1$ maka

$$V_2 = \frac{2,5 \times 10^6 \text{ Pa}}{2,0 \times 10^6 \text{ Pa}} \times 20 \text{ L} = 25 \text{ L pada tekanan } p_2$$

Gas yang keluar dari silinder adalah $25 \text{ L} - 20 \text{ L} = 5 \text{ L}$ pada tekanan p_2 . Oleh karena tekanan udara luar $1 \times 10^5 \text{ Pa}$, ΔV gas yang 5 L tersebut, di udara luar menjadi:

$$p_2 (\Delta V) = p_3 V_3$$

$$(2,0 \times 10^6 \text{ Pa})(5 \text{ L}) = (1 \times 10^5 \text{ Pa})V_3$$

$$V_3 = 100 \text{ L. Dengan demikian, volume gas yang dibebaskan adalah sebesar 100 L.}$$

Solusi Cerdas

Menurut teori kinetik gas, tekanan gas dalam ruang tertutup:

- Berbanding lurus dengan energi kinetik rata-rata partikel.
- Berbanding terbalik dengan volume gas dalam ruang.
- Berbanding lurus dengan jumlah partikel gas.
- Berbanding terbalik dengan kuadrat kecepatan partikel gas.

Pernyataan-pernyataan yang benar adalah

- 1 dan 2
- 1 dan 3
- 1, 2, dan 3
- 2, 3, dan 4
- 1, 3, dan 4

Penyelesaian

$$pV = \frac{2}{3} NEk$$

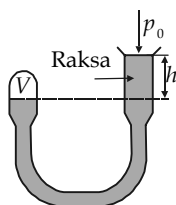
$$p = \frac{2}{3} \times \frac{N}{V} NEk$$

Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa pernyataan yang benar adalah 1, 2, dan 3.

Jawab: c

Soal UNAS Fisika SMA 2003/2004

Contoh 8.3



Seorang siswa ingin menerapkan hukum Boyle untuk menentukan tekanan udara luar dengan menggunakan peralatan, seperti tampak pada gambar. Ia mendapatkan bahwa ketika $h = 50 \text{ mm}$, $V = 18 \text{ cm}^3$ dan ketika $h = 150 \text{ mm}$, $V = 16 \text{ cm}^3$. Berapa mmHg tekanan udara luar di tempat siswa tersebut melakukan percobaan?

Jawab

Diketahui: $h_1 = 50 \text{ mm}$, $V_1 = 18 \text{ cm}^3$, $h_2 = 150 \text{ mm}$, dan $V_2 = 16 \text{ cm}^3$.

Sesuai dengan sifat bejana berhubungan, tekanan gas dalam V adalah:

- Keadaan 1: $p_1 = (p_0 + h_1) \text{ mmHg} = (p_0 + 50) \text{ mmHg}$ (a)
- Keadaan 2: $p_2 = (p_0 + h_2) \text{ mmHg} = (p_0 + 150) \text{ mmHg}$ (b)

Menurut hukum Boyle: $p_2 V_2 = p_1 V_1$ atau $p_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right) p_1 = \left(\frac{18}{16}\right) p_1$ (c)

Substitusikan **Persamaan (c)** ke **Persamaan (b)** sehingga diperoleh

$$\left(\frac{18 \text{ cm}^3}{16 \text{ cm}^3}\right) p_1 = p_0 + 150 \text{ mm} \rightarrow p_1 = \left(\frac{18 \text{ cm}^3}{16 \text{ cm}^3}\right) (p_0 + 150 \text{ mm})$$

Dengan memerhatikan **Persamaan (a)**, diperoleh:

$$\left(\frac{18 \text{ cm}^3}{16 \text{ cm}^3}\right)(p_0 + 150 \text{ mm}) = (p_0 + 50 \text{ mm})$$

$$16 \text{ cm}^3(p_0) + 16 \text{ cm}^3(150 \text{ mm}) = 18p_0 + 18 \text{ cm}^3(50 \text{ mm})$$
$$2p_0 = 16 \text{ cm}^3(150 \text{ mm}) - 18 \text{ cm}^3(50 \text{ mm})$$
$$p_0 = 750 \text{ mmHg}$$

Tekanan udara luar adalah 750 mmHg atau 75 cmHg.

Soal Penguasaan Materi 8.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

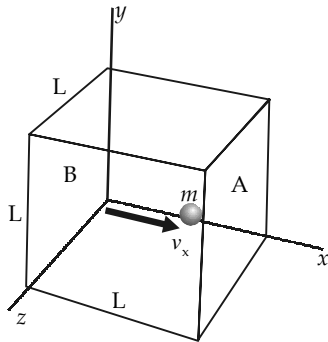
1. Berapakah volume yang ditempati 1 mol gas pada temperatur 0°C dan tekanan 1 atm?
2. Suatu gas memiliki volume 2 L, temperatur 30°C , dan tekanan 1 atm. Gas tersebut dipanaskan sampai 60°C dan ditekan sampai volume 1,5 L. Hitunglah besar tekanan akhir gas tersebut.
3. Seratus gram CO_2 menempati volume 55 L pada tekanan 1 atm. Berapakah temperatur gas CO_2 tersebut? Jika volume gas ditambah menjadi 80 L dan temperatur dijaga konstan, berapakah tekanan akhir gas?
4. Enam belas gram oksigen ($M_r = 32$) menempati ruang bervolume 5 liter pada tekanan 2 atm. Jika gas oksigen dianggap gas ideal dan $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$, berapakah temperatur gas tersebut?
5. Sebuah tabung yang volumenya 1 liter memiliki lubang yang memungkinkan udara keluar dari tabung. Mula-mula suhu udara dalam tabung 27°C . Tabung dipanaskan hingga suhunya 127°C . Berapakah perbandingan antara massa gas yang keluar dari tabung dan massa awalnya?
6. Kerapatan massa suatu gas ideal pada suhu T dan tekanan p adalah ρ . Jika tekanan gas tersebut dijadikan $2p$ dan suhunya diturunkan menjadi $0,5T$, tentukanlah kerapatan massa akhir gas.
7. Sejumlah gas ideal menjalani proses isobarik sehingga suhunya (dalam Kelvin) menjadi dua kali semula. Sehingga volume gas tersebut akan menjadi n kali semula. Berapakah nilai n ?
8. Temperatur gas ideal yang tekanannya 800 mmHg adalah 300 K. Jika gas dipanaskan pada volume tetap hingga tekanannya menjadi 1.600 mmHg, hitunglah temperatur gas tersebut.

B Prinsip Ekuipartisi Energi

Pada subbab A, Anda telah mempelajari hubungan antara variabel-variabel yang menyatakan keadaan suatu gas dalam ruangan tertutup. Untuk mengamati keadaan gas tersebut, dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu cara makroskopis dan mikroskopis.

Jika Anda mengamati keadaan suatu gas dalam ruang tertutup berdasarkan besaran-besaran yang dapat dilihat atau diukur secara langsung, Anda dikatakan melakukan pengamatan secara makroskopis. Namun, jika pengamatan yang Anda lakukan berdasarkan pada variabel atau besaran yang tidak dapat dilihat atau diukur secara langsung, Anda dikatakan melakukan pengamatan secara mikroskopis.

Pengamatan keadaan gas secara makroskopis telah Anda lakukan dan pelajari pada subbab A. Pada subbab B ini, Anda akan mempelajari keadaan gas yang diamati secara mikroskopis serta hubungan antara besaran makroskopis dan besaran mikroskopis.



Gambar 8.6

Sebuah partikel bergerak dengan kecepatan v_x dalam ruang berbentuk kubus berusuk L .

1. Tinjauan Tekanan Secara Mikroskopis

Berdasarkan sifat-sifat gas ideal, Anda telah mengetahui bahwa setiap dinding ruang tempat gas berada, mendapat tekanan dari tumbukan partikel-partikel gas yang tersebar merata di dalam ruang tersebut. Cobalah Anda amati gerak satu partikel yang berada di dalam ruang berbentuk kubus dengan panjang rusuk kubus L . Massa partikel tersebut adalah m dan kecepatan partikel menurut arah sumbu- x dinyatakan sebagai v_x (perhatikan **Gambar 8.6**). Jika partikel gas ideal tersebut menumbuk dinding ruang, tumbukan yang terjadi adalah tumbukan lenting sempurna. Oleh karena itu, jika kecepatan awal partikel saat menumbuk dinding A adalah $+v_x$, kecepatan akhir partikel setelah terjadinya tumbukan dinyatakan sebagai $-v_x$. Perubahan momentum (Δp_x) yang dialami partikel adalah $\Delta p_x = p_{\text{akhir}} - p_{\text{awal}} = -mv_x - (mv_x) = -2mv_x$.

Setelah menumbuk dinding A, partikel gas ideal tersebut menumbuk dinding B. Demikian seterusnya, partikel gas tersebut akan bergerak bolak-balik menumbuk dinding A dan dinding B. Dengan demikian, Anda dapat menghitung selang waktu antara dua tumbukan yang terjadi pada dinding A dengan persamaan

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x} \quad (8-15)$$

Pada saat partikel gas tersebut menumbuk dinding, partikel memberikan gaya sebesar F_x pada dinding. Pada pelajaran mengenai momentum, Anda telah mempelajari bahwa besarnya gaya yang terjadi pada peristiwa tumbukan sama dengan laju perubahan momentumnya $\left(F = \frac{\Delta p}{\Delta t}\right)$. Dengan demikian, besar gaya F_x tersebut dapat diketahui sebagai berikut.

$$F_x = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\frac{2L}{v_x}}$$

$$F_x = \frac{mv_x^2}{L} \quad (8-16)$$

Jika di dalam ruang berbentuk kubus tersebut terdapat sejumlah N partikel gas, yang kecepatan rata-rata seluruh molekul gas tersebut dinyatakan dengan v_x , gaya yang dialami dinding dinyatakan sebagai F_{total} . Dengan demikian, **Persamaan (8-16)** dapat dinyatakan menjadi

$$F_{\text{total}} = \frac{N\overline{mv_x^2}}{L} \quad (8-17)$$

Anda dapat mencari besarnya tekanan (p) yang dilakukan oleh gaya total (F_{total}) yang dihasilkan oleh N partikel gas ideal tersebut pada dinding A.

$$p = \frac{F_{\text{total}}}{A}$$

Oleh karena luas dinding adalah perkalian antara dua panjang rusuk dinding tersebut ($A = L^2$) maka persamaan tekanan pada dinding dapat ditulis dengan

$$p = \frac{F_{\text{total}}}{L^2} = \frac{N\overline{mv_x^2}}{L^3} = \frac{N\overline{mv_x^2}}{V} \quad (8-18)$$

Perlu Anda

Ketahui

Karena perubahan p berbanding lurus dengan perubahan V (ingat hukum Boyle) maka kecepatan v tidak tergantung pada tekanan (p) dan volume (V).

atau

$$pV = Nmv_x^2 \quad (8-19)$$

dengan: p = tekanan pada dinding, dan
 V = volume ruang.

Dalam tinjauan tiga dimensi (tinjauan ruang), kecepatan rata-rata gerak partikel merupakan resultan dari tiga komponen arah kecepatan menurut sumbu- x (\bar{v}_x), sumbu- y (\bar{v}_y), dan sumbu- z (\bar{v}_z) yang besarnya sama. Oleh karena itu, dapat dituliskan $\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y + \bar{v}_z$ dengan $\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z$. Jika setiap komponen pada kedua ruas penamaan kecepatan tersebut dikuadratkan, dapat dituliskan

$$\begin{aligned} \bar{v}^2 &= \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 \\ \bar{v}_x^2 &= \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2 \end{aligned}$$

sehingga diperoleh $\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2$

Dengan demikian, **Persamaan (8-19)** dapat diubah menjadi

$$pV = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2 \quad (8-20)$$

atau

$$p = \frac{1}{3} \frac{N m \bar{v}^2}{V} \quad (8-21)$$

dengan: N = banyaknya partikel gas,
 m = massa 1 partikel gas,
 \bar{v} = kecepatan partikel gas, dan
 V = volume gas.

2. Hubungan Antara Tekanan Gas dan Energi Kinetik

Pada **Persamaan (8-20)**, Anda telah menyatakan hubungan antara besaran tekanan, volume, dan suhu (besaran makroskopis) suatu gas dengan besaran mikroskopis (massa, jumlah, dan kecepatan) partikel gas tersebut. Dari pelajaran sebelumnya, Anda juga telah mempelajari bahwa setiap benda yang bergerak memiliki energi kinetik. Bagaimanakah hubungan antara ketiga variabel makroskopis gas (tekanan, volume, dan suhu) terhadap energi kinetiknya?

Perhatikanlah kembali **Persamaan (8-18)** dan **Persamaan (8-21)**. Jika **Persamaan (8-18)** dituliskan menjadi $p = \frac{NkT}{V}$ dan **Persamaan (8-21)**

dituliskan sebagai $p = \frac{1}{3} \frac{N m \bar{v}^2}{V}$ maka dapat diturunkan persamaan

$$p = \frac{NkT}{V} = \frac{1}{3} \frac{N m \bar{v}^2}{V}$$

$$\frac{1}{3} m \bar{v}^2 = kT \quad (8-22)$$

Jelajah Fisika

Gelembung Udara



Sumber: www.culebradivers.com

Ukuran gelembung udara di dalam air berubah seiring dengan berubahnya kedalaman gelembung tersebut di dalam air. Jika seorang penyelam *scuba* melepaskan gelembung udara di kedalaman air, tekanan air di kedalaman tersebut menentukan besarnya volume gelembung udara. Saat gelembung udara tersebut naik ke permukaan, tekanan air menurun sehingga volume gelembung udara pun membesar.

Sumber: *Contemporary College Physics*, 1993



Jangan Lupa

Kecepatan gas merupakan kecepatan rata-rata sehingga energi kinetik gas juga merupakan energi kinetik rata-rata.

Oleh karena $EK = \frac{1}{2} mv^2$ maka **Persamaan (8-22)** dapat dituliskan menjadi

$$\frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} mv^2 \right) = kT \text{ sehingga diperoleh}$$

$$\frac{2}{3} EK = kT \quad (8-23)$$

atau

$$EK = \frac{3}{2} kT \quad (8-24)$$

Dari **Persamaan (8-24)** Anda dapat menyatakan bahwa energi kinetik gas berbanding lurus dengan temperaturnya. Jadi, jika temperatur gas naik, energi kinetiknya akan membesar. Demikian juga sebaliknya, jika suhu gas turun, energi kinetiknya akan mengecil.

Jika energi kinetik **Persamaan (8-24)** dituliskan sebagai $EK = 3 \left(\frac{1}{2} kT \right)$,

besaran $\frac{1}{2} kT$ disebut juga sebagai derajat kebebasan gas. Apakah derajat kebebasan gas itu? Derajat kebebasan berhubungan dengan kebebasan partikel gas untuk bergerak di dalam ruang. Jadi, jika energi kinetik suatu gas dinyatakan sebagai $\frac{3}{2} kT$, Anda dapat mengatakan bahwa gas tersebut memiliki 3 derajat kebebasan menurut sumbu- x , sumbu- y , dan sumbu- z . Derajat kebebasan ini berlaku untuk gas monoatomik, seperti Helium (He), Argon (Ar), dan Neon (Ne). Semakin tinggi suhu suatu gas, energi kinetiknya akan semakin besar. Secara fisis, meningkatnya energi kinetik gas tersebut berhubungan dengan meningkatnya jumlah derajat kebebasan yang dimilikinya. Pada gas-gas diatomik, seperti H_2 , N_2 , dan O_2 , energi kinetiknya pada suhu rendah adalah $\frac{3}{2} kT$, pada suhu sedang $\frac{5}{2} kT$, dan suhu tinggi $\frac{7}{2} kT$.

Derajat kebebasan gas-gas diatomik pada suhu rendah diperoleh dari kebebasan gerak partikel-partikelnya saat bertranslasi menurut sumbu- x , sumbu- y , dan sumbu- z ($v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 3v_x^2$). Pada suhu sedang, partikel-partikel gas diatomik tersebut dapat bertranslasi dan berotasi. Namun, rotasi yang dialami partikel gas menurut sumbu- x diabaikan karena nilainya sangat kecil. Dengan demikian, energi kinetiknya, $EK = \frac{3}{2} kT = 2 \left(\frac{1}{2} kT \right) = \frac{5}{2} kT$. Jika temperatur gas diatomik tersebut dinaikkan lagi hingga mencapai ± 1.000 K, gerak yang dilakukan oleh partikel-partikel gas adalah gerak translasi, rotasi, dan vibrasi (bergerak pada sumbunya). Energi kinetik gas pada suhu tinggi dinyatakan dengan

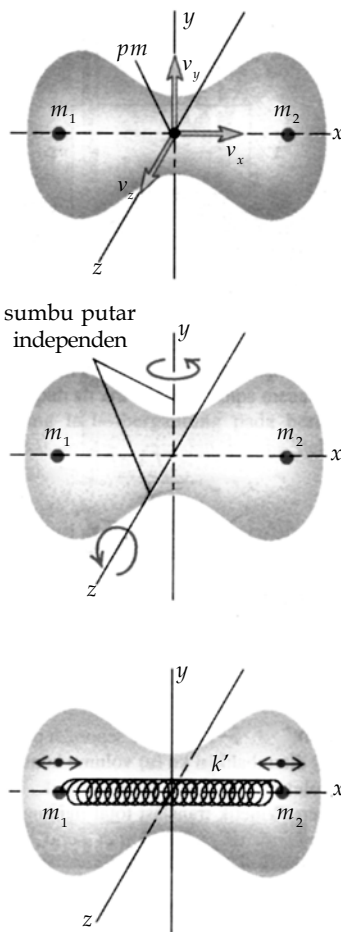
$$EK = \frac{3}{2} kT + 2 \left(\frac{1}{2} kT \right) + 2 \left(\frac{1}{2} kT \right) = \frac{7}{2} kT$$

Anda telah mempelajari dari uraian di atas, bahwa jumlah derajat kebebasan partikel gas menentukan energi yang dimiliki atau disimpan oleh gas tersebut. Peninjauan energi partikel gas inilah yang dinamakan Prinsip Ekuipartisi Energi oleh **James Clerk Maxwell**.

3. Energi Dalam Gas Ideal

Energi kinetik sejumlah partikel gas yang terdapat di dalam suatu ruang tertutup disebut sebagai energi dalam gas (U). Jika di dalam ruangan tersebut terdapat N partikel gas, energi dalam gas dituliskan dengan persamaan

$$U = NEK$$



Sumber: Fisika Universitas, 2002

Gambar 8.7

- Derajat kebebasan sebuah molekul diatomik.
- Gerak translasi. Pusat massa memiliki tiga komponen kecepatan yang independen satu dengan yang lain.
 - Gerak rotasi. Molekul memiliki dua sumbu putar yang independen melalui pusat massanya.
 - Gerak vibrasi. Atom dan "pegas" memiliki energi kinetik dan energi potensial vibrasi tambahan.

Dengan demikian, energi dalam untuk gas monoatomik atau gas diatomik pada suhu rendah adalah

$$U = NEK = \frac{3}{2} NkT$$

Adapun, energi dalam untuk gas-gas diatomik pada suhu sedang dinyatakan dengan

$$U = \frac{5}{2} NkT$$

dan pada suhu tinggi, besar energi dalam gas adalah

$$U = \frac{7}{2} NkT$$

4. Kecepatan Partikel Gas Ideal

Besaran lain yang dapat ditentukan melalui prinsip ekuipartisi energi gas adalah akar dari rata-rata kuadrat kelajuan (v_{rms} = root mean square speed) gas, yang dirumuskan dengan

$$v_{rms} = \sqrt{v^2}$$

Dari persamaan (8-24), Anda telah mengetahui bahwa $EK = \frac{3}{2} kT$.

Dengan demikian dapat dirumuskan bahwa

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$v^2 = \frac{3kT}{m}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (8-25)$$

Berdasarkan persamaan gas ideal, Anda pun telah mengetahui bahwa $pV = NkT$. Jika hanya terdapat satu mol gas, persamaan gas ideal tersebut dapat dinyatakan $pV = kT$. Dengan demikian, **Persamaan (8-25)** dapat dituliskan menjadi

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3pV}{m}} \quad (8-26)$$

Anda tentu masih ingat bahwa massa jenis (ρ) adalah perbandingan antara massa terhadap volume zat tersebut ($\rho = \frac{m}{V}$). Oleh karena itu, **Persamaan (8-26)** dapat dituliskan menjadi

$$v_{rms} = \sqrt{3p \left(\frac{V}{m} \right)}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \quad (8-27)$$

Berdasarkan **Persamaan (8-27)** tersebut, Anda dapat menyatakan bahwa massa jenis gas berbanding terbalik dengan kelajuan partikelnya. Jadi, jika massa jenis (ρ) gas di dalam ruangan tertutup besar, kelajuan partikel gas tersebut akan semakin kecil.

Kata Kunci

- Besaran mikroskopis
- Besaran makroskopis
- Derajat kebebasan
- Energi dalam
- Prinsip ekuipartisi energi



Contoh 8.4

Neon (Ne) adalah suatu gas monoatomik. Berapakah energi dalam 2 gram gas neon pada suhu 50°C jika massa molekul relatifnya $M_r = 10$ g/mol?

Jawab

Diketahui: $m = 2$ gram, $T = 50^\circ\text{C}$, dan $M_r = 10$ g/mol.

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2} \frac{m}{M_r} RT \\
 &= \frac{3}{2} \times \frac{2 \text{ g}}{10 \text{ g/mol}} \times 8,31 \text{ J/molK} \times (50 + 273) \text{ K} = 805,24 \text{ J.}
 \end{aligned}$$

Contoh 8.5

Sebuah tangki bervolume 2,4 m³ diisi dengan 2 kg gas. Tekanan dalam tangki 1,3 atm. Berapakah kecepatan efektif molekul-molekul gas ini?

Jawab

Diketahui: $V = 2,4$ m³, $m = 2$ kg, dan $p = 1,3$ atm.

$$\begin{aligned}
 v &= \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3p}{\frac{m}{V}}} = \sqrt{\frac{3pV}{m}} \\
 &= \sqrt{\frac{3 \times 1,3(1,01 \times 10^5 \text{ Pa}) \times 2,4 \text{ m}^3}{2 \text{ kg}}}
 \end{aligned}$$

$$v = 687,52 \text{ m/s.}$$

Soal Penguasaan Materi 8.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Gas Helium memiliki massa molar sekitar 4 g/mol dan gas hidrogen (H₂) memiliki massa molar sekitar 2 g/mol. Jika suhu gas saat itu adalah 300 K, hitunglah:
 - kelajuan rms molekul oksigen, dan
 - kelajuan molekul gas hidrogen.
- Berapakah energi kinetik translasi rata-rata 1 L gas oksigen yang ditahan pada temperatur 0°C dan tekanan 1 atm?
- Pada temperatur berapakah kelajuan rms molekul H₂ sama dengan 75 m/s?
- Berapakah perbandingan energi dalam gas helium dan neon yang massanya sama pada suhu 400 K?
- Suatu gas ideal berada dalam ruang tertutup sehingga kecepatannya menjadi dua kali kecepatan mula-mula. Jika suhu mula-mula 27°C, tentukanlah suhu akhir gas tersebut.
- Sejumlah contoh gas oksigen ($M_r = 32$) memiliki suhu mutlak empat kali dari sejumlah contoh gas hidrogen ($M_r = 2$). Tentukanlah perbandingan kelajuan efektif molekul oksigen dan molekul hidrogen.
- Massa sebuah molekul nitrogen adalah empat belas kali massa sebuah molekul hidrogen. Pada suhu berapakah molekul-molekul nitrogen pada suhu 294 K memiliki laju rata rata yang sama dengan molekul-molekul hidrogen.

Rangkuman

- Gas Ideal** adalah gas yang memenuhi sifat-sifat berpartikel banyak, antarpartikel tidak berinteraksi, arah gerak setiap partikel sembarang, ukuran partikel terhadap ruang tempatnya dapat diabaikan,

tumbukan antarpartikel bersifat lenting sempurna, partikel gas terdistribusi merata di seluruh ruang, dan berlaku Hukum Newton tentang gerak.

2. **Hukum Boyle** berlaku pada proses isothermal

$$pV = \text{konstan}$$

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

3. **Hukum Gay-Lussac** berlaku pada proses isobarik

$$\frac{V}{T} = \text{konstan atau } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

4. **Hukum Charles** berlaku pada proses isokhorik

$$\frac{V}{T} = \text{konstan atau } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

5. **Hukum Boyle-Gay Lussac** merupakan penggabungan antara Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac

$$\frac{pV}{T} = \text{konstan atau } \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$$

6. **Persamaan keadaan gas ideal**

$$pV = nRT \text{ atau } pT = NkT$$

7. **Tekanan gas ideal**

$$p = \frac{1}{3} \frac{Nmv^2}{V}$$

8. **Energi dalam gas ideal**

a. Gas monoatomik

$$EK = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT$$

b. Gas diatomik

1) Pada suhu rendah:

$$U = NEK = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT$$

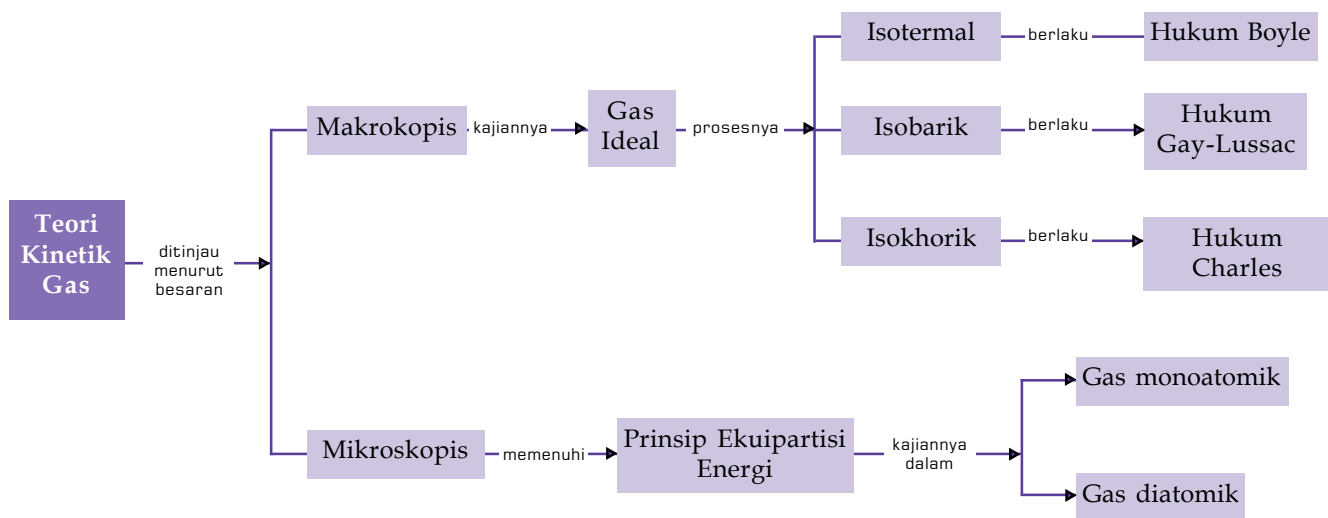
2) Pada suhu sedang:

$$U = NEK = \frac{5}{2} NkT = \frac{5}{2} nRT$$

3) Pada suhu tinggi:

$$U = NEK = \frac{7}{2} NkT = \frac{7}{2} nRT$$

Peta Konsep



Kaji Diri

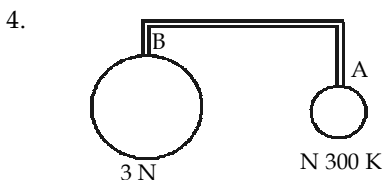
Setelah mempelajari bab Teori Kinetik Gas, Anda diharapkan dapat mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik. Jika Anda belum mampu mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik, Anda belum menguasai materi bab Teori Kinetik Gas dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami,

lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 8

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

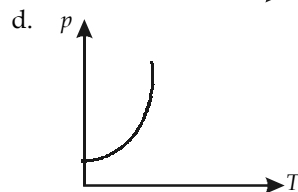
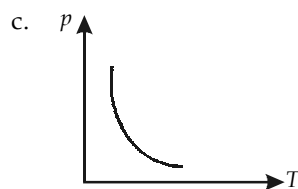
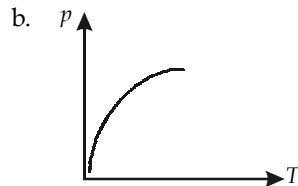
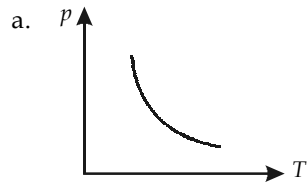
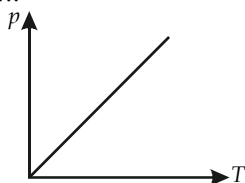
- Partikel-partikel gas ideal memiliki sifat-sifat antara lain
 - selalu bergerak
 - tidak tarik menarik
 - bertumbukan lenting sempurna
 - tidak mengikuti Hukum Newton tentang gerak
 Pernyataan yang benar adalah ...
 - 1, 2, dan 3
 - 2, 3, dan 4
 - 1, 3, dan 4
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
- Pada keadaan normal ($T = 0^\circ\text{C}$ dan $p = 1 \text{ atm}$), 4 gram gas oksigen (O_2) dengan berat molekul $M_r = 32$ memiliki volume sebesar
($R = 8.314 \text{ J/kmol K}$; $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$)
 - $1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
 - $2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 - $22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 - $2,8 \text{ m}^3$
 - $22,4 \text{ m}^3$
- Sebuah tangki diisi dengan gas ideal bermassa 10 kg pada tekanan 4 atm dan suhu 47°C . Tangki tersebut memiliki lubang kecil sehingga memungkinkan gas dapat lolos keluar. Ketika suhu 27°C dan tekanan gas 3 atm, massa gas yang lolos keluar dari tangki jika $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$ adalah
 - 2 kg
 - 3 kg
 - 4 kg
 - 5 kg
 - 6 kg



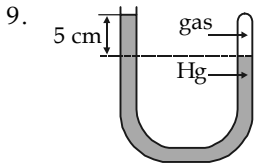
Diketahui volume bola B dua kali volume bola A. Kedua bola terisi gas ideal. Volume tabung penghubung dapat diabaikan. Gas A berada pada suhu 300 K. Jika jumlah molekul gas dalam bola A adalah N dan jumlah molekul gas dalam bola B adalah 3N, suhu gas dalam bola B adalah

- 150 K.
- 200 K.
- 300 K.
- 450 K.
- 600 K.

- Grafik yang menunjukkan hubungan antara variabel tekanan gas p yang massanya tertentu pada volume tetap sebagai fungsi dari suhu mutlak T adalah



- Sejumlah gas ideal dalam suatu ruang mengalami proses isobarik sehingga volumenya menjadi dua kali volume semula. Suhu gas tersebut akan berubah dari 27°C menjadi
 - 54°C
 - 108°C
 - 327°C
 - 427°C
 - 600°C
- Jika suatu gas ideal dimampatkan secara isotermal sampai volumenya menjadi setengah dari volume semula maka
 - tekanan dan suhu tetap
 - tekanan menjadi dua kali dan suhu tetap
 - tekanan tetap dan suhu menjadi dua kalinya
 - tekanan menjadi dua kalinya dan suhu menjadi setengahnya
 - tekanan dan suhu menjadi setengahnya.
- Sebuah ban sepeda memiliki volume = 100 cm^3 . Tekanan awal di dalam ban sepeda = 0,5 atmosfer. Ban tersebut dipompa dengan suatu pompa yang volumenya = 50 cm^3 . Tekanan udara luar = 76 cmHg dan temperatur tidak berubah. Tekanan ban sepeda setelah dipompa sebanyak 4 kali adalah
 - 1,0 atm
 - 2,5 atm
 - 4,0 atm
 - 4,5 atm
 - 5,0 atm



Dalam tabung U seperti tampak pada gambar, terdapat sejenis gas ideal. Jika diketahui tekanan udara luar = 75 cmHg, volume gas = 50 cm^3 dan suhunya = 27°C , volume gas pada suhu -3°C jika tekanannya = 90 cmHg adalah ...

- a. 50 cm^3
 - b. 35 cm^3
 - c. 80 cm^3
 - d. 20 cm^3
 - e. 40 cm^3
10. Sejumlah gas ideal bertekanan p dipanaskan dari suhu 27°C menjadi 54°C . Jika volumenya naik menjadi dua kali volume semula tekanannya akan menjadi ...
- a. $0,25 p$
 - b. $0,55 p$
 - c. $0,75 p$
 - d. p
 - e. $2 p$
11. Jika sejumlah gas yang massanya tetap ditekan pada suhu tetap, molekul-molekul gas tersebut akan ...
- a. memiliki energi kinetik lebih besar
 - b. memiliki momentum lebih besar
 - c. lebih sering menumbuk dinding tempat gas berada
 - d. bergerak lebih cepat
 - e. bergerak lebih lambat
12. Sebuah tabung berisi gas ideal. Menurut teori kinetik gas dan prinsip ekuipartisi energi diketahui:
- 1) molekul gas mengalami perubahan momentum ketika bertumbukan dengan dinding tabung,
 - 2) energi yang tersimpan dalam gas berbanding lurus dengan suhu mutlaknya,
 - 3) energi yang tersimpan dalam gas berbanding lurus dengan jumlah (banyaknya) derajat kebebasannya, dan
 - 4) pada saat molekul bertumbukan dengan dinding tabung, molekul gas kehilangan energi.
- Pernyataan yang benar adalah ...
- a. 1 dan 3
 - b. 2 dan 4
 - c. 1, 2, dan 3
 - d. 3 dan 4
 - e. 1, 2, 3, dan 4
13. Sebuah tabung gas berisi 1 mol gas oksigen pada suhu 27°C . Jika pada suhu tersebut molekul oksigen memiliki 5 derajat kebebasan, besar energi dalam gas oksigen tersebut adalah ... ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
- a. 6,23 J
 - b. 62,3 J
 - c. $6,23 \times 10^2 \text{ J}$
 - d. $6,23 \times 10^3 \text{ J}$
 - e. $6,23 \times 10^4 \text{ J}$
14. Suatu gas ideal memiliki energi dalam U pada saat suhunya 27°C . Besar kenaikan energi dalamnya jika suhu gas dinaikkan menjadi 87°C adalah ...

- a. $0,2 U$
- b. $0,4 U$
- c. $0,6 U$
- d. $0,8 U$
- e. $1,2 U$

15. Di dalam sebuah ruang tertutup terdapat gas dengan suhu 27°C . Jika gas dipanaskan sehingga energi kinetiknya menjadi 5 kali energi kinetik semula, gas tersebut harus dipanaskan sampai suhu ...
- a. 108°C
 - b. 135°C
 - c. 1.200°C
 - d. 1.227°C
 - e. 1.500°C
16. Jika konstanta Boltzmann $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ maka energi kinetik sebuah atom gas helium pada suhu 27°C adalah ...
- a. $1,14 \times 10^{-21} \text{ J}$
 - b. $2,07 \times 10^{-21} \text{ J}$
 - c. $2,42 \times 10^{-21} \text{ J}$
 - d. $5,59 \times 10^{-21} \text{ J}$
 - e. $6,21 \times 10^{-21} \text{ J}$
17. Dua buah tabung diisi dengan gas berbeda, tetapi keduanya berada pada suhu yang sama. Diketahui M_A dan M_B adalah berat molekul kedua gas tersebut. Dengan demikian, besar momentum rata-rata kedua gas, yaitu p_A dan p_B , berkaitan satu sama lain menurut rumus ...
- a. $p_A = p_B$
 - b. $p_A = \sqrt{\left(\frac{M_A}{M_B}\right)} p_B$
 - c. $p_A = \left(\frac{M_A}{M_B}\right) p_B$
 - d. $p_A = \left(\frac{M_B}{M_A}\right) p_B$
 - e. $p_A = \sqrt{\left(\frac{M_B}{M_A}\right)} p_B$
18. Jika gas di dalam suatu ruang tertutup dipanaskan sampai suhu $T \text{ K}$ maka ...
- a. energi potensial molekul gas semakin kecil
 - b. energi kinetik molekul gas = $\frac{2}{3} NkT$
 - c. energi kinetik molekul gas = $\frac{3}{2} NkT$
 - d. volume gas akan selalu bertambah karena gas akan memuai
 - e. tekanan gas besarnya tetap
19. Sebuah tabung gas dengan volume tertentu berisi gas ideal dengan tekanan p . Jika ke dalam tabung tersebut dipompakan gas sejenis sehingga tekanannya menjadi $2p$, sedangkan suhunya dibuat tetap, besar v_{rms} nya adalah ...
- a. $0,5 v_{rms}$
 - b. v_{rms}
 - c. $\sqrt{2} v_{rms}$
 - d. $2 v_{rms}$
 - e. $4 v_{rms}$



20. Pada sejumlah gas ideal dengan volume konstan berlaku:
- 1) semua molekul memiliki kecepatan yang sama pada suhu tertentu,
 - 2) kecepatan rata rata molekul akan lebih besar pada suhu yang tinggi daripada suhu rendah,
 - 3) semua molekul memiliki energi kinetik sama pada suhu tertentu, dan

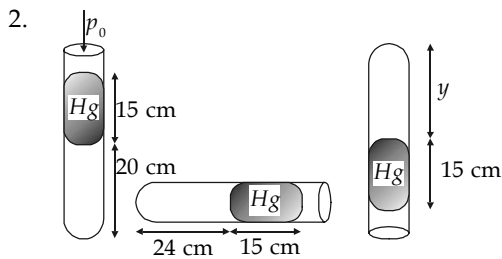
- 4) Jika gas dinaikan suhunya 1°C , jumlah kalor yang diperlukan sama dengan perubahan total energi kinetik molekul-molekulnya.

Pernyataan yang benar adalah

- a. 1, 2, dan 3
- b. 1 dan 3
- c. 2 dan 4
- d. 4
- e. 1, 2, 3, dan 4

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

1. Tentukanlah jumlah molekul oksigen setiap meter kubik dalam udara pada suhu dan tekanan normal (0°C dan 1 atm). Diketahui $1\text{ atm} = 10^5\text{ Pa}$, $R = 8314\text{ J/kmolK}$, dan $N_A = 6,02 \times 10^{23}\text{ molekul/mol}$



Dari suatu percobaan tekanan udara diperoleh data seperti tampak pada gambar di atas. Tentukanlah panjang kolom udara y .

3. Massa sebuah molekul oksigen adalah empat belas kali massa sebuah molekul hidrogen. Pada suhu berapakah molekul-molekul gas oksigen pada suhu 1.600 K memiliki laju rata-rata yang sama dengan molekul hidrogen?
4. Pada suhu 27°C besarnya energi kinetik rata-rata partikel gas adalah E . Jika energi kinetik rata-rata naik menjadi 3 kali semula, berapakah suhu gas tersebut sekarang?
5. Gas helium dengan M_r 4 g/mol , mengisi wadah bervolume 10 liter pada tekanan $6,2 \times 10^5\text{ Pa}$. Berapa lamakah sebuah mesin dengan daya 250 W harus bekerja untuk menghasilkan energi yang sama dengan energi dalam gas? ($R = 8,314\text{ J/molK}$)



B a b 9

Termodinamika



Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep termodinamika dalam mesin kalor dengan cara menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan hukum termodinamika.

Kehadiran mesin sebagai alat pengubah energi kalor menjadi energi mekanik atau usaha telah mengubah kehidupan manusia menjadi lebih mudah, lebih cepat, dan lebih efisien. Mesin pabrik, mesin kapal, mesin kereta api, mesin mobil serta mesin motor telah meringankan usaha yang dibutuhkan manusia untuk beraktivitas dan membuat suatu produk. Tahukah Anda peralatan lain yang menggunakan mesin pengubah energi kalor menjadi usaha dalam prinsip kerjanya?

Mesin-mesin kalor tersebut ada yang menggunakan bahan bakar solar dan dikenal sebagai mesin diesel serta ada pula yang menggunakan bahan bakar bensin. Khusus untuk mesin berbahan bakar bensin, dikenal mesin dua tak dan mesin empat tak. Bagaimanakah cara mesin kalor bekerja? Tahukah Anda jenis usaha yang dilakukan mesin kalor dalam proses kerjanya? Prinsip yang mendasari cara kerja mesin kalor secara umum dapat Anda pelajari dalam pembahasan Bab 9 tentang termodinamika ini.

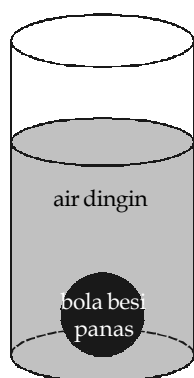
- A. Usaha dan Proses dalam Termodinamika**
- B. Hukum Pertama Termodinamika**
- C. Hukum Kedua Termodinamika**



A Usaha dan Proses dalam Termodinamika

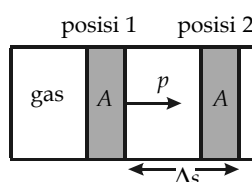
Soal Pramateri

1. Besaran-besaran apa sajakah yang dapat diamati pada suatu gas yang berada di dalam suatu ruangan tertutup?
2. Apakah yang dimaksud dengan proses isothermal, isokhorik, dan isobarik pada gas?



Gambar 9.1

Bola besi dan air merupakan sistem yang diamati. Adapun, udara luar merupakan lingkungannya.



Gambar 9.2

Ketika gas ideal di dalam tabung dipanaskan, gas tersebut memuai sehingga piston berpindah sejauh Δs .

Termodinamika adalah cabang ilmu Fisika yang membahas tentang hubungan antara panas (kalor) dan usaha yang dilakukan oleh kalor tersebut. Dalam melakukan pengamatan mengenai aliran energi antara panas dan usaha ini dikenal dua istilah, yaitu *sistem* dan *lingkungan*. Apakah yang dimaksud sistem dan lingkungan dalam termodinamika? Untuk memahami penggunaan kedua istilah tersebut dalam termodinamika, perhatikanlah **Gambar 9.1** berikut. Misalkan, Anda mengamati aliran kalor antara bola besi panas dan air dingin. Ketika bola besi tersebut dimasukkan ke dalam air. Bola besi dan air disebut sistem karena kedua benda tersebut menjadi objek pengamatan dan perhatian Anda. Adapun, wadah air dan udara luar disebut lingkungan karena berada di luar sistem, tetapi dapat memengaruhi sistem tersebut. Dalam pembahasan termodinamika, besaran yang digunakan adalah besaran makroskopis suatu sistem, yaitu tekanan, suhu, volume, entropi, kalor, usaha, dan energi dalam.

Usaha yang dilakukan oleh sistem (gas) terhadap lingkungannya bergantung pada proses-proses dalam termodinamika, di antaranya proses isobarik, isokhorik, isothermal, dan adiabatik.

Kerjakanlah 9.1

Cobalah Anda tuliskan sepuluh contoh peristiwa yang melibatkan sistem dan lingkungannya dalam buku latihan Anda.

1. Usaha Sistem terhadap Lingkungannya

Pada pembahasan Bab 4, Anda telah mempelajari definisi usaha (W) yang dilakukan pada benda tegar, yaitu

$$W = F \cdot s$$

Bagaimanakah cara menghitung usaha pada gas? Tinjaulah suatu gas yang berada dalam tabung dengan penutup berbentuk piston yang dapat bergerak bebas, seperti terlihat pada **Gambar 9.2**. Ketika gas tersebut dipanaskan, piston akan berpindah sejauh Δs karena gas di dalam tabung memuai dari volume awal V_1 menjadi volume akhir V_2 . Gaya yang bekerja pada piston adalah $F = pA$. Jika luas penampang piston (A) dan tekanan gas dalam tabung (P) berada dalam keadaan konstan, usaha yang dilakukan oleh gas dinyatakan dengan persamaan

$$W = pA \Delta s$$

Oleh karena $A \Delta s = \Delta V$, persamaan usaha yang dilakukan gas dapat ditulis menjadi

$$W = p \Delta V \quad (9-1)$$

atau

$$W = p(V_2 - V_1) \quad (9-2)$$

dengan: p = tekanan gas (N/m^2),

ΔV = perubahan volume (m^3), dan

W = usaha yang dilakukan gas (joule).

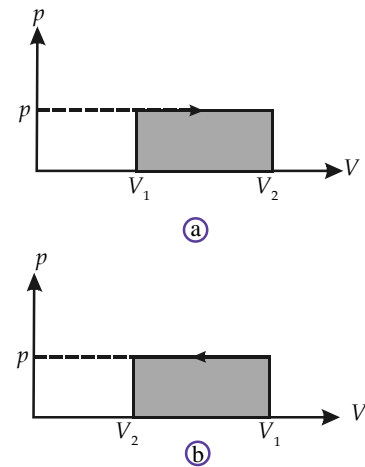
Nilai W dapat berharga positif atau negatif bergantung pada ketentuan berikut.

- Jika gas memuai sehingga perubahan volumenya berharga positif, gas (sistem) tersebut dikatakan melakukan usaha yang menyebabkan volumenya bertambah. Dengan demikian, usaha W sistem berharga positif.
- Jika gas dimampatkan atau ditekan sehingga perubahan volumenya berharga negatif, pada gas (sistem) diberikan usaha yang menyebabkan volume sistem berkurang. Dengan demikian, usaha W pada tersebut sistem ini bernilai negatif.

Usaha yang dilakukan oleh sistem dapat ditentukan melalui metode grafik. Pada **Gambar 9.3a** dapat dilihat bahwa proses bergerak ke arah kanan (gas memuai). Hal ini berarti $V_2 > V_1$ atau $\Delta V > 0$ sehingga W bernilai positif (gas melakukan usaha terhadap lingkungan). W sama dengan luas daerah di bawah kurva yang diarsir (luas daerah di bawah kurva $p - V$ dengan batas volume awal dan volume akhir)

Selanjutnya perhatikan **Gambar 9.3b**. Jika proses bergerak ke arah kiri (gas memampatkan), $V_2 < V_1$ atau $\Delta V < 0$ sehingga W bernilai negatif (lingkungan melakukan usaha terhadap gas). $W = -$ luas daerah di bawah kurva $p - V$ yang diarsir

Cobalah Anda tinjau kembali **Persamaan (9-1)**. Dari persamaan tersebut dan grafik hubungan tekanan (p) terhadap (V) pada **Gambar 9.3**, Anda dapat menyimpulkan bahwa suatu sistem dikatakan melakukan usaha (W berharga positif) atau sistem diberi usaha (W berharga negatif), jika pada sistem tersebut terjadi perubahan volume (ΔV).

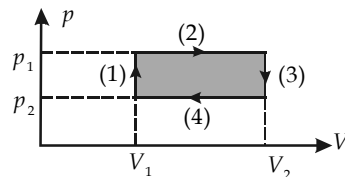


Gambar 9.3

- Grafik $P - V$ suatu gas yang mengalami pemuaian (melakukan ekspansi)
- Grafik $P - V$ suatu gas yang mengalami pemampatan (diberi kompresi)

Kerjakanlah 9.2

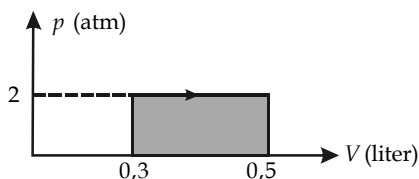
Suatu gas yang mengalami proses termodinamika memiliki grafik $p - V$ sebagai berikut.



Menurut pemahaman Anda, bagaimanakah usaha pada gas yang terdapat pada proses 1, proses 2, proses 3, dan proses 4? Diskusikanlah hal tersebut bersama teman-teman Anda.

Contoh 9.1

Suatu gas dipanaskan pada tekanan tetap sehingga memuai, seperti terlihat pada gambar.



Tentukanlah usaha yang dilakukan gas. ($1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$)

Jawab

Diketahui: $p = 2 \text{ atm}$, $V_1 = 0,3 \text{ L}$, dan $V_2 = 0,5 \text{ L}$.

$$1 \text{ liter} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

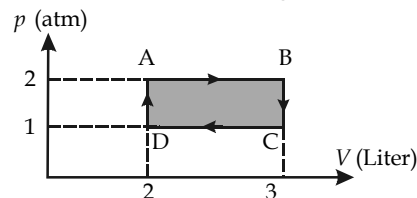
$$W = p (\Delta V) = p (V_2 - V_1) \\ = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (0,5 \text{ L} - 0,2 \text{ L}) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 60 \text{ Joule.}$$



Contoh 9.2

Gambar berikut menunjukkan suatu siklus termodinamika dari suatu gas ideal. Tentukanlah usaha yang dilakukan gas:

- dari keadaan A ke B,
- dari B ke C,
- dari C ke D,
- dari D ke A, dan
- dari A kembali ke A melalui B, C, dan D



Jawab

Diketahui: $p = p_B = 2 \text{ N/m}^2$, $p_D = p_C = 1 \text{ N/m}^2$, $V_A = V_D = 2 \text{ m}^3$, dan $V_B = V_C = 3 \text{ m}^3$.

- $W_{AB} = p (V_B - V_A) = (2 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (3 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 200 \text{ joule}$
- $W_{BC} = p (V_C - V_B) = 0$
- $W_{CD} = p (V_D - V_C) = (1 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (2 - 3) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = -100 \text{ joule}$
- $W_{DA} = p (V_A - V_D) = 0$

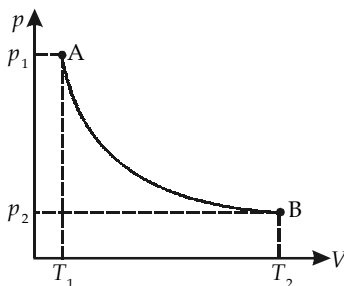
e. $W_{ABCD} = W_{\text{siklus}} = 200 \text{ Joule} + 0 - 100 \text{ Joule} + 0 = 100 \text{ joule}$

selain itu, dapat ditentukan dengan cara

$$\begin{aligned} W_{ABCD} &= W_{\text{siklus}} = \text{luas arsiran} \\ &= (2 - 1) \times 10^5 \text{ N/m}^2 (3 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \\ &= 100 \text{ joule.} \end{aligned}$$

2. Proses dalam Termodinamika

Terdapat empat proses dalam gas pada bahasan termodinamika. Pada pembahasan Bab 8, Anda telah mengenal tiga proses, yaitu isothermal, isobarik, dan isokhorik. Proses yang keempat adalah proses adiabatik. Usaha yang terdapat pada gas yang mengalami proses-proses termodinamika tersebut akan diuraikan sebagai berikut.



Gambar 9.4

A-B merupakan proses isothermal.

a. Proses Isotermal

Proses isothermal adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada suhu tetap. Menurut Hukum Boyle, proses isothermal dapat dinyatakan dengan persamaan

$$pV = \text{konstan}$$

atau

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Dalam proses ini, tekanan dan volume sistem berubah sehingga persamaan $W = p \Delta V$ tidak dapat langsung digunakan. Untuk menghitung usaha sistem dalam proses isothermal ini digunakan cara integral. Misalkan, pada sistem terjadi perubahan yang sangat kecil sehingga persamaan usahanya dapat dituliskan sebagai

$$dW = pdV \quad (9-3)$$

Jika **Persamaan (9-3)** diintegrasikan maka dapat dituliskan

$$\int dW = \int pdV$$

Dari persamaan keadaan gas ideal diketahui bahwa $p = \frac{nRT}{V}$. Oleh karena itu, integral dari **Persamaan (9-3)** dapat dituliskan menjadi

$$\int dW = \int \frac{nRT}{V}$$

Jika konstanta nR , dan besaran suhu (T) yang nilainya tetap dikeluarkan dari integral, akan diperoleh

$$\int dW = n R T \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = n R T \ln V \Big|_{V_1}^{V_2}$$

$$W = n R T (\ln V_2 - \ln V_1)$$

$$\boxed{W = n R T \ln \frac{V_2}{V_1}} \quad \text{atau} \quad \boxed{W = n R T \ln \frac{p_2}{p_1}} \quad (9-4)$$

Contoh 9.3

Sepuluh mol gas helium memuai secara isothermal pada suhu 47°C sehingga volumenya menjadi dua kali volume mula-mula. Tentukanlah usaha yang dilakukan oleh gas helium.

Jawab

Diketahui: $T = 47^\circ\text{C} = (47 + 273) \text{ K} = 320 \text{ K}$ dan $V_2 = 2V_1$.

Usaha yang dilakukan gas pada proses isothermal:

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = (10 \text{ mol}) (8,31 \text{ J/mol})(320 \text{ K}) \ln \frac{2V}{V} = 26.592 \ln 2 = 18.428 \text{ joule}$$

b. Proses Isokhorik

Proses isokhorik adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada volume tetap. Menurut Hukum Gay-Lussac proses isokhorik pada gas dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{p}{T} = \text{konstan}$$

atau

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Oleh karena perubahan volume dalam proses isokhorik $\Delta V = 0$ maka usahanya $W = 0$.

c. Proses Isobarik

Proses isobarik adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada tekanan tetap. Menurut Hukum Charles, persamaan keadaan gas pada proses isobarik dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{V}{T} = \text{konstan}$$

atau

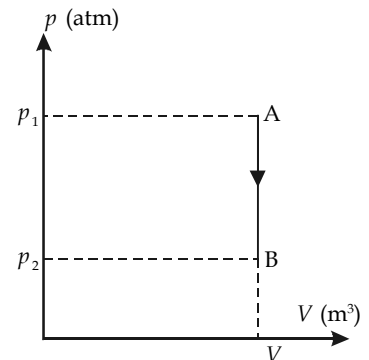
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Oleh karena volume sistem berubah, sedangkan tekanannya tetap, usaha yang dilakukan oleh sistem dinyatakan dengan persamaan

$$\boxed{W = p \Delta V = p (V_2 - V_1)} \quad (9-5)$$

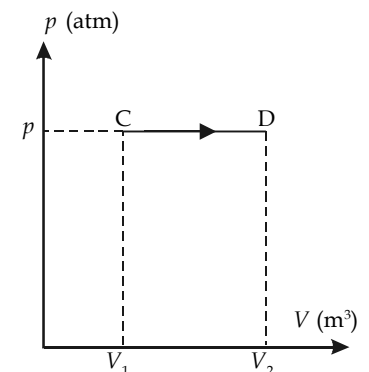
Contoh 9.4

Suatu gas yang volumenya 1,2 liter perlahan-lahan dipanaskan pada tekanan tetap $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ hingga volumenya menjadi 2 liter. Berapakah usaha yang dilakukan gas?



Gambar 9.5

A-B merupakan proses isokhorik.



Gambar 9.6

C-D adalah proses isobarik.



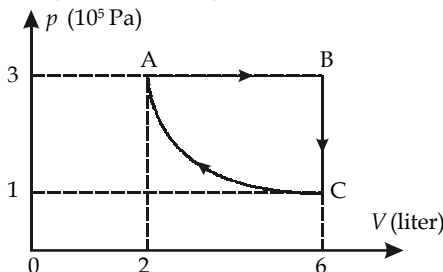
Jawab

Diketahui: $V_1 = 1,2 \text{ L}$, $V_2 = 2 \text{ L}$, dan $p = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.
 $1 \text{ liter} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$

Usaha yang dilakukan gas pada tekanan tetap (isobarik) adalah
 $W = p (V_2 - V_1) = (1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (2 - 1,2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 120 \text{ joule}$

Contoh 9.5

Suatu gas ideal mengalami proses siklus seperti grafik $p - V$ berikut.



Tentukanlah:

- usaha gas dari A ke B,
- usaha gas dari B ke C,
- usaha gas dari C ke A, dan
- usaha netto gas dalam satu siklus.

Jawab

Diketahui: $p_A = p_B = 3 \times 10^5 \text{ Pa}$, $p_C = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_A = 2 \text{ L}$, dan $V_B = V_C = 6 \text{ L}$.

- Proses A ke B adalah proses isobarik. Usaha dari A ke B dapat dihitung dengan persamaan $W_{AB} = p(V_B - V_A)$
 $= 3 \times 10^5 \text{ Pa} (6 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1.200 \text{ joule}$
- Proses B ke C adalah proses isokhorik. Oleh karena $V_C = V_B$, usaha yang dilakukan gas $W_{BC} = 0$
- Proses dari C ke A adalah isothermal. Oleh karena $p_C V_C = p_A V_A$, usaha dari C ke A adalah

$$W_{CA} = nRT \ln \frac{V_A}{V_C} = p_C V_C \ln \frac{V_A}{V_C} = p_A V_A \ln \frac{V_A}{V_C} \quad (\text{ingat: } pV = nRT)$$

$$W_{CA} = (1 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(6 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \ln \frac{2}{6} = -415,8 \text{ joule}$$

- Usaha netto gas dalam satu siklus ABCA :

$$W_{\text{siklus}} = W_{AB} + W_{BC} + W_{CA} = 1.200 \text{ joule} + 0 + (-415,8 \text{ joule}) = 784,2 \text{ joule}$$

Kata Kunci

- Efisiensi mesin kalor
- Energi dalam
- Hukum Pertama Termodinamika
- Kalor
- Kapasitas kalor
- Lingkungan
- Mesin Carnot
- Proses adiabatik
- Reservoir kalor
- Siklus Carnot
- Sistem

d. Proses Adiabatik

Proses adiabatik adalah suatu proses perubahan keadaan gas di mana tidak ada kalor (Q) yang masuk atau keluar dari sistem (gas). Proses ini dapat dilakukan dengan cara mengisolasi sistem menggunakan bahan yang tidak mudah menghantarkan kalor atau disebut juga *bahan adiabatik*. Adapun, bahan-bahan yang bersifat mudah menghantarkan kalor disebut bahan diatermik

Proses adiabatik ini mengikuti persamaan Poisson sebagai berikut

$$p V^\gamma = \text{konstan}$$

atau

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad (9-6)$$

Oleh karena persamaan gas ideal dinyatakan sebagai $pV = nRT$ maka **Persamaan (9-4)** dapat ditulis

$$T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)} \quad (9-7)$$

dengan $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ = konstanta Laplace, dan $\frac{C_p}{C_v} > 1$. C_p adalah kapasitas kalor

gas pada tekanan tetap dan C_v adalah kalor gas pada volume tetap. Perhatikan diagram $p - V$ pada **Gambar 9.7**. Dari kurva hubungan $p - V$ tersebut, Anda dapat mengetahui bahwa:

- 1) Kurva proses adiabatik lebih curam daripada kurva proses isotermal.
- 2) Suhu, tekanan, maupun volume pada proses adiabatik *tidak* tetap.

Oleh karena sistem tidak melepaskan atau menerima kalor, pada kalor sistem proses adiabatik Q sama dengan nol. Dengan demikian, usaha yang dilakukan oleh sistem hanya mengubah energi dalam sistem tersebut. Besarnya usaha pada proses adiabatik tersebut dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$W = \frac{3}{2} nR(T_1 - T_2) = \frac{3}{2} (p_1 V_1 - p_2 V_2) \quad (9-8)$$

Contoh 9.6

Sebuah mesin memiliki rasio pemampatan 12 : 1 yang berarti bahwa setelah pemampatan, volume gas menjadi $\frac{1}{12}$ volume awalnya. Anggap bahan bakar bercampur udara pada suhu 35°C , tekanan 1 atm, dan $\gamma = 1,4$. Jika proses pemampatan terjadi secara adiabatik, hitunglah tekanan pada keadaan akhir dan suhu campuran.

Jawab

Diketahui: $V_2 = \frac{1}{12} V_1$, $T_1 = 35 + 273 = 308 \text{ K}$, dan $p_1 = 1 \text{ atm}$.

Untuk menentukan tekanan akhir p_2 , gunakan rumus

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \rightarrow p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \rightarrow p_2 = 1 \left(\frac{V_1}{\frac{1}{12} V_1} \right)^{1,4} = (12)^{1,4} = 32,4 \text{ atm}.$$

Suhu campuran atau suhu akhir T_2 diperoleh sebagai berikut:

$$T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)} \rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_2 = 308 \text{ K} (12)^{1,4-1} = 308 \text{ K} (12)^{0,4} = 832 \text{ K} = 559^\circ\text{C}$$

Contoh 9.7

Usaha sebesar $2 \times 10^3 \text{ J}$ diberikan secara adiabatik untuk memampatkan 0,5 mol gas ideal monoatomik sehingga suhu mutlaknya menjadi 2 kali semula. Jika konstanta umum gas $R = 8,31 \text{ J/mol K}$, tentukanlah suhu awal gas.

Jawab

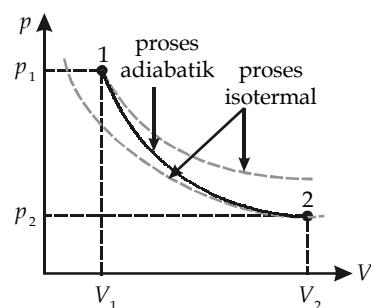
Diketahui: $W = 2 \times 10^3 \text{ J}$, $T_2 = 2T_1$, dan $n = 0,5 \text{ mol}$.

$$W = \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) = \frac{3}{2} n R (2T_1 - T_1)$$

$$= \frac{3}{2} n R T_1$$

$$T_1 = \frac{2W}{3 n R} = \frac{2(2 \times 10^3 \text{ joule})}{3 \times 0,5 \text{ mol} \times 8,31 \text{ J/molK}} = 321 \text{ K}$$

Jadi, suhu awal gas adalah 321 K.



Gambar 9.7

Pada proses adiabatik, kurva $p - V$ lebih curam dibandingkan dengan kurva $p - V$ pada proses isotermal.

Loncatan Kuantum



OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) adalah sebuah pembangkit tenaga listrik mini. Mesin ini bekerja berdasarkan perbedaan suhu antara permukaan laut yang hangat dan kedalaman laut yang dingin. Pusat pembangkit listrik ini bebas polusi.

Quantum Leap

The mini - OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) power plant pictured here is a heat engine that operates on the temperature difference between warm surface water and cold deep water. This is a nonpolluting power plant.

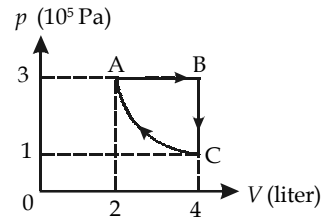
Sumber: *Conceptual Physics*, 1998



Soal Penguasaan Materi 9.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Suatu gas ideal monoatomik di dalam ruang tertutup memiliki tekanan $1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ dan volume 40 liter. Jika gas memuai secara isobarik sehingga volumenya menjadi 50 liter, gas akan menyerap kalor dari lingkungan sebesar 2 kJ. Tentukanlah:
 - a. usaha yang dilakukan gas, dan
 - b. perubahan energi dalam gas.
2. Suatu gas ideal mengalami proses menurut siklus, seperti diagram p - V berikut.



Tentukanlah kerja yang dihasilkan pada proses berdasarkan siklus tersebut.

B Hukum Pertama Termodinamika

Dari pembahasan materi Bab 8, Anda telah mengetahui bahwa suhu gas berhubungan dengan energi kinetik yang dimiliki oleh gas tersebut. Anda juga telah mempelajari hubungan antara energi kinetik dan energi dalam yang dimiliki oleh gas. Perubahan energi dalam dapat terjadi jika terjadi perubahan suhu (energi dalam akan meningkat jika suhu gas (sistem) meningkat atau pada gas diberikan kalor). Apakah perubahan energi dalam dapat terjadi pada gas yang diberi atau melakukan usaha mekanik?

Hubungan antara kalor yang diterima atau dilepaskan suatu sistem, usaha yang dilakukan pada sistem, serta perubahan energi dalam sistem yang ditimbulkan oleh kalor dan usaha tersebut dijelaskan dalam Hukum Pertama Termodinamika.

Hukum Pertama Termodinamika adalah perluasan bentuk dari Hukum Kekekalan Energi dalam mekanika. Hukum ini menyatakan bahwa:

"Jumlah kalor pada suatu sistem sama dengan perubahan energi dalam sistem tersebut ditambah usaha yang dilakukan oleh sistem."

Dengan demikian, meskipun energi kalor sistem telah berubah menjadi energi mekanik (usaha) dan energi dalam, jumlah seluruh energi tersebut selalu tetap. Secara matematis, Hukum Pertama Termodinamika dituliskan sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + W \quad (9-9)$$

dengan: Q = kalor yang diterima atau dilepaskan oleh sistem,

$\Delta U = U_2 - U_1$ = perubahan energi dalam sistem, dan

W = usaha yang dilakukan sistem.

Perjanjian tanda yang berlaku untuk **Persamaan (9-9)** tersebut adalah sebagai berikut.

1. Jika sistem melakukan kerja maka nilai W berharga positif.
2. Jika sistem menerima kerja maka nilai W berharga negatif
3. Jika sistem melepas kalor maka nilai Q berharga negatif
4. Jika sistem menerima kalor maka nilai Q berharga positif

Contoh 9.8

Delapan mol gas ideal dipanaskan pada tekanan tetap sebesar $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ sehingga volumenya berubah dari $0,08 \text{ m}^3$ menjadi $0,1 \text{ m}^3$. Jika gas mengalami perubahan energi dalam gas sebesar 1.500 J , berapakah kalor yang diterima gas tersebut.

Jawab

Diketahui: $p = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $V_1 = 0,08 \text{ m}^3$, $V_2 = 0,1 \text{ m}^3$, dan $\Delta U = 1.500 \text{ J}$.

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = \Delta U + p(V_2 - V_1)$$

$$= 1.500 \text{ joule} + 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (0,1 - 0,08) \text{ m}^3 = 1.500 \text{ joule} + 4.000 \text{ joule} = 5.500 \text{ J}$$

Contoh 9.9

Suatu sistem mengalami proses isobarik. Pada sistem dilakukan usaha sebesar 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem ΔU dan kalor yang diserap sistem = 150 joule, berapakah besarnya ΔU ?

Jawab

Diketahui: $W = -100 \text{ joule}$ (dilakukan usaha), dan $Q = 150 \text{ joule}$ (sistem menyerap kalor).

Menurut Hukum Pertama Termodinamika

$$\Delta U = Q - W = 150 \text{ joule} - (-100 \text{ joule}) = 250 \text{ joule}.$$

1. Perubahan Energi Dalam

Perubahan energi dalam ΔU tidak bergantung pada proses bagaimana keadaan sistem berubah, tetapi hanya bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir sistem tersebut.

Anda telah mengetahui bahwa proses-proses dalam termodinamika terbagi atas empat jenis, yaitu isothermal, isokhorik, isobarik, dan adiabatik. Perubahan energi dalam terjadi pada setiap proses tersebut dijelaskan sebagai berikut.

a. Proses Isothermal

Anda telah memahami bahwa proses isothermal merupakan suatu proses yang terjadi dalam sistem pada suhu tetap. Besar usaha yang dilakukan sistem proses isothermal ini adalah $W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$. Oleh karena $\Delta T = 0$, menurut Teori Kinetik Gas, energi dalam sistem juga tidak berubah ($\Delta U = 0$) karena perubahan energi dalam bergantung pada perubahan suhu. Ingatlah kembali persamaan energi dalam gas monoatomik yang dinyatakan dalam persamaan $\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$ yang telah dibahas pada Bab 8. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses isothermal ini dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + W = 0 + W$$

$$Q = W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{9-10}$$

b. Proses Isokhorik

Dalam proses isokhorik perubahan yang dialami oleh sistem berada dalam keadaan volume tetap. Anda telah memahami bahwa besar usaha pada proses isokhorik dituliskan $W = p\Delta V = 0$. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses ini dituliskan sebagai

$$Q = \Delta U + W = \Delta U + 0$$

$$Q = \Delta U = U_2 - U_1 \tag{9-11}$$

Jelajah Fisika

Aeolipile



Hero atau Heron membuat mesin uap pertama yang disebut *aeolipile*. Mesin ini terdiri atas sebuah pemanas yang terletak di bawah suatu kuali dan memiliki dua lubang angin. Uap yang dialirkan ke dalam kuali akan keluar dari lubang angin sehingga akan memutar kincir. Aeolipile tidak memiliki fungsi praktis.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997



Jelajah Fisika

Energi Dalam



Sumber: www.brewed-coffee.com

Energi dalam secangkir kopi hanya bergantung pada keadaan termodinamikanya (seberapa banyak kopi dan air yang dikandungnya, dan berapa suhunya). Energi tersebut tidak bergantung pada proses persiapan kopinya, yaitu lintasan termodinamika yang membawanya ke keadaan yang sekarang.

Sumber: *Fisika Universitas*, 2000

Dari **Persamaan (9-11)** Anda dapat menyatakan bahwa kalor yang diberikan pada sistem hanya digunakan untuk mengubah energi dalam sistem tersebut. Jika persamaan energi dalam untuk gas ideal monoatomik disubstitusikan ke dalam **Persamaan (9-11)**, didapatkan perumusan Hukum Pertama Termodinamika pada proses isokhorik sebagai berikut.

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T \quad (9-12)$$

atau

$$Q = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) \quad (9-13)$$

c. Proses Isobarik

Jika gas mengalami proses isobarik, perubahan yang terjadi pada gas berada dalam keadaan tekanan tetap. Usaha yang dilakukan gas dalam proses ini memenuhi persamaan $W = P \Delta V = p(V_2 - V_1)$. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses isobarik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = \Delta U + p(V_2 - V_1) \quad (9-14)$$

Untuk gas ideal monoatomik, **Persamaan (9-14)** dapat dituliskan sebagai

$$Q = \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) + p (V_2 - V_1) \quad (9-15)$$

d. Proses adiabatik

Dalam pembahasan mengenai proses adiabatik, Anda telah mengetahui bahwa dalam proses ini tidak ada kalor yang keluar atau masuk ke dalam sistem sehingga $Q = 0$. Persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses adiabatik ini dapat dituliskan menjadi

$$Q = \Delta U + W$$

$$0 = \Delta U + W$$

atau

$$W = -\Delta U = -(U_2 - U_1) \quad (9-16)$$

Berdasarkan **Persamaan (9-16)** tersebut, Anda dapat menyimpulkan bahwa usaha yang dilakukan oleh sistem akan mengakibatkan terjadinya perubahan energi dalam sistem di mana energi dalam tersebut dapat bertambah atau berkurang dari keadaan awalnya.

Persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk gas ideal monoatomik pada proses adiabatik ini dituliskan sebagai

$$W = -\Delta U = -\frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) \quad (9-17)$$

2. Kapasitas Kalor

Kapasitas kalor gas adalah banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu gas sebesar 1°C , untuk volume tetap disebut C_v dan untuk tekanan tetap disebut C_p .

Secara matematis, kapasitas kalor (C) dinyatakan dengan persamaan

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (9-18)$$

Pada gas, perubahan suhu dapat dilakukan dengan proses isobarik atau proses isokhorik. Dengan demikian, kapasitas kalor gas dapat dibedakan menjadi dua, yakni kapasitas kalor pada tekanan tetap (C_p) dan kapasitas kalor pada volume tetap (C_v). Perumusan kedua pada kapasitas kalor tersebut secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T} \text{ dan } C_v = \frac{Q_v}{\Delta T} \quad (9-19)$$

Jika besaran Q_p dan Q_v dimasukkan ke dalam persamaan Hukum Pertama Termodinamika, akan didapatkan persamaan berikut.

a. Pada proses isokhorik

$$Q_v = \Delta U + W \quad (9-20)$$

Oleh karena dalam proses ini volume sistem tetap ($\Delta U = 0$) maka usaha sistem $W = 0$ sehingga didapatkan persamaan

$$Q_v = \Delta U \quad (9-21)$$

b. Pada proses isobarik

$$Q_p = \Delta U + W$$

Oleh karena dalam proses ini tekanan sistem tetap ($\Delta p = 0$), usaha sistem $W = p \Delta V$. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika dapat dituliskan

$$Q_p = \Delta U + p \Delta V \quad (9-22)$$

Dengan melakukan substitusi **Persamaan (9-21)** ke **Persamaan (9-22)** dapat dituliskan persamaan

$$Q_p = \Delta U + p \Delta V \text{ atau } Q_p - Q_v = p \Delta V \quad (9-23)$$

Selanjutnya, jika **Persamaan (9-19)** disubstitusikan **Persamaan (9-23)** akan diperoleh persamaan

$$(C_p \Delta T) - (C_v \Delta T) = p \Delta V$$

$$(C_p - C_v) \Delta T = p \Delta V$$

$$C_p - C_v = \frac{p \Delta V}{\Delta T} \quad (9-24)$$

Berdasarkan persamaan keadaan gas ideal $pV = nRT$, **Persamaan (9-24)** dapat dituliskan menjadi

$$C_p - C_v = nR \quad (9-25)$$

Untuk gas monoatomik, energi dalam gas dinyatakan dengan persamaan

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T$$

Dengan demikian, kapasitas kalor pada proses isokhorik ($Q_v = \Delta U$) dapat dituliskan sebagai

$$C_v = \frac{3}{2} nR \quad (9-26)$$

Perlu Anda

Ketahui

Umumnya memasak melibatkan proses isobarik. Hal ini disebabkan karena tekanan udara di atas panci, wajan, atau dalam *oven microwave* tetap konstan sementara makanan dipanaskan.

Sumber: Fisika Universitas, 2000



Besar C_p dapat ditentukan dari **Persamaan (9-25)** sehingga diperoleh

$$C_p = C_v + nR$$

$$C_p = \frac{3}{2}nR + nR$$

$$C_p = \frac{5}{2}nR \quad (9-27)$$

Kerjakanlah 9.3

Cobalah Anda buat di dalam buku latihan Anda, besarnya C_p dan C_v untuk gas diatomik pada suhu rendah, suhu sedang, dan suhu tinggi. Kemudian, bandingkanlah jawaban Anda dengan teman sebangku Anda. Diskusikanlah jawaban Anda tersebut dengan guru Fisika Anda.

Jelajah Fisika

Sadi Carnot



Sumber: www.a-ff.it

Sadi Carnot ialah seorang ilmuwan yang lahir di Paris, Prancis. Sebagian besar waktunya ia gunakan untuk menyelidiki mesin uap. Pada 1824, ia mempublikasikan esai yang berjudul *Reflexions sur la puissance motrice du feu*. Penemuannya menjadi dasar ilmu termodinamika dan memberikan manfaat besar terhadap kehidupan manusia.

Sumber: www.allbiographies.com

Contoh 9.10

Gas nitrogen bermassa 56×10^{-3} kg dipanaskan dari suhu 270 K menjadi 310 K. Jika nitrogen ini dipanaskan dalam bejana yang bebas memuai, diperlukan kalor sebanyak 2,33 kJ. Jika gas nitrogen ini dipanaskan dalam bejana kaku (tidak dapat memuai), diperlukan kalor sebesar 1,66 kJ. Jika massa molekul relatif nitrogen 28 g/mol, hitunglah kapasitas kalor gas nitrogen dan tetapan umum gas.

Jawab

Diketahui: $m = 56 \times 10^{-3}$ kg, $\Delta T = 40$ K, dan $M_r = 28$ g/mol = 28×10^{-3} kg/mol.

a. Proses tekanan tetap pada gas:

$$Q_p = 2,33 \text{ kJ} = 2.330 \text{ J}$$

$$Q_p = C_p (\Delta T)$$

$$2.330 \text{ J} = C_p (40 \text{ K}) \rightarrow C_p = 58,2 \text{ J/K}$$

Proses volume tetap pada gas:

$$Q_v = 1,66 \text{ kJ} = 1.660 \text{ J}$$

$$Q_v = C_v (\Delta T)$$

$$1.660 \text{ joule} = C_v (40 \text{ K}) \rightarrow C_v = 41,5 \text{ J/K}$$

b. Tetapan umum gas R dihitung sebagai berikut.

$$C_p - C_v = nR = \frac{m}{M_r} R \rightarrow R = \frac{M_r}{m} (C_p - C_v)$$

$$R = \frac{28 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}{56 \times 10^{-3} \text{ kg}} (58,2 - 41,5) \text{ J/K} = 8,35 \text{ J/mol K}$$

3. Siklus Carnot dan Efisiensi Mesin

Keadaan suatu sistem dalam termodinamika dapat berubah-ubah, berdasarkan percobaan besaran-besaran keadaan sistem tersebut. Namun, besaran-besaran keadaan tersebut hanya berarti jika sistem berada dalam keadaan setimbang. Misalnya, jika Anda mengamati suatu gas yang sedang memuai di dalam tabung, temperatur dan tekanan gas tersebut di setiap bagian tabung dapat berubah-ubah. Oleh karena itu, Anda tidak dapat menentukan suhu dan temperatur gas saat kedua besaran tersebut masih berubah. Agar dapat menentukan besaran-besaran keadaan gas, gas harus dalam keadaan *reversibel*. Apakah yang dimaksud dengan proses reversibel? Proses reversibel adalah suatu proses dalam sistem di mana sistem hampir selalu berada dalam keadaan setimbang.

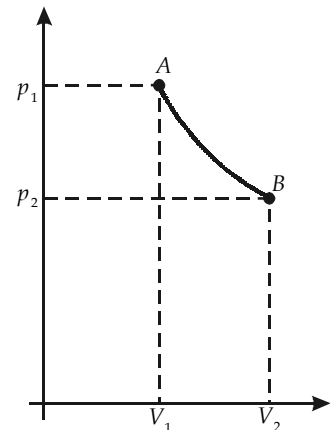
Perhatikanlah **Gambar 9.8**. Dari grafik p - V tersebut, suatu gas mengalami perubahan keadaan dari A ke B. Diketahui bahwa pada keadaan A sistem memiliki tekanan p_1 dan volume V_1 . Pada tekanan B, tekanan sistem berubah menjadi p_2 dan volumenya menjadi V_2 . Jika gas tersebut mengalami proses reversibel, keadaan gas tersebut dapat dibalikkan dari keadaan B ke A dan tidak ada energi yang terbuang. Oleh karena itu, pada proses reversibel, kurva p - V yang dibentuk oleh perubahan keadaan sistem dari A ke B dan dari B ke A adalah sama.

Dalam kenyataannya, sulit untuk menemukan proses reversibel karena proses ini tidak memperhitungkan energi yang hilang dari dalam sistem (misalnya, gesekan). Namun, proses reversibel memenuhi Hukum Pertama Termodinamika.

Tahukah Anda yang dimaksud dengan siklus termodinamika? Siklus termodinamika adalah proses yang terjadi pada sistem sehingga akhirnya sistem kembali pada keadaan awalnya.

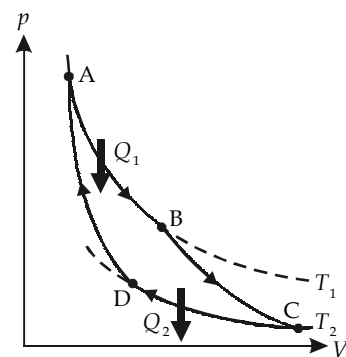
Prinsip siklus termodinamika ini kali pertama dijelaskan oleh seorang insinyur Perancis bernama **Sadi Carnot** dan disebut siklus Carnot. Siklus Carnot adalah suatu siklus ideal reversibel yang terdiri atas dua proses isotermal dan proses adiabatik, seperti terlihat pada **Gambar 9.9**.

Siklus Carnot ini merupakan salah satu prinsip dasar siklus termodinamika yang digunakan untuk memahami cara kerja mesin Carnot. Perhatikanlah **Gambar 9.10** berikut.



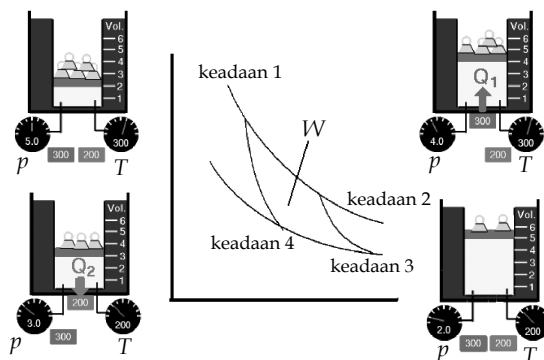
Gambar 9.8

Perubahan keadaan gas dalam siklus reversibel.



Gambar 9.9

Siklus Carnot



Sumber: www.nasa.gov

Pada gambar tersebut suatu gas ideal berada di dalam silinder yang terbuat dari bahan yang tidak mudah menghantarkan panas. Volume silinder tersebut dapat diubah dengan cara memindahkan posisi pistonnya. Untuk mengubah tekanan gas, diletakkan beberapa beban di atas piston. Pada sistem gas ini terdapat dua sumber kalor yang disebut reservoir suhu tinggi (memiliki suhu 300 K) gas memiliki temperatur tinggi (300 K), tekanan tinggi (4 atm), dan volume rendah (4 m³).

Berikut urutan keempat langkah proses yang terjadi dalam siklus Carnot.

- Pada langkah, gas mengalami ekspansi isotermal. Reservoir suhu tinggi menyentuh dasar silinder dan jumlah beban di atas piston dikurangi. Selama proses ini berlangsung, temperatur sistem tidak berubah, namun volume sistem bertambah. Dari keadaan 1 ke keadaan 2, sejumlah kalor (Q_1) dipindahkan dari reservoir suhu tinggi ke dalam gas.
- Pada langkah kedua, gas berubah dari keadaan 2 ke keadaan 3 dan mengalami proses ekspansi adiabatik. Selama proses ini berlangsung, tidak ada kalor yang keluar atau masuk ke dalam sistem. Tekanan gas diturunkan dengan cara mengurangi beban yang ada di atas piston. Akibatnya, temperatur sistem akan turun dan volumenya bertambah.
- Pada langkah ketiga, keadaan gas berubah dari keadaan 3 ke keadaan 4 melalui proses kompresi isotermal. Pada langkah ini, reservoir suhu rendah (200 K) menyentuh dasar silinder dan jumlah beban di atas piston bertambah. Akibatnya tekanan sistem meningkat, temperaturnya

Gambar 9.10

Siklus Carnot pada mesin Carnot.



Jelajah Fisika

Lokomotif Uap



Sumber: www.midcontinent.org

Lokomotif uap ini bekerja dengan menggunakan hukum pertama termodinamika. Saat panas dihasilkan oleh batubara atau kayu yang dibakar dalam mesin lokomotif, sebagian energi menaikkan suhu air (yang mendidih dan menghasilkan uap) dalam mesin. Sisa energi dipakai guna mengekspansikan uap untuk menghasilkan kerja dan menggerakkan lokomotif.

Sumber: *Fisika Universitas*, 1998

konstan, dan volume sistem menurun. Dari keadaan 3 ke keadaan 4, sejumlah kalor (Q_2) dipindahkan dari gas ke reservoir suhu rendah untuk menjaga temperatur sistem agar tidak berubah.

- d. Pada langkah keempat, gas mengalami proses kompresi adiabatik dan keadaannya berubah dari keadaan 4 ke keadaan 1. Jumlah beban di atas piston bertambah. Selama proses ini berlangsung, tidak ada kalor yang keluar atau masuk ke dalam sistem, tekanan sistem meningkat, dan volumenya berkurang.

Menurut kurva hubungan p - V dari siklus Carnot, usaha yang dilakukan oleh gas adalah luas daerah di dalam kurva p - V siklus tersebut. Oleh karena siklus selalu kembali ke keadaannya semula, $\Delta U_{\text{siklus}} = 0$ sehingga persamaan usaha siklus (W_{siklus}) dapat dituliskan menjadi

$$W_{\text{siklus}} = \Delta Q_{\text{siklus}} = (Q_1 - Q_2) \quad (9-28)$$

dengan: Q_1 = kalor yang diserap sistem, dan
 Q_2 = kalor yang dilepaskan sistem.

Ketika mesin mengubah energi kalor menjadi energi mekanik (usaha). Perbandingan antara besar usaha yang dilakukan sistem (W) terhadap energi kalor yang diserapnya (Q_1) disebut sebagai *efisiensi mesin*. Persamaan matematis efisiensi mesin ini dituliskan dengan persamaan

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% \quad (9-29)$$

dengan η = efisiensi mesin.

Oleh karena usaha dalam suatu siklus termodinamika dinyatakan dengan $W = Q_1 - Q_2$ maka **Persamaan (9-30)** dapat dituliskan menjadi

$$\eta = \left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right) \times 100\% \quad (9-30)$$

Pada mesin Carnot, besarnya kalor yang diserap oleh sistem (Q_1) sama dengan temperatur reservoir suhu tingginya (T_1). Demikian juga, besarnya kalor yang dilepaskan sistem (Q_2) sama dengan temperatur reservoir suhu rendah mesin Carnot tersebut. Oleh karena itu, **Persamaan (9-30)** dapat dituliskan menjadi

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \times 100\% \quad (9-31)$$

Dari **Persamaan (9-31)** tersebut, Anda dapat menyimpulkan bahwa efisiensi mesin Carnot dapat ditingkatkan dengan cara menaikkan temperatur reservoir suhu tinggi atau menurunkan temperatur reservoir suhu rendah.

Kerjakanlah 9.4

Selain siklus Carnot, terdapat dua siklus termodinamika lainnya, yakni siklus Otto dan siklus Diesel. Buatlah sebuah makalah yang menerangkan tentang kedua siklus tersebut dan aplikasinya pada mesin Otto dan mesin Diesel. Kemudian, presentasikanlah makalah yang Anda buat tersebut.

Contoh 9.11

Sebuah mesin gas ideal bekerja dalam suatu siklus Carnot antara suhu tinggi T_1 °C dan dan suhu rendah 127°C. Jika mesin menyerap kalor 60 kkal pada suhu tertinggi dan membuang kalor 48 kkal, hitunglah:

- usaha yang dihasilkan dalam satu siklus,
- efisiensi mesin tersebut, dan
- besarnya suhu tinggi T_1 .

Jawab

Diketahui: $T_2 = 127^\circ \text{C}$, $Q_1 = 60 \text{ kkal}$, dan $Q_2 = 48 \text{ kkal}$.

- Berdasarkan Hukum Pertama termodinamika:

$$W = Q_1 - Q_2 = 60 \text{ kkal} - 48 \text{ kkal} = 12 \text{ kkal}$$

- Efisiensi mesin Carnot

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \frac{12 \text{ kkal}}{60 \text{ kkal}} \times 100\% = 20\%$$

- Efisiensi mesin dalam bentuk suhu dinyatakan dengan persamaan

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \rightarrow 20\% = \left(1 - \frac{400 \text{ K}}{T_1}\right) \times 100\%$$

$$\frac{400 \text{ K}}{T_1} = 1 - 0,2 \rightarrow T_1 = \frac{400 \text{ K}}{0,8} = 500 \text{ K} = 227^\circ \text{C}$$

Contoh 9.12

Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi bersuhu 800 K memiliki efisiensi 40%. Agar efisiensi maksimumnya naik menjadi 50%, tentukanlah kenaikan suhu yang harus dilakukan pada reservoir suhu tinggi.

Jawab

Diketahui: $T_1 = 800 \text{ K}$, $\eta_1 = 40\%$, dan $\eta_2 = 50\%$.

Cara umum

- Efisiensi mesin semula $\eta_1 = 40\%$

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_2}{T_1} \rightarrow 40\% = 1 - \frac{T_2}{800 \text{ K}} \rightarrow \frac{T_2}{800 \text{ K}} = 0,6 \rightarrow T_2 = 480 \text{ K}$$

- Agar efisiensi menjadi $\eta_2 = 50\%$ untuk $T_2 = 480 \text{ K}$

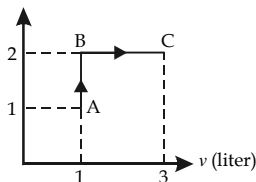
$$\eta_2 = 1 - \frac{T_2}{T_1} \rightarrow 50\% = 1 - \frac{480 \text{ K}}{T_1} \rightarrow \frac{480 \text{ K}}{T_1} = 0,5 \rightarrow T_1 = 960 \text{ K}$$

Jadi, temperatur suhu tinggi harus dinaikkan menjadi 960 K.

Soal Penguasaan Materi 9.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

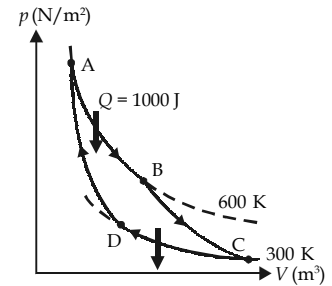
- Suatu gas monoatomik mengalami proses termodinamika seperti grafik berikut ini.



- Tentukanlah:
- Usaha yang dilakukan gas selama proses ABC
 - Perubahan energi dalam
 - Kalor yang diserap selama proses ABC
- Suatu gas ideal diekspansikan secara adiabatik sehingga volumenya menjadi dua kali volume mula-mula. Pada proses tersebut gas melakukan kerja sebesar 1.860 joule.
 - Berapakah kalor yang diterima gas?
 - Berapakah perubahan energi dalam gas?

Solusi Cerdas

Suatu mesin Carnot bekerja di antara suhu 600 K dan 300 K serta menerima kalor sebesar 1.000 joule (seperti terlihat pada gambar). Usaha yang dilakukan mesin dalam satu siklus adalah



- 300 J
- 400 J
- 500 J
- 600 J
- 700 J

Penyelesaian

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{600 \text{ K} - 300 \text{ K}}{600 \text{ K}} \times 100\% = 50\%$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{W}{1.000 \text{ J}}$$

$$W = 500 \text{ joule}$$

Jawab: c

Soal UAN Fisika 2004/2005



3. Dua mol gas monoatomik didinginkan pada tekanan konstan $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ sehingga volumenya mengecil dari $0,1 \text{ m}^3$ menjadi $0,05 \text{ m}^3$. Kemudian, gas tersebut mengalami proses ekspansi isothermal sampai volumenya berubah menjadi $0,1 \text{ m}^3$.
 - a. Berapakah usaha yang diterima gas?
 - b. Berapakah kalor yang diserap gas?
4. Empat mol gas monoatomik (dianggap gas ideal) pada sebuah mesin mengalami proses reversibel dalam suatu siklus berikut ini.
 - 1) Ekspansi isothermal dari volume $0,02 \text{ m}^3$ menjadi $0,04 \text{ m}^3$ pada temperatur 127°C .
 - 2) Pada volume tetap, gas didinginkan sampai suhu 27°C .
 - 3) Gas dikompresi secara isothermal pada suhu 27°C sehingga volumenya menjadi $0,02 \text{ m}^3$.
 - 4) Pada volume tetap, gas dikompresi sampai kembali ke keadaan semula.
 Tentukan:
 - a. Besarnya usaha yang dilakukan mesin dalam suhu siklus.
 - b. C_v dan C_p dari gas monoatomik tersebut.

C Hukum Kedua Termodinamika

1. Entropi

Pada pembahasan mengenai siklus Carnot dan mesin Carnot, proses termodinamika yang terjadi selama proses tersebut mampu mengubah seluruh energi kalor menjadi usaha dan tidak ada energi yang hilang. Siklus termodinamika yang telah dibahas pada subbab B merupakan siklus ideal yang tidak pernah ditemui dalam kehidupan nyata.

Sebagai contoh sederhana, misalkan Anda memasukkan sebuah bola besi panas ke dalam bejana yang berisi air dingin. Anda tentunya telah memahami bahwa kalor akan berpindah dari bola besi ke air sehingga suhu keduanya sama atau dikatakan keduanya telah berada dalam kesetimbangan termal. Namun, jika Anda membalik proses ini dengan cara memasukkan bola besi dingin ke dalam air panas, mungkinkah suhu bola besi tersebut naik dan suhu air turun dan keduanya mencapai kesetimbangan termal yang sama, seperti pada keadaan sebelumnya?

Proses termodinamika yang melakukan proses aliran kalor dari benda (reservoir) bersuhu rendah ke benda (reservoir) bersuhu tinggi, seperti yang dimisalkan tersebut tidak mungkin terjadi secara spontan (tanpa ada usaha yang diberikan ke dalam sistem).

Hal inilah yang kemudian diteliti oleh Clausius dan Kelvin-Planck sehingga menghasilkan rumusan Hukum Kedua Termodinamika. Berikut pernyataan Kelvin-Planck dan Clausius.

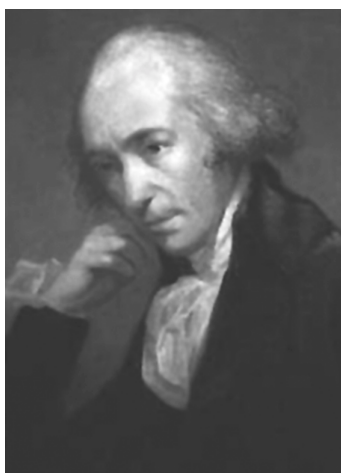
- a. Menurut Clausius, kalor tidak dapat berpindah dari benda bersuhu rendah ke benda bersuhu tinggi tanpa adanya usaha luar yang diberikan kepada sistem.
- b. Menurut Kelvin-Planck, tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam suatu siklus dan menghasilkan seluruh kalor yang diserapnya menjadi usaha.

Dalam menyatakan Hukum Kedua Termodinamika ini, Clausius memperkenalkan besaran baru yang disebut *entropi* (S). Entropi adalah besaran yang menyatakan banyaknya energi atau kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha. Ketika suatu sistem menyerap sejumlah kalor Q dari *reservoir* yang memiliki temperatur mutlak, entropi sistem tersebut akan meningkat dan entropi reservoirnya akan menurun sehingga perubahan entropi sistem dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (9-32)$$

Jelajah Fisika

James Watt (1736–1819)

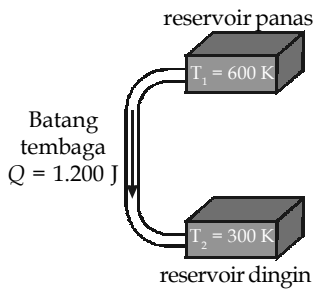


Watt adalah seorang ilmuwan dan insinyur besar yang berasal dari Britania. Ia menciptakan mesin uap pertama, yang menjadi kekuatan utama terjadinya Revolusi Industri Eropa.

Sumber: www.a-ff.it

Persamaan (3-2) tersebut berlaku pada sistem yang mengalami siklus reversibel dan besarnya perubahan entropi (ΔS) hanya bergantung pada keadaan akhir dan keadaan awal sistem.

Contoh 9.13



Gambar di samping menunjukkan bahwa 1.200 J kalor mengalir secara spontan dari reservoir panas bersuhu 600 K ke reservoir dingin bersuhu 300 K. Tentukanlah jumlah entropi dari sistem tersebut. Anggap tidak ada perubahan lain yang terjadi.

Jawab

Diketahui $Q = 1.200 \text{ J}$, $T_1 = 600 \text{ K}$, dan $T_2 = 300 \text{ K}$.
Perubahan entropi reservoir panas:

$$\Delta S_1 = \frac{-Q_1}{T_1} = \frac{-1.200 \text{ J}}{600 \text{ K}} = -2 \text{ J/K}$$

Perubahan entropi reservoir dingin:

$$\Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{1200 \text{ J}}{300 \text{ K}} = 4 \text{ J/K}$$

Total perubahan entropi total adalah jumlah aljabar perubahan entropi setiap reservoir:

$$\Delta S_{\text{sistem}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -2 \text{ J/K} + 4 \text{ J/K} = +2 \text{ J/K}$$

2. Mesin Pendingin (Refrigerator)

Kalor dapat dipaksa mengalir dari benda dingin ke benda panas dengan melakukan usaha pada sistem. Peralatan yang bekerja dengan cara seperti ini disebut mesin pendingin (*refrigerator*). Contohnya lemari es dan pendingin ruangan (*Air Conditioner*). Perhatikan **Gambar 9.11**. Dengan melakukan usaha W pada sistem (pendingin), sejumlah kalor Q_2 diambil dari reservoir bersuhu rendah T_2 (misalnya, dari dalam lemari es). Kemudian, sejumlah kalor Q_1 dibuang ke reservoir bersuhu tinggi T_1 (misalnya, lingkungan di sekitar lemari es).

Ukuran kemampuan sebuah mesin pendingin dinyatakan sebagai koefisien daya guna (*koefisien performansi*) yang diberi lambang K_p dan dirumuskan dengan persamaan

$$K_p = \frac{Q_2}{W} \quad (9-33)$$

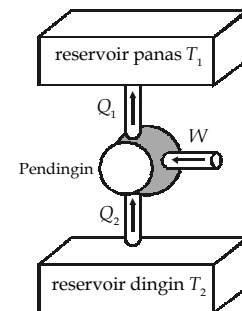
Oleh karena usaha yang diberikan pada mesin pendingin tersebut dinyatakan dengan $W = Q_1 - Q_2$, **Persamaan (9-33)** dapat ditulis menjadi

$$K_p = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \quad (9-34)$$

Jika gas yang digunakan dalam sistem mesin pendingin adalah gas ideal, **Persamaan (9-34)** dapat dituliskan menjadi

$$K_p = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (9-35)$$

Lemari es dan pendingin ruangan memiliki koefisien performansi dalam jangkauan 2 sampai dengan 6. Semakin tinggi nilai K_p , semakin baik mesin pendingin tersebut.



Gambar 9.11

Skema kerja mesin pendingin (*refrigerator*).

Kata Kunci

- Entropi
- Hukum Kedua Termodinamika
- Mesin pendingin

Contoh 9.14

Sebuah lemari es memiliki koefisien performansi 6. Jika suhu ruang di luar lemari es adalah 28°C , berapakah suhu paling rendah di dalam lemari es yang dapat diperoleh?

Jawab

Diketahui: $K_p = 6$, dan $T_1 = 28^{\circ}\text{C}$.

Koefisien performansi maksimum diperoleh sebagai berikut: $K_p = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$ dengan T_1 adalah suhu tinggi dan T_2 adalah suhu rendah. Dari persamaan tersebut diperoleh

$$\begin{aligned}(K_p) T_1 - (K_p) T_2 &= T_2 \\ (K_p) T_1 &= (1 + K_p) T_2 \\ T_2 &= \frac{K_p}{(K_p + 1)} T_1\end{aligned}$$

Dari soal diketahui $T_1 = (28 + 273)\text{ K} = 301\text{ K}$ dan $K_p = 6,0$ sehingga suhu paling rendah di dalam lemari es T_2 dapat dihitung.

$$T_2 = \frac{6,0}{1 + 6,0} \times (301\text{ K}) = 258\text{ K} \text{ atau } -15^{\circ}\text{C}.$$

Soal Penguasaan Materi 9.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Satu kilogram es pada 0°C dicairkan dan diubah menjadi air pada 0°C . Hitunglah perubahan entropinya, asumsikan bahwa peleburan berlangsung secara reversibel.
2. Sebuah mesin Carnot yang mengambil 2.000 J kalor dari reservoir pada 500 K , melakukan kerja dan membuang sejumlah panas ke reservoir pada 350 K . Tentukanlah:
 - a. perubahan entropi selama ekspansi isothermal,
 - b. perubahan entropi selama kompresi isothermal, dan
 - c. perubahan entropi total dalam mesin.
3. Sebuah *refrigerator* membutuhkan usaha $68,2\text{ kJ}$ untuk membuat es batu dari 1 liter air pada suhu 10°C . Tentukanlah:
 - a. energi panas yang harus dikeluarkan, dan
 - b. koefisien performansi refrigerator.

Pembahasan Soal *SPMB*

Sebuah mesin Carnot menerima 2.000 J dari reservoir panas dan melepaskan 1.750 J pada reservoir dingin. Dengan demikian, efisiensi mesin tersebut adalah

- 6,25%
- 10%
- 12,5%
- 25%
- 87,5%

Penyelesaian

Informasi yang diketahui dari soal:

$$Q_1 = 2.000 \text{ J}$$

$$Q_2 = 1.750 \text{ J}$$

Usaha yang dilakukan oleh mesin Carnot adalah

$$W = Q_2 - Q_1$$

$$\text{Efisiensinya: } \eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{2.000 - 1.750}{2.000} \times 100\%$$

$$\eta = 12,5\%$$

Jawab: c

Soal UMPTN, 1995

Rangkuman

- Sistem** dalam termodinamika adalah bagian ruang atau benda yang menjadi pusat perhatian pengamatan.
- Lingkungan** dalam termodinamika adalah segala sesuatu yang berada di luar sistem dan memengaruhi sistem.
- Hukum Pertama Termodinamika** menyatakan bahwa jumlah energi yang diberikan pada sistem sama dengan perubahan energi dalam sistem ditambah usaha yang dilakukannya
$$Q = \Delta U + W$$
- Pada proses isokhorik, $\Delta W = 0$
 - Pada proses isothermal, $\Delta U = 0$
 - Pada proses adiabatik, $Q = 0$
- Hukum Kedua Termodinamika** memberi batasan terhadap perubahan energi yang dapat berlangsung atau tidak dapat berlangsung.

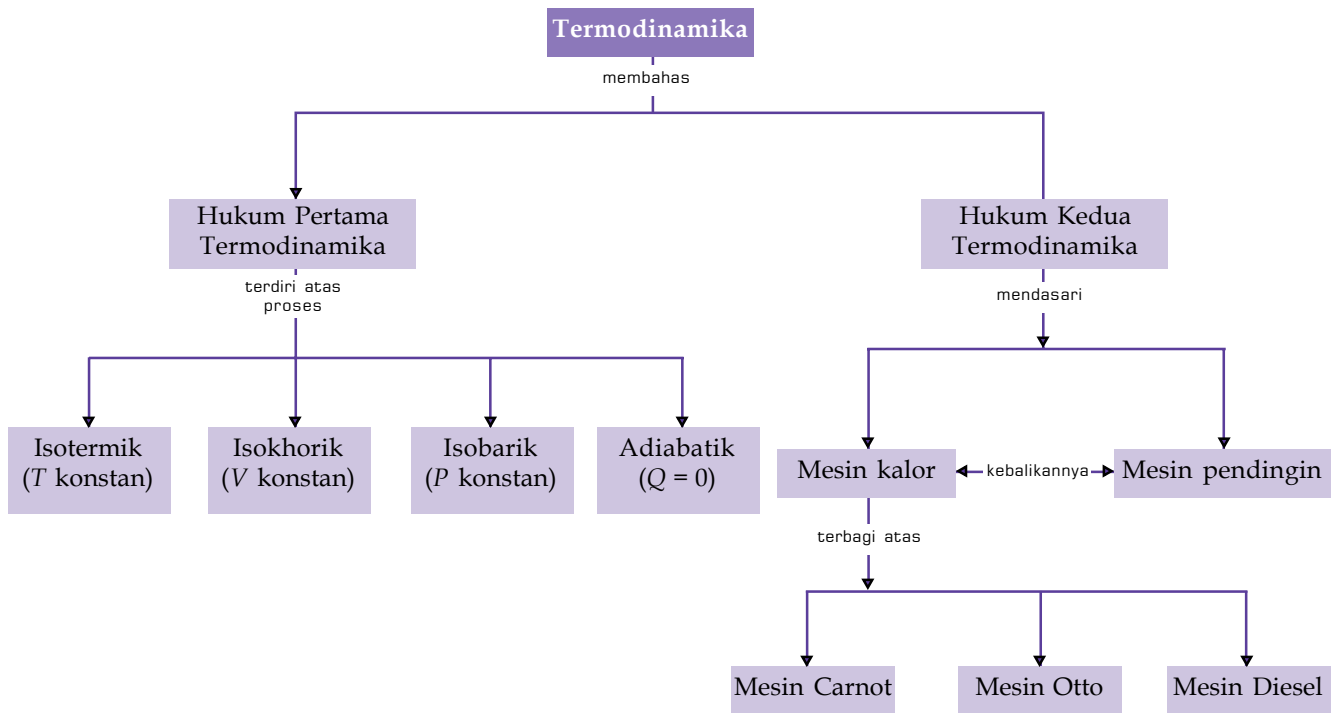
- Entropi** adalah suatu ukuran banyaknya kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha.

$$\Delta S = \left(\frac{Q}{T} \right)$$

- Mesin kalor** mengubah energi termal menjadi usaha dengan cara memindahkan kalor dari reservoir bersuhu tinggi ke reservoir bersuhu rendah.
- Efisiensi mesin kalor**
$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$
- Mesin pendingin** memerlukan usaha untuk memindahkan kalor dari reservoir bersuhu rendah ke reservoir bersuhu tinggi.
- Efisiensi mesin pendingin**

$$K_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Peta Konsep



Kaji Diri

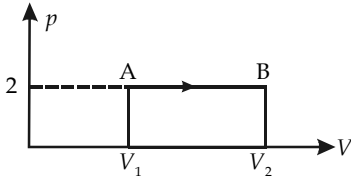
Setelah mempelajari bab Termodinamika, Anda diharapkan dapat menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan Hukum Termodinamika. Jika Anda belum mampu menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan Hukum Termodinamika, Anda belum menguasai materi bab

Termodinamika dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 9

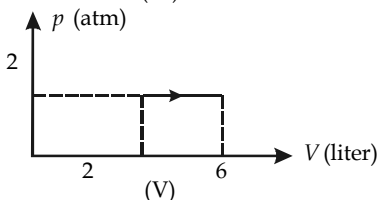
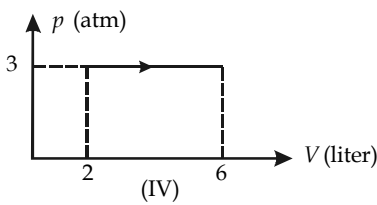
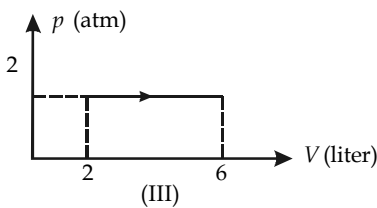
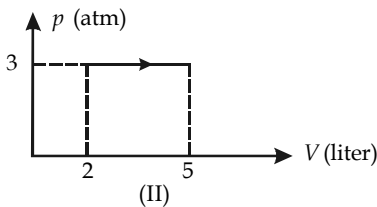
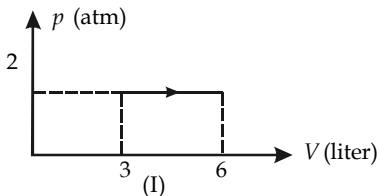
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Perhatikan grafik hubungan tekanan (p) terhadap volume (V) gas berikut ini.



Jika $V_1 = 100 \text{ cm}^3$ dan $V_2 = 300 \text{ cm}^3$, usaha yang dilakukan gas dari keadaan (A) ke keadaan (B) adalah

- 20 joule
 - 40 joule
 - 80 joule
 - 200joule
 - 400 joule
2. Perhatikan grafik $p - V$ berikut ini.



Usaha terbesar yang dilakukan gas adalah pada siklus

- I
- II
- III
- IV
- V

3. Suatu gas yang volumenya $0,5 \text{ m}^3$ perlahan-lahan dipanaskan pada tekanan tetap hingga volumenya menjadi 2 m^3 . Jika usaha luar gas tersebut $= 3 \times 10^5 \text{ J}$, besar tekanan gas adalah:

- $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $2,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $3,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $4,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $5,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

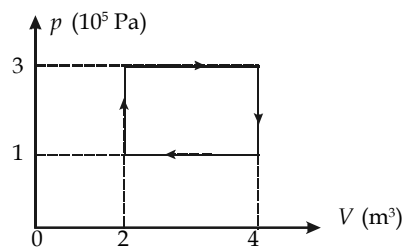
4. Satu mol gas ideal yang menempati suatu silinder berpengisap tanpa gesekan, mula-mula suhu gas adalah T . Kemudian, gas tersebut dipanaskan pada tekanan konstan sehingga volumenya menjadi 4 kali lebih besar. Jika R adalah tetapan gas universal, besarnya usaha yang telah dilakukan oleh gas untuk menaikkan volumenya tersebut adalah

- $\frac{RT}{4}$
- $RT \ln 4$
- $6 RT$
- $4 RT$
- $3 RT$

5. Usaha yang dilakukan gas ideal yang mengalami proses isokhorik dari tekanan p_1 sampai p_2 adalah

- 0
- $p_1 V_2$
- $p_2 V_2$
- $\frac{p_1 + p_2}{2} \times \frac{V_1 + V_2}{2}$
- $(p_1 - p_2) V$

6. Suatu gas ideal mengalami proses siklus seperti diagram $p-V$ berikut.



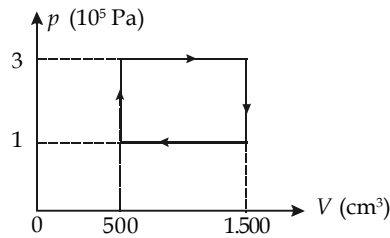
Usaha yang dihasilkan pada siklus ini adalah

- 200 kJ
- 400 kJ
- 600 kJ
- 800 kJ
- 1.000 kJ

7. Sepuluh mol gas monoatomik memuai secara isotermal pada suhu 127°C sehingga volumenya menjadi empat kali volume mula-mula. Besar usaha yang dilakukan oleh gas tersebut adalah

- 35 kJ
- 46 kJ
- 52 kJ
- 64 kJ
- 72 kJ

8. Suatu mesin kalor bekerja dengan siklus yang dibangun dari dua proses isobar dan dua proses isokhor seperti pada grafik berikut ini.



Mesin kalor tersebut digunakan untuk menggerakkan sebuah generator yang tegangan keluarannya = 200 V. Jika generator ini mendapat beban arus 5 A maka mesin kalor tersebut dijalankan pada putaran

- 100 rpm
 - 200 rpm
 - 300 rpm
 - 400 rpm
 - 500 rpm
9. Sejumlah gas ideal yang mengalami proses adiabatik akan mengalami:
- perubahan volume pada sistem itu
 - perubahan suhu pada sistem itu
 - perubahan tekanan pada sistem itu
 - pertukaran kalor antara sistem itu dengan luar sistem

Pernyataan yang benar adalah ...

- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4 saja
 - 1, 2, 3, dan 4
10. Sebuah silinder mesin diesel berisi udara dengan volume 90 cm^3 , pada suhu 27°C dan tekanan 1 atm. Udara tersebut dimampatkan secara adiabatik sehingga volumenya menjadi 15 cm^3 . Jika udara dianggap mengikuti sifat gas ideal dengan $\gamma = 1,4$ dan $1 \text{ atm} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, suhu akhir udara adalah ...
- 150 K.
 - 300 K.
 - 600 K.
 - 450 K.
 - 750 K.

11. Sejumlah gas helium ($\gamma = \frac{5}{3}$) pada suhu 27° menempati ruang bervolume 10 liter. Gas helium mengalami proses isobarik sampai volumenya menjadi dua kali. Kemudian, gas mengalami proses adiabatik hingga suhunya kembali ke nilai semula. Volume akhir gas adalah

- 20 liter
- $20\sqrt{2}$ liter
- 40 liter
- $40\sqrt{2}$ liter
- $80\sqrt{2}$ liter

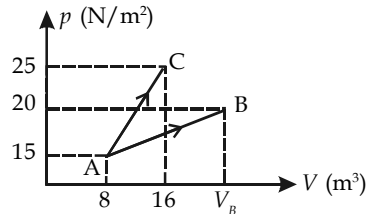
12. Hukum Pertama Termodinamika menyatakan bahwa

- kalor tidak dapat masuk ke dalam dan ke luar dari suatu sistem
- energi bersifat kekal
- energi dalam bersifat kekal
- suhu adalah tetap
- sistem tidak mendapat usaha dari luar

13. Suatu sistem mengalami proses adiabatik. Pada sistem dilakukan usaha sebesar 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem adalah U dan kalor yang diserap sistem adalah Q maka

- $\Delta U = -100 \text{ J}$
- $\Delta U = 100 \text{ J}$
- $\Delta U = 0$
- $Q = 100 \text{ J}$
- $\Delta U + Q = -100 \text{ J}$

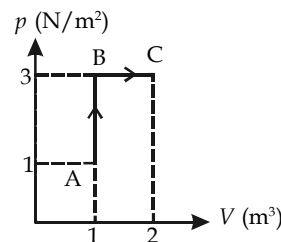
14. Perhatikan grafik p - V berikut ini



Jika perubahan energi dalam gas pada proses AC sama dengan perubahan energi dalam pada proses AB maka besar usaha yang dilakukan gas pada proses AB adalah ...

- 420 joule
- 300 joule
- 280 joule
- 240 joule
- 210 joule

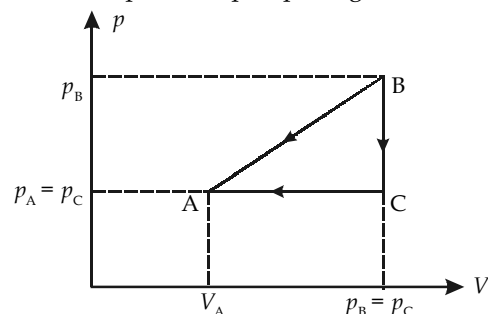
- 15.



Gas menjalani proses A - B - C. Besar kalor yang dibutuhkan untuk proses tersebut adalah

- 3 joule
- $4\frac{1}{2}$ joule
- $7\frac{1}{2}$ joule
- 10,5 joule
- 12 joule

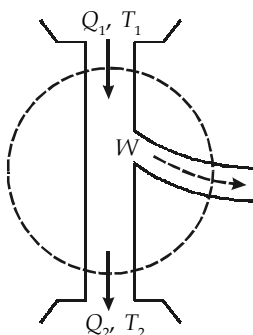
16. Sebanyak 10 mol gas ideal monoatomik menjalani siklus seperti tampak pada gambar.



Jika: $p_A = \frac{2}{3} p_B = 8,3 \times 10^5 \text{ pa}$, $V_A = \frac{1}{2} V_B$, $T_A = 727^\circ\text{C}$, dan $R = 83 \text{ J/molK}$, jumlah kalor yang diserap selama proses AB adalah

- a. $1,2 \times 10^5$ J
- b. $2,1 \times 10^5$ J
- c. $3,5 \times 10^5$ J
- d. $4,7 \times 10^5$ J
- e. $5,2 \times 10^5$ J

17.



Gambar tersebut adalah diagram arus mesin kalor.

Dari kelima kondisi berikut:

1. $T_1 = 300^\circ\text{K}; T_2 = 200$ K,
2. $T_1 = 400^\circ\text{K}; T_2 = 300$ K,
3. $T_1 = 500^\circ\text{K}; T_2 = 400$ K,
4. $T_1 = 600^\circ\text{K}; T_2 = 500$ K,
5. $T_1 = 700^\circ\text{K}; T_2 = 600$ K.

Kondisi yang memiliki efisiensi terbesar adalah diagram arus ke

- a. 1
- b. 2
- c. 3
- d. 4
- e. 5

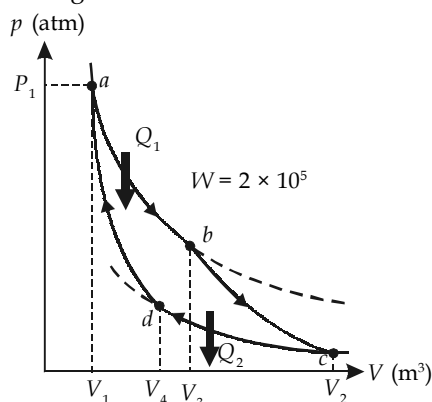
18. Suatu mesin menerima kalor sebesar 200 kalori dari sebuah reservoir bersuhu 400 K dan melepaskan 175 kalori ke sebuah reservoir lain yang suhunya 320 K. Efisiensi mesin tersebut adalah

- a. 12,5%
- b. 14,3%
- c. 20,0%
- d. 25,0%
- e. 87,5%

19. Sebuah mesin turbin memakai uap dengan suhu awal 550°C dan membuangnya pada suhu 35°C . Efisiensi maksimum mesin turbin tersebut adalah

- a. 25%
- b. 33%
- c. 50%
- d. 66%
- e. 75%

20. Perhatikan grafik siklus carnot berikut ini.



Kalor yang diserap mesin setiap satu kali siklus adalah

- a. 300 kJ
- b. 400 kJ
- c. 500 kJ
- d. 600 kJ
- e. 800 kJ

21. Sebuah mesin Carnot mula-mula dioperasikan dengan suhu kedua reservoirnya masing-masing sebesar 300 K dan 400 K. Agar efisiensinya naik menjadi 2 kali semula dengan suhu reservoir rendah tetap, suhu reservoir kalor yang bersuhu tinggi harus dinaikkan menjadi

- a. 500 K
- b. 600 K
- c. 800 K
- d. 900 K
- e. 1.200 K

22. Sebuah mesin kalor yang bekerja antara reservoir kalor bersuhu rendah 27°C dan reservoir kalor bersuhu tinggi $t_1^\circ\text{C}$, ditingkatkan efisiensi maksimumnya dari 25% hingga menjadi 50% dengan menaikkan suhu t_1 menjadi t_2 . Suhu t_1 dan t_2 adalah sebesar

- a. $t_1 = 36$ $t_2 = 54$
- b. $t_1 = 54$ $t_2 = 108$
- c. $t_1 = 127$ $t_2 = 327$
- d. $t_1 = 300$ $t_2 = 400$
- e. $t_1 = 400$ $t_2 = 600$

23. Suatu mesin Carnot yang bekerja antara suhu 27°C dan 227°C digunakan untuk menggerakkan sebuah generator yang tegangan keluarannya = 220 V. Jika setiap sekon mesin Carnot menyerap kalor sebesar 5.500 J, kuat arus keluaran maksimum generator adalah

- a. 2,75 A
- b. 10 A
- c. 15 A
- d. 22 A
- e. 25 A

24. Sebuah lemari es memiliki suhu paling rendah di dalamnya -15°C . Jika suhu ruang di luar lemari es = 28°C , koefisien performansi lemari es tersebut adalah

- a. 5
- b. 6
- c. 7
- d. 8
- e. 9

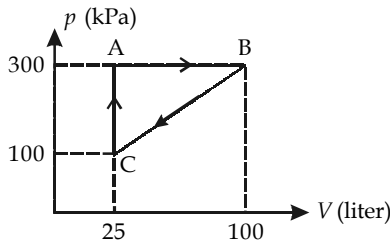
25. Suhu di dalam mesin pendingin -3°C dan suhu di luarnya 27°C . Jika daya yang dipakai untuk mengaktifkan mesin pendingin adalah 250 watt, besarnya panas yang dikeluarkan dari ruangan setiap jamnya adalah

- a. 7.500 kJ
- b. 8.100 kJ
- c. 9.000 kJ
- d. 9.600 kJ
- e. 9.500 kJ



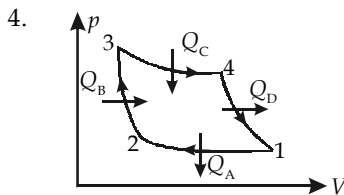
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar pada buku latihan Anda.

1. Sejumlah gas ideal mengalami proses siklus seperti grafik berikut.



Tentukanlah usaha yang dibutuhkan untuk 2 kali siklus.

2. Sepuluh mol gas ideal pada awalnya bersuhu 27°C dengan tekanan 4 atm. Gas mengembang secara isothermal dan tekanannya menjadi 2 atm. Tentukan usaha luas yang dilakukan gas jika $R = 8,31 \text{ J/mol K}$ dan $\ln 2 = 0,693$.
3. Sebanyak 55 g gas nitrogen dipanaskan dari suhu -3°C menjadi 37°C . Jika nitrogen tersebut dipanaskan dalam bejana yang dapat memuai, diperlukan kalor sebesar 2,33 kJ. Jika nitrogen tersebut dipanaskan dalam bejana yang tidak dapat memuai, diperlukan kalor 1,66 kJ. Hitunglah kapasitas kalor gas nitrogen.



Perpindahan kalor yang ditunjukkan pada gambar adalah $Q_A = 20 \text{ kJ}$, $Q_B = 10 \text{ kJ}$, $Q_C = 30 \text{ kJ}$ dan $Q_D = 8 \text{ kJ}$. Tentukanlah:

- a. usaha yang dilakukan mesin dalam satu siklus, dan
b. efisiensi mesin tersebut.

5. Efisiensi sebuah mesin Carnot adalah $\frac{1}{4}$. Dengan menurunkan suhu reservoir rendah sebesar 50°C , efisiensi naik menjadi $\frac{3}{5}$. Tentukanlah suhu reservoir rendah dan reservoir tinggi mesin tersebut.
6. Sebuah mesin gas ideal bekerja dalam satu siklus mesin Carnot antara suhu 127°C dan 227°C serta menyerap kalor 60 kkal. Jika diketahui 1 kalori = 4,2 J, tentukanlah usaha yang dihasilkan dalam satu siklus.
7. Sebuah refrigerator menyerap kalor sebesar 6 kJ dari reservoir dingin dan membuang 8 kJ kalor ke reservoir panas. Tentukanlah:
a. koefisien performansi refrigerator tersebut, dan
b. usaha yang diperlukan pada proses tersebut.
8. Selama satu siklus, mesin Carnot memindahkan 100 joule energi dari reservoir bersuhu 127°C , melakukan usaha, dan membuang panas ke reservoir bersuhu 27°C . Hitunglah:
a. efisiensi mesin Carnot,
b. perubahan entropi reservoir suhu tinggi,
c. perubahan entropi reservoir suhu rendah, dan
d. perubahan entropi total.
9. Sebuah mesin gas ideal bekerja dalam suatu siklus Carnot antara 227°C dan 127°C , serta menyerap kalor sebesar 66 kkal pada temperatur tinggi. Hitunglah efisiensi mesin dan usaha yang dilakukan dalam satu siklus.
10. Sebuah mesin termodinamika menggunakan reservoir suhu tinggi bersuhu 800 K yang memiliki efisiensi 20%. Hitunglah kenaikan suhu reservoir suhu tinggi agar efisien maksimum mesin tersebut menjadi 36%.

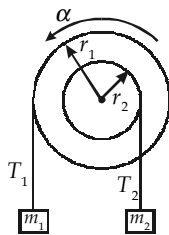


Evaluasi Materi Semester 2

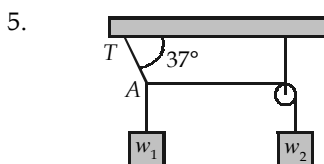
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihanmu.

- Sebuah bola pejal yang diameternya 60 cm berotasi dengan poros melalui pusat bola. Persamaan kecepatan sudut bola adalah $\omega = (5 + 20t)$ rad/s dengan t dalam sekon. Jika massa bola = 6 kg, momen gaya yang bekerja pada bola adalah
 - $2,16 \times 10^{-1}$ Nm
 - $1,08 \times 10^{-1}$ Nm
 - $2,16 \times 10^{-2}$ Nm
 - $1,08 \times 10^{-2}$ Nm
 - $2,16 \times 10^{-3}$ Nm

- Dua buah benda, masing-masing bermassa $m_1 = 4$ kg dan $m_2 = 2,5$ kg dihubungkan pada sistem katrol, seperti yang terlihat pada gambar. Momen inersia sistem katrol adalah $I = 1,90$ kgm², dengan $r_1 = 50$ cm dan $r_2 = 20$ cm. Besar tegangan tali T_2 adalah
 - 20,0 N
 - 22,5 N
 - 25,0 N
 - 27,5 N
 - 32,5 N



- Seorang penari balet berputar dengan kedua tangan terentang pada kecepatan sebesar 180 rpm di atas lantai licin dan momen inersia 8 kgm². Kemudian, kedua tangannya dilipat meylang di dada. Pasangannya yang mungkin dari ω dan I pada kondisi akhir tersebut adalah
 - $\omega = 1$ rpm dan $I = 20$ kgm²
 - $\omega = 2$ rpm dan $I = 12$ kgm²
 - $\omega = 3$ rpm dan $I = 10$ kgm²
 - $\omega = 4$ rpm dan $I = 5$ kgm²
 - $\omega = 5$ rpm dan $I = 3$ kgm²
- Sebuah roda berputar terhadap suatu sumbu rotasi dengan kecepatan sudut 1.800 rpm. Roda kedua yang mula-mula diam dengan momen inersia $\frac{1}{2}$ kali roda pertama, digabungkan pada sumbu yang sama dengan roda pertama. Persentase energi yang hilang akibat penggabungan kedua roda adalah
 - 25%
 - 35%
 - 50%
 - 67%
 - 75%

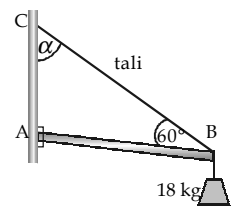


5.

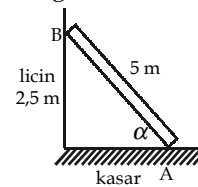
Jika gesekan pada katrol diabaikan dan tegangan tali $T = 40$ N, massa benda w_2 adalah

- 2,0 kg
- 2,4 kg
- 3,0 kg
- 3,2 kg
- 4,0 kg

- Jika batang AB beratnya 60 N dan sistem itu berada dalam keadaan setimbang, besarnya tegangan tali adalah
 - 120 N
 - 180 N
 - 210 N
 - $180\sqrt{3}$ N
 - $210\sqrt{3}$ N



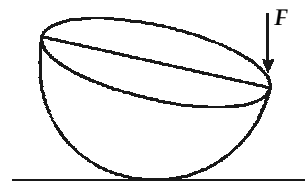
7. Perhatikanlah gambar berikut.



Agar batang AB masih setimbang, besarnya koefisien gesek statis minimum μ_s adalah

- $\frac{1}{2}$
- $\frac{2}{3}$
- $\frac{3}{8}$
- $\frac{1}{2}\sqrt{3}$
- $\frac{1}{3}\sqrt{3}$

- Suatu benda berbentuk setengah bola homogen beratnya 10 N. Pusat beratnya terletak $\frac{3}{8}R$ dari pusat bola ($R =$ jari-jari bola) dan dipengaruhi gaya vertikal ke bawah sebesar 5 N seperti tampak pada gambar.

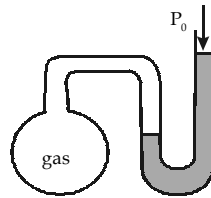


Besarnya sudut yang dibentuk oleh bidang lingkaran mendatar terhadap lantai adalah

- 60°
- 53°
- 45°
- 37°
- 30°



9. Jika diketahui cairan di dalam manometer pada gambar tersebut adalah raksa dan perbedaan tinggi permukaan di kedua kaki bejana = 12 cm, besarnya tekanan gas dalam tangki adalah ($p_0 = 1 \text{ atm}$)



- a. 64 cmHg
 - b. 70 cmHg
 - c. 76 cmHg
 - d. 82 cmHg
 - e. 88 cmHg
10. Sebuah pompa hidrolik berbentuk silinder memiliki diameter masing-masing 10 cm dan 20 cm. Jika pengisap kecil ditekan dengan gaya 500 N, besar gaya yang dihasilkan pada pengisap besar adalah
- a. 3.200 N
 - b. 2.000 N
 - c. 1.600 N
 - d. 800 N
 - e. 200 N

11. Sebuah benda dicelupkan ke dalam air sehingga $\frac{1}{4}$ bagiannya muncul di permukaan. Jika benda tersebut dicelupkan ke dalam suatu larutan dengan massa jenis = $\frac{7}{8} \text{ g/cm}^3$, besar bagian benda yang muncul di permukaan adalah
- a. $\frac{1}{7}$ bagian
 - b. $\frac{1}{2}$ bagian
 - c. $\frac{4}{7}$ bagian
 - d. $\frac{5}{8}$ bagian
 - e. $\frac{6}{7}$ bagian

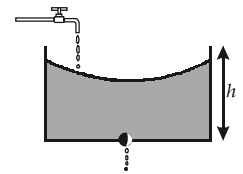
12. Massa sebuah benda adalah 300 gram. Jika benda tersebut ditimbang dalam air, massanya seolah-olah menjadi 225 gram. Jika benda ditimbang dalam suatu cairan lain yang memiliki massa jenis = $2,50 \text{ g/cm}^3$, benda tersebut massanya seolah-olah menjadi
- a. 100 g
 - b. 112,5 g
 - c. 155,5 g
 - d. 174,5 g
 - e. 210,5 g

13. Sebuah tabung berdiameter 0,3 cm dimasukkan secara vertikal ke dalam air. Sudut kontaknya = 53° . Jika tegangan permukaan air = $0,6 \text{ N/m}$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, air pada tabung akan naik setinggi
- a. 0,012 m
 - b. 0,025 m
 - c. 0,036 m
 - d. 0,048 m
 - e. 0,065 m

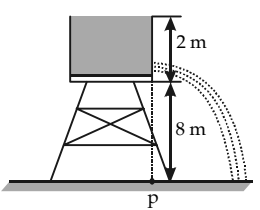
14. Air mengalir dalam sebuah pipa yang memiliki luas penampang 1 cm^2 dengan kecepatan 2 m/s. Volume air yang keluar setiap menit dari pipa tersebut adalah
- a. 2 liter
 - b. 12 liter
 - c. 20 liter
 - d. 60 liter
 - e. 120 liter

15. Air mengalir pada sebuah pipa yang diameternya berbeda dengan perbandingan 1 : 2. Jika kecepatan air yang mengalir pada pipa besar sebesar 40 m/s, besarnya kecepatan air pada bagian pipa yang kecil adalah
- a. 10 m/s
 - b. 20 m/s
 - c. 80 m/s
 - d. 100 m/s
 - e. 160 m/s

16. Air mengalir ke dalam sebuah bak dengan debit $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, tetapi bocor di bawah melalui lubang. Jika ketinggian maksimum air yang dicapai dalam bak 5 cm, luas kebocorannya adalah
- a. 5 cm^2
 - b. 4 cm^2
 - c. 3 cm^2
 - d. 2 cm^2
 - e. 1 cm^2



17. Gambar berikut menunjukkan reservoir penuh air yang dinding bagian bawahnya bocor sehingga air memancar sampai di tanah. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, jarak pancaran maksimum di tanah diukur dari titik P adalah
- a. 2 m
 - b. 5 m
 - c. 8 m
 - d. 10 m
 - e. 12 m



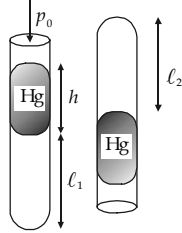
18. Berikut ini penerapan prinsip Bernoulli dalam bidang teknik dan kehidupan sehari-hari, kecuali
- a. gaya angkat sayap pesawat terbang
 - b. mengukur kecepatan aliran zat cair
 - c. mengukur massa jenis zat cair
 - d. mengukur kecepatan aliran gas
 - e. alat-alat semprotan nyamuk

19. Sebuah tabung yang volumenya 1 liter memiliki lubang yang memungkinkan udara keluar dari tabung. Tabung tersebut berisi 0,5 g gas ideal. Mula-mula suhu udara dalam tabung 27°C . Jika tabung dipanaskan hingga suhunya mencapai 127°C , massa gas yang keluar dari tabung tersebut adalah
- a. $\frac{1}{8}$ gram
 - b. $\frac{1}{7}$ gram
 - c. $\frac{1}{6}$ gram
 - d. $\frac{1}{5}$ gram
 - a. $\frac{1}{4}$ gram

20. Sejumlah gas ideal menjalani proses isobarik sehingga suhu mutlaknya menjadi empat kali semula dan volumenya menjadi n kali semula, nilai n dari gas ideal tersebut adalah
- a. $\frac{1}{4}$
 - b. $\frac{1}{2}$
 - c. 2
 - d. 4
 - e. 8



21. Pengukuran tekanan udara luar menghasilkan data seperti gambar berikut.



Besarnya tekanan udara luar = 75 cmHg. Jika perbandingan l_2 terhadap l_1 adalah 3 : 2, tinggi h adalah

- 5 cm
 - 10 cm
 - 15 cm
 - 20 cm
 - 25 cm
22. Gas dalam ruang tertutup bersuhu 27°C dan tekanan 2 atm serta volume 2,5 liter. Jika gas dipanaskan sampai 87°C , tekanan gas turun 1,5 atm. Volume akhir gas tersebut menjadi
- berkurang 30%
 - tetap
 - bertambah 30%
 - berkurang 60%
 - bertambah 60%
23. Suatu gas ideal dalam ruang tertutup bersuhu 27°C sehingga memiliki kecepatan efektif sebesar v . Jika gas tersebut dipanaskan sampai mencapai suhu 927°C , partikel-partikel gas tersebut akan mengalami perubahan kecepatan efektif sebesar....
- v
 - $2v$
 - $3v$
 - $4v$
 - $5v$
24. Sebuah tabung gas berisi 4 mol gas helium pada suhu 127°C . Jika $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K, energi dalam gas helium tersebut adalah
- 20 kJ
 - 30 kJ
 - 40 kJ
 - 50 kJ
 - 60 kJ
25. Gas helium sebanyak $1,8 \text{ m}^3$ yang bersuhu 27°C dipanaskan secara isobarik sampai suhu 127°C . Jika tekanan gas helium 2 atm, gas helium melakukan usaha luar sebesar

- 60 kJ
- 120 kJ
- 280 kJ
- 480 kJ
- 660 kJ

26. Lima mol gas monoatomik memuai secara isothermal pada suhu 127°C sehingga volumenya menjadi dua kali volume mula-mula. Usaha yang dilakukan oleh gas tersebut adalah

- 35 kJ
- 46 kJ
- 52 kJ
- 64 kJ
- 72 kJ

27. Suatu sistem gas menerima kalor 100 kJ dan pada sistem dilakukan usaha 20 kJ. Perubahan energi dalam sistem adalah

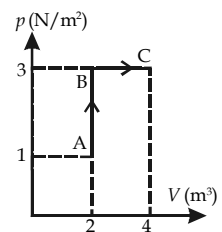
- 80 kJ
- 120 kJ
- 80 kJ
- 120 kJ
- 100 kJ

28. Gas monoatomik menjalani proses A-B-C. Kalor yang dibutuhkan untuk proses tersebut adalah

- 12 Joule
- 16 Joule
- 21 Joule
- 35 Joule
- 42 Joule

29. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi 600 K memiliki efisiensi 30%. Untuk menaikkan efisiensi mesin menjadi 60%, maka suhu reservoir kalor suhu tinggi harus dinaikkan menjadi

- 800 K
- 950 K
- 1050 K
- 1200 K
- 1500 K

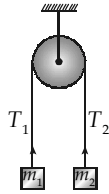


30. Sebuah lemari es memiliki koefisien performansi 6,0. Jika suhu ruang di luar lemari es 27°C . Suhu paling rendah di dalam lemari es yang dapat dicapai adalah

- $10,5^\circ\text{C}$
- -15°C
- $17,5^\circ\text{C}$
- $20,5^\circ\text{C}$
- 25°C

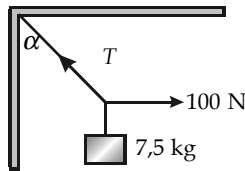
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Perhatikanlah sistem katrol berikut ini.



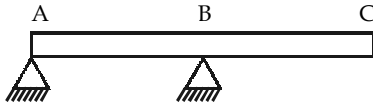
Jika diketahui: $m_1 = 6 \text{ kg}$, $m_2 = 12 \text{ kg}$, $m_{\text{katrol}} = 4 \text{ kg}$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan selisih tegangan tali $T_2 - T_1$.

2. Perhatikanlah sistem berikut ini.



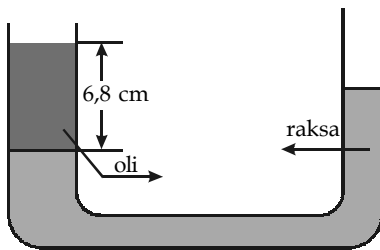
Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah besar tegangan tali T dan sudut α .

3. Perhatikan sistem berikut ini.



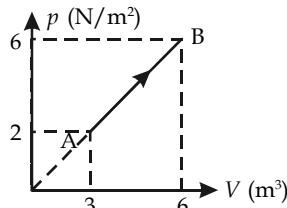
Batang AC bermassa 30 kg dan panjangnya 5 m. Jarak tumpuan A dan B adalah 4 m (di B papan dapat berputar). Seorang anak bermassa 60 kg berjalan dari A menuju C. Berapakah jarak minimum anak dari titik C agar papan tetap setimbang (ujung batang A hampir terangkat)?

4. Perhatikan gambar bejana berikut ini.



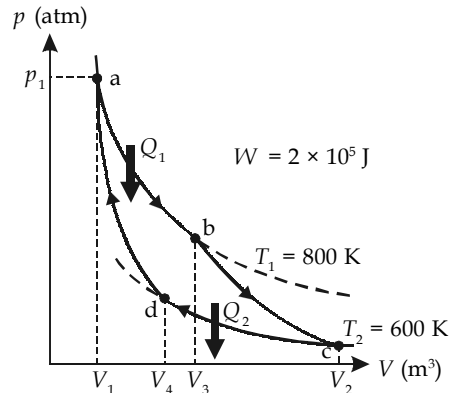
Jika diketahui massa jenis oli = $0,8 \text{ g/cm}^3$ dan massa jenis raksa = $13,6 \text{ g/cm}^3$, tentukanlah perbedaan tinggi permukaan raksa dan oli.

5. Sebuah tangki air terbuka memiliki kedalaman 45 cm. Sebuah lubang dengan luas penampang 2 cm^2 dibuat di dasar tangki. Berapakah volume air per menit yang mula-mula akan keluar dari lubang tersebut?
6. Air terjun digunakan untuk pembangkit listrik tenaga air (PLTA) 1.000 W. Jika efisiensi generator 80%, percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan debit air yang sampai ke kincir 12,5 liter per sekon. Berapakah tinggi air terjun itu?
7. Temperatur gas ideal yang tekanannya 80 cmHg adalah 300 K. Jika gas dipanasi pada volume tetap hingga tekanannya menjadi 120 cmHg, tentukanlah temperatur akhir gas tersebut.
8. Di dalam sebuah ruang tertutup terdapat gas dengan suhu 1.227°C . Jika gas didinginkan sampai energi kinetiknya menjadi 0,2 kali energi kinetik semula, tentukanlah penurunan suhu yang harus dilakukan pada gas tersebut.
9. Suatu gas ideal monoatomik mengalami proses dari A ke B, seperti tampak pada gambar berikut.



Tentukanlah kalor yang diserap gas selama proses AB.

10. Perhatikan grafik siklus Carnot berikut ini.



Tentukanlah besarnya kalor yang dihasilkan dalam satu kali siklus.

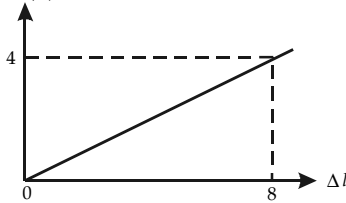
Evaluasi Materi Akhir Tahun

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Vektor posisi sebuah partikel memenuhi persamaan $r = [(3 + 2t^2)\mathbf{i} + (5 + 1,5 t^2)\mathbf{j}]$ m. Kecepatan rata-rata partikel tersebut antara $t = 1$ sekon sampai $t = 3$ sekon adalah
 - 6 m/s
 - 7 m/s
 - 8 m/s
 - 10 m/s
 - 12 m/s
- Benda $m = 3$ kg digerakkan pada bidang licin dengan kelajuan awal 10 m/s oleh sebuah gaya $F = (12 + 6t)$ N. Jika semua satuan dalam SI untuk $t = 3$ sekon, kecepatan benda adalah
 - 22 m/s
 - 25 m/s
 - 31 m/s
 - 35 m/s
 - 42 m/s
- Sebutir peluru ditembakkan dengan kecepatan m/s dan membentuk sudut 30° terhadap arah mendatar. Kecepatan peluru itu setelah 4 detik adalah 40 m/s. Jika $g = 10$ m/s² maka nilai v_0 adalah
 - 60 m/s
 - 80 m/s
 - 100 m/s
 - 120 m/s
 - 150 m/s
- Sebuah mesin melakukan 75 putaran untuk berubah kecepatan dari 600 rpm menjadi 1200 rpm. Waktu yang diperlukan mesin untuk mengubah kecepatan tersebut adalah selama
 - 5 sekon
 - 10 sekon
 - 15 sekon
 - 20 sekon
 - 25 sekon
- Posisi peluru yang ditembakkan di atas bidang datar dengan sudut elevasi tertentu dinyatakan oleh persamaan $r = [150t\mathbf{i} + (200t - 5t^2)\mathbf{j}]$ m. Jika \mathbf{i} dan \mathbf{j} menyatakan vektor satuan menurut sumbu x dan y serta t dalam sekon, tinggi maksimum yang dicapai peluru adalah
 - 0,5 km
 - 1,0 km
 - 1,5 km
 - 2,0 km
 - 2,5 km
- Pada setiap titik sudut sebuah segitiga sama sisi dengan panjang sisi a ditempatkan benda bermassa m . Jika besar gaya gravitasi yang dialami oleh salah satu benda sebesar $G\frac{m^2}{a^2}x$, besarnya x adalah
 - 1,26
 - 1,41
 - 1,58
 - 1,73
 - 1,85
- Dua buah satelit mengorbit pada ketinggian R dan $2R$ di atas permukaan Bumi. Jika $R =$ jari-jari Bumi, perbandingan kuat medan gravitasi yang dialami oleh satelit adalah
 - 1 : 2
 - 2 : 3
 - 3 : 2
 - 4 : 9
 - 9 : 4
- Kelajuan yang diperlukan oleh sebuah roket yang bergerak lurus ke atas agar mencapai ketinggian di atas Bumi yang sama dengan jari-jari Bumi adalah v_1 . Dengan demikian, $\frac{v_2}{v_1}$ adalah
($M_{\text{Bumi}} = 5,97 \times 10^{24}$ kg dan $R_{\text{Bumi}} = 6,38 \times 10^6$ m)
 - 1,22
 - 1,42
 - 1,60
 - 1,75
 - 1,88
- Jarak rata-rata planet Mars dari Matahari adalah 1,52 satuan astronomi. Periode Mars mengelilingi Matahari adalah
 - 1,87 tahun
 - 4,85 tahun
 - 7,25 tahun
 - 9,14 tahun
 - 11,2 tahun
- Sebuah logam memiliki konstanta gaya logam sebesar 1.600 N/m, luas penampang 20 cm², dan panjangnya 5 m. Modulus Young logam tersebut adalah
 - 2×10^6 N/m²
 - 3×10^6 N/m²
 - 4×10^6 N/m²
 - 5×10^6 N/m²
 - 6×10^6 N/m²
- Sebuah pegas digantungkan pada sebuah lift. Pada ujung bebasnya digantungkan beban 80 gram. Pada saat lift diam, pegas bertambah panjang 4 cm. Diketahui $g = 10$ m/s². Pertambahan panjang pegas jika lift bergerak ke atas dengan percepatan sebesar 2 m/s² adalah

- a. 4,5 cm
- b. 4,8 cm
- c. 5,1 cm
- d. 5,4 cm
- e. 5,7 cm

12. $F(N)$



Grafik tersebut menunjukkan pertambahan panjang karet dibawah pengaruh gaya yang berbeda-beda. Besarnya energi potensial karet itu pada pertambahan panjang 12 cm adalah

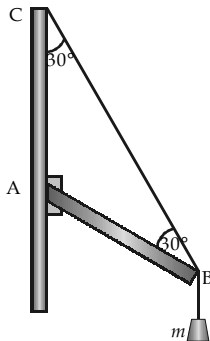
- a. 0,15 J
 - b. 0,16 J
 - c. 0,24 J
 - d. 0,25 J
 - e. 0,27 J
13. Sebuah benda bermassa 20 g digetarkan menurut persamaan simpangan $x = (8 \times 10^{-2}) \sin 50t$ dengan t dalam s dan x dalam m. Energi total benda itu adalah
- a. 2×10^{-2} J
 - b. 4×10^{-2} J
 - c. 8×10^{-2} J
 - d. 16×10^{-2} J
 - e. 32×10^{-2} J
14. Sebuah benda massanya 2 kg mula-mula dalam keadaan diam pada sebuah bidang datar yang licin, kemudian pada benda tersebut bekerja sebuah gaya $F = 20$ N sehingga kecepatannya menjadi 8 m/s. Usaha yang dilakukan oleh gaya F adalah
- a. 8 J
 - b. 16 J
 - c. 32 J
 - d. 48 J
 - e. 64 J
15. Sebuah benda bermassa m kg, mula-mula diam, kemudian bergerak lurus dengan percepatan sebesar 2 m/s^2 . Usaha yang diubah menjadi energi kinetik setelah 4 sekon adalah 64 J, maka nilai m adalah
- a. 1 kg
 - b. 2 kg
 - c. 4 kg
 - d. 8 kg
 - e. 12 kg
16. Air terjun setinggi 25 m digunakan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Setiap sekonnya air mengalir sebanyak 8 m^3 . Jika daya rata-rata yang dihasilkan 1.100 kW dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, efisiensi generator adalah%
- a. 35
 - b. 55

- c. 60
- d. 75
- e. 85

17. Sebuah tongkat yang pajangnya 30 cm dan tegak di atas permukaan tanah dijatuhkan martil 10 kg dari ketinggian 50 cm di atas ujungnya. Jika gaya tahan rata-rata tanah 10^3 N, banyaknya tumbukan martil yang perlu dilakukan terhadap tongkat agar menjadi rata dengan permukaan tanah adalah kali
- a. 4
 - b. 5
 - c. 6
 - d. 7
 - e. 8
18. Sebuah bola yang massanya 400 gram ditendang mengikuti gerak parabola. Pada awalnya bola memiliki energi kinetik E joule. Bola dapat mencapai ketinggian maksimum 10 meter. Energi kinetik bola saat mencapai tinggi maksimum adalah 40 Joule. Nilai E adalah
- a. 80
 - b. 100
 - c. 120
 - d. 160
 - e. 200
19. Sebuah benda bermassa 2,5 kg digerakkan mendatar di meja licin dari keadaan diam oleh sebuah gaya mendatar F yang berubah terhadap waktu menurut $F = 20 + 6t$, dengan t dalam s dan F dalam N. Pada saat $t = 2$ s, momentum benda adalah
- a. 64 kgm/s
 - b. 52 kgm/s
 - c. 48 kgm/s
 - d. 39 kgm/s
 - e. 27 kgm/s
20. Dua buah benda titik bermassa $m_1 = 3$ kg dan $m_2 = 2$ kg terletak berdekatan di bidang datar licin. Sistem ini mendapat impuls gaya hingga kedua benda bergerak masing-masing dengan kelajuan $v_1 = 3$ m/s dan kelajuan $v_2 = 6$ m/s dan arah saling tegak lurus. Besarnya implus gaya yang bekerja pada sistem adalah (dalam Ns).
- a. 6
 - b. 9
 - c. 12
 - d. 15
 - e. 21
21. Sebuah bola bermassa 0,4 kg bergerak dengan kecepatan 3 m/s menumbuk sebuah bola lain bermassa 0,2 kg yang mula-mula diam. Jika setelah tumbukkan bola pertama diam, kecepatan bola kedua adalah
- a. 6 m/s
 - b. 5 m/s
 - c. 4 m/s
 - d. 3 m/s
 - e. 2 m/s

22. Seorang anak yang massanya 40 kg naik sebuah perahu yang massanya 80 kg, kelajuan perahu saat itu 4 m/s. Perbandingan kelajuan perahu apabila anak tersebut melompat dengan kecepatan 2 m/s ke depan searah gerak perahu dan ke belakang berlawanan arah perahu adalah
- 5 : 7
 - 7 : 5
 - 4 : 7
 - 7 : 4
 - 4 : 5
23. Sebuah mobil sedan bermassa 1 ton bergerak ke utara dengan kecepatan 54 km/jam. Di persimpangan jalan Sumatra, sedan tersebut bertabrakan dengan mobil kijang bermassa 2 ton yang bergerak ke timur dengan kecepatan 36 km/jam. Jika kedua mobil menyatu dan bergerak dari titik tumbukan sebagai sebuah massa, kecepatan kedua mobil itu setelah tumbukan adalah
- 4,1 m/s
 - 5,2 m/s
 - 6,5 m/s
 - 8,3 m/s
 - 9,8 m/s
24. Sebuah gaya $F = (5\mathbf{i} + 4\mathbf{j})$ N memiliki lengan momen $\mathbf{r} = (a\mathbf{i} + 12\mathbf{j})$ m terhadap suatu titik poros. Vektor \mathbf{i} dan \mathbf{j} berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu x dan y pada koordinat kartesian. Jika momen gaya yang dilakukan gaya F terhadap titik poros bernilai 32 Nm, nilai a sama dengan
- 3
 - 4
 - 7
 - 8
 - 9
25. Sebuah bola pejal diameternya 20 cm dan berotasi dengan poros yang melalui pusat bola. Persamaan kecepatan sudut bola $\omega = (15 + 5t)$ rad/s dengan t dalam sekon. Jika massa bola 2 kg momen gaya yang bekerja pada bola adalah
- 0,08 Nm
 - 0,16 Nm
 - 0,8 Nm
 - 1,6 Nm
 - 2 Nm

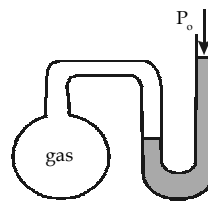
26.



Panjang batang AB 0,5 m dan beratnya 50 N. Tali akan putus jika tegangannya melebihi 173 N. Massa beban maksimum m adalah

- 45 N
 - 50 N
 - 60 N
 - 125 N
 - 50 N
27. Seorang penari balet berputar dengan kedua tangan terentang pada kecepatan 180 rpm di atas lantai licin dengan momen inersia 6 kgm^2 . Kemudian, kedua tangannya dilipat meyilang di dadanya. Pasangan yang mungkin dari ω dan I pada kondisi akhir tersebut adalah
- $\omega = 2$ putaran per sekon, $I = 9 \text{ kgm}^2$
 - $\omega = 4$ putaran per sekon, $I = 4,5 \text{ kgm}^2$
 - $\omega = 5$ putaran per sekon, $I = 4,0 \text{ kgm}^2$
 - $\omega = 6$ putaran per sekon, $I = 3,5 \text{ kgm}^2$
 - $\omega = 7$ putaran per sekon, $I = 3,0 \text{ kgm}^2$

28.



Jika cairan di dalam manometer tersebut adalah raksa dan perbedaan tinggi permukaannya dalam bejana 4 cm, besarnya tekanan gas dalam tangki adalah ($p_0 = 1 \text{ atm}$)

- $3,51 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
 - $4,25 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
 - $5,33 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
 - $6,42 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
 - $7,23 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
29. Sebuah pompa hidrolis berbentuk silinder memiliki dua jenis penampang masing-masing berdiameter 8 cm dan 29 cm. Jika pengisap kecil ditekan dengan gaya 500 N, gaya yang dihasilkan pada pengisap besar adalah
- 1.500 N
 - 2.000 N
 - 3.500 N
 - 4.000 N
 - 4.500 N
30. Sebuah benda memiliki berat sebesar 50 N di udara dan 37,5 N dalam air. Jika massa jenis air 1 g/cm^3 , massa jenis batu itu adalah
- 2 g/cm^3
 - 3 g/cm^3
 - 4 g/cm^3
 - 5 g/cm^3
 - 6 g/cm^3
31. Sebuah ban dalam mobil massanya 0,5 kg. Apabila ban tersebut diisi udara dan dipakai sebagai pengapung di dalam air, ban dalam mobil itu mengapungkan beban maksimum sebesar 99,5 kg.

Volume ban dalam mobil tersebut adalah

- $0,05 \text{ m}^3$
- $0,10 \text{ m}^3$
- $0,15 \text{ m}^3$
- $0,20 \text{ m}^3$
- $0,25 \text{ m}^3$

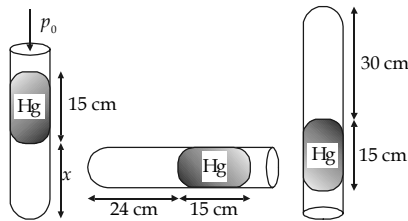
32. Sebuah pipa silindris yang lurus memiliki dua macam penampang masing-masing dengan diameter 20 mm dan 10 mm^2 . Pipa tersebut diletakkan secara horizontal, sedangkan air di dalamnya mengalir dari penampang pipa besar ke penampang pipa kecil. Jika kecepatan arus di penampang besar adalah 2 m/s , kecepatan arus di penampang kecil adalah

- $0,25 \text{ m/s}$
- $0,5 \text{ m/s}$
- 1 m/s
- 4 m/s
- 8 m/s

33. Sebuah tabung yang volumenya 4 liter memiliki lubang yang memungkinkan udara keluar dari tabung. Mula-mula suhu udara dalam tabung 27°C . Tabung dipanaskan hingga suhunya 177°C . Perbandingan antara massa gas yang keluar dari tabung dan massa awalnya adalah

- 1 : 2
- 1 : 3
- 2 : 3
- 3 : 4
- 2 : 5

34.



Dari suatu percobaan tekanan udara diperoleh data seperti gambar. Panjang kolom udara x pada tabung adalah ...

- 14 cm
- 16 cm
- 18 cm
- 20 cm
- 22 cm

35. Perbandingan kecepatan efektif partikel-partikel gas hidrogen dan gas oksigen pada suhu yang sama adalah

- 1 : 2
- 2 : 1
- 1 : 4
- 4 : 1
- 1 : 16

36. Di dalam sebuah ruang tertutup terdapat gas dengan suhu 27°C . Apabila gas dipanaskan sampai energi kinetiknya menjadi 3 kali energi kinetik semula, gas itu harus dipanaskan sampai suhu

- 900°C
- 627°C
- 600°C
- 327°C
- 127°C

37. Tiga mol gas ideal yang menempati suatu silinder berpenghisap tanpa gesekan, mula-mula memiliki suhu T . Gas tersebut kemudian dipanaskan pada tekanan konstan sehingga volumenya menjadi 3 kali lebih besar. Bila R adalah tetapan gas universal, besarnya usaha yang telah dilakukan oleh gas untuk menaikkan volumenya tadi adalah

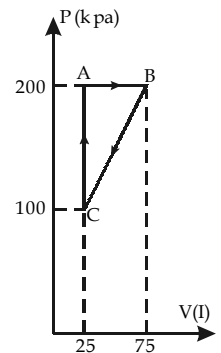
- $\frac{RT}{4}$
- $RT \ln 4$
- $6 RT$
- $4 RT$
- $3 RT$

38. Dua mol gas ideal pada awalnya bersuhu 27°C dengan tekanan 2 atm. Gas mengembang secara isotermal dan tekanannya menjadi 1 atm. Usaha luar yang dilakukan gas jika $R = 8,31 \text{ J/mol K}$ dan $\ln 2 = 0,693$ adalah

- 1,37 kJ
- 3,46 kJ
- 4,63 kJ
- 5,37 kJ
- 6,52 kJ

39. Sejumlah gas ideal mengalami proses siklus, seperti terlihat pada gambar. Usaha yang dibutuhkan untuk melakukan dua kali siklus adalah

- 2.500 J
- 3.000 J
- 3.500 J
- 4.000 J
- 4.500 J

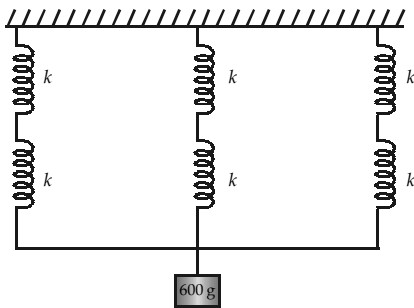


40. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi $T \text{ K}$ memiliki efisiensi 20%. Untuk menaikkan efisiensinya menjadi 36%, suhu reservoir kalor suhu tinggi dinaikan menjadi 1.000 K , besarnya T adalah

- 500 K
- 600 K
- 700 K
- 800 K
- 900 K

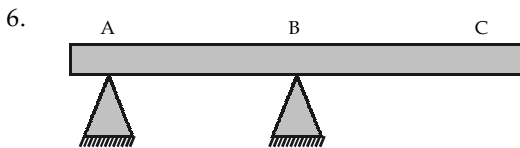
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Sebuah benda melakukan gerak rotasi mengelilingi suatu sumbu dengan persamaan posisi sudutnya $\theta = t^2 + 2t + 5$ (dalam radian dan t dalam sekon). Jika jari-jari lintasannya 25 cm, pada $t = 2$ s, berapakah:
 - laju linear benda,
 - percepatan tangensial benda, dan
 - percepatan total benda.
- Sebuah satelit mengorbit Bumi dengan kelajuan 6.400 m/s. Jika jari-jari Bumi 6.400 km, percepatan gravitasi di permukaan Bumi $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan gerak satelit dianggap melingkar beraturan, tentukanlah:
 - posisi satelit dari permukaan Bumi, dan
 - kuat medan gravitasi yang dialami satelit.
- Enam buah pegas disusun identik seperti gambar berikut.



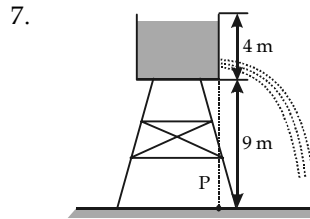
Jika konstanta pegas $k = 200 \text{ N/m}$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah:

- konstanta pegas gabungannya, dan
 - pertambahan panjang sistem pegas.
- Pada sebuah gerak parabola, energi kinetik awalnya adalah 40 joule, sedangkan energi potensialnya pada titik tertinggi adalah 20 joule. Jika massa benda adalah 10 gram, tentukanlah:
 - energi kinetik benda di titik tertinggi,
 - sudut elevasi tembakannya,
 - titik tertinggi yang dicapai benda, dan
 - waktu untuk mencapai jarak terjauh.
 - Sebuah bola sepak memiliki massa 400 g. Awalnya bola bergerak ke kiri dengan kecepatan 20 m/s, tetapi kemudian ditendang oleh Rooney sehingga bergerak dengan kecepatan 30 m/s pada arah 45° ke kanan atas. Berapakah gaya total rata-rata yang diberikan jika waktu tumbukan 0,01 s?



Batang AC bermassa 40 kg dan panjangnya 3 m. Jarak tumpuan A dan B adalah 2 m (di titik B, papan dapat berputar). Seorang anak bermassa 25 kg berjalan dari A menuju C. Hitunglah:

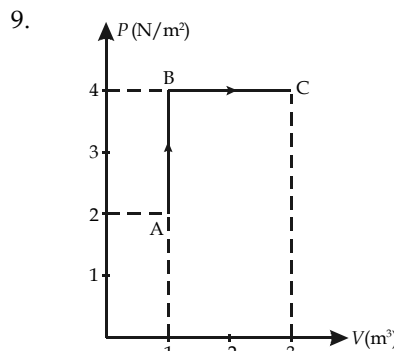
- Jarak maksimum anak dari titik B agar papan tetap setimbang (ujung batang A hampir terangkat), dan
- gaya normal di titik B.



Gambar tersebut menunjukkan reservoir penuh air yang dinding bagian bawahnya bocor hingga air memancar ke tanah. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah:

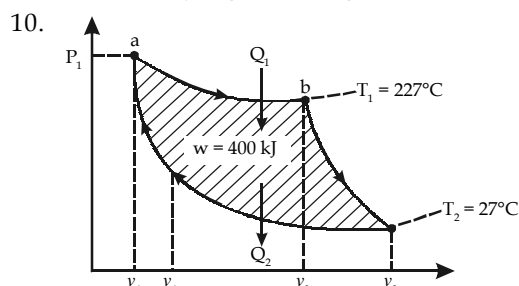
- waktu yang diperlukan air jatuh ke tanah, dan
- jarak pancaran maksimum air diukur dari titik P.

- Sebuah tabung gas berisi 10 mol gas helium pada suhu 127°C . Jika $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, tentukanlah:
 - energi kinetik rata-rata molekul-molekul gas Helium, dan
 - energi dalam molekul-molekul gas Helium.



Gas monoatomik menjalani proses A-B-C. Tentukanlah:

- usaha gas pada proses tersebut, dan
- kalor yang diserap gas selama proses A-B-C



Grafik di atas menyatakan hubungan tekanan (p) dan volume (V) pada suatu mesin Carnot. Tentukanlah:

- efisiensi mesin,
- kalor yang diserap mesin, dan
- kalor yang terbuang.

Kunci Jawaban

Bab 1 Gerak dalam Dua Dimensi

Soal Pramateri

2. posisi adalah letak suatu benda terhadap suatu titik acuan, perpindahan adalah perubahan posisi benda dalam waktu tertentu, kecepatan adalah perubahan posisi per satuan waktu, dan percepatan adalah perubahan kecepatan per satuan waktu.

Soal Penguasaan Materi 1.1

2. a. 40 m
b. 20 m/s
c. 10 m/s; 53° terhadap sumbu-x
4. a. 19,5 m/s²
b. 6,5 m/s²

Soal Penguasaan Materi 1.2

2. a. 20 m/s
b. 53°
c. 120 m/s
d. 3.840 m
e. 2.560 m

Soal Penguasaan Materi 1.3

2. 85 N
4. 12 m/s²
6. 0,8 m/s²
8. $v = (-4 \sin 2t)\mathbf{i} + (4 \cos 2t)\mathbf{j}$ m/s
10. 1 m/s

Evaluasi Materi Bab 1

A. Pilihan ganda

2. e 10. a 18. a
4. c 12. c 20. b
6. e 14. e
8. d 16. e

B. Esai

2. a. 201,67 m/s
b. 806,67 m
4. a. 7,49 km/s²
b. 8 m/s²

Bab 2 Gravitasi

Soal Pramateri

2. 133,33 N

Soal Penguasaan Materi 2.1

2. 30,1 au

Soal Penguasaan Materi 2.2

2. 30 cm

Evaluasi Materi Bab 2

A. Pilihan ganda

2. d 10. a 18. e
4. e 12. e 20. d
6. e 14. c
8. c 16. c

B. Esai

2. $3,76 \times 10^{-10}$ N; $1,17 \times 10^{-11}$ N; $4,25 \times 10^{-10}$ N
4. 5 cm dan 10 cm

Bab 3 Elastisitas dan Gerak Harmonik

Soal Pramateri

2. 0,5 Hz dan 2 s

Soal Penguasaan Materi 3.1

2. a. $3,33 \times 10^7$ N/m²
b. $4,8 \times 10^{-4}$
c. $6,94 \times 10^{10}$ N/m²
d. $4,17 \times 10^5$ N/m

Soal Penguasaan Materi 3.2

2. 20 N
4. 50 g
6. 4,5 cm

Evaluasi Materi Bab 3

A. Pilihan ganda

2. b 10. c 18. e
4. b 12. a 20. c
6. c 14. c
8. a 16. b

B. Esai

2. 25 g
4. 78,125 cm

Bab 4 Usaha, Energi, dan Daya

Soal Pramateri

2. Energi listrik, energi potensial, energi kinetik, dan energi kimia

Soal Penguasaan Materi 4.1

2. 480 J
4. 150 J

Soal Penguasaan Materi 4.2

2. a. 360 J
b. 640 J

Soal Penguasaan Materi 4.3

2. 50%

Evaluasi Materi Bab 4

A. Pilihan ganda

2. d 10. a 18. c
4. e 12. b 20. d
6. e 14. c
8. b 16. b

B. Esai

2. 1,6 m
4. a. 5 kg
b. 4 s
c. 40 m/s
d. 4.000 J

Bab 5 Momentum dan Impuls

Soal Pramateri

2. Energi yang timbul ketika benda bergerak.

Soal Penguasaan Materi 5.1

2. a. 60.000 kgm/s
b. nol

- c. $30.000 \sqrt{2}$ kgm/s
 d. 30.000 kgm/s
 4. 12,5 Ns

Soal Penguasaan Materi 5.2

2. a. 4 m/s
 b. 200 m/s

Soal Penguasaan Materi 5.3

2. 20 kg/s

Evaluasi Materi Bab 5

A. Pilihan ganda

2. d 10. b
 4. c 12. e
 6. b 14. e
 8. c

B. Esai

2. a. 0,75
 b. 2,56 m
 c. 45,56 cm

Evaluasi Materi Semester 1

A. Pilihan ganda

2. c 10. d 18. d
 4. b 12. b 20. c
 6. a 14. d 22. b
 8. e 16. c 24. b

B. Esai

2. 3.840 m
 4. 5 : 2
 6. 300 gram
 8. 20 joule
 10. 3 : 2

Bab 6 Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar

Soal Pramateri

2. Kecepatan sudut kincir berdiameter 10 m lebih kecil dibandingkan kecepatan sudut kincir berdiameter 2 m.

Soal Penguasaan Materi 6.1

2. a. $0,032 \text{ kgm}^2$
 b. $0,128 \text{ kgm}^2$
 c. $0,096 \text{ kgm}^2$

Soal Penguasaan Materi 6.2

2. 64 Nm
 4. 5 : 2

Soal Penguasaan Materi 6.3

2. $5\sqrt{2}$ N
 4. a. 2.200 N
 b. 3255,76 N

Evaluasi Materi Bab 6

A. Pilihan ganda

2. b 10. c 18. b
 4. e 12. c 20. d
 6. b 14. b
 8. e 16. c

B. Esai

2. 4 rad/s
 4. $2,51 \times 10^{-1}$ Nm
 6. 25 s

8. a. 0,25
 b. 0,87 kg

Bab 7 Fluida

Soal Pramateri

2. Karena massa jenis perahu atau kapal laut lebih besar daripada massa jenis air sehingga gaya beratnya lebih kecil daripada gaya ke atas dari air.

Soal Penguasaan Materi 7.1

2. 10 m
 4. 15 N
 6. a. 4 N
 b. 500 cm^3
 8. 14.600 Pa

Soal Penguasaan Materi 7.2

2. a. 10 m/s; $2,575 \text{ N/m}^2$
 b. $30 \text{ m}^3/\text{menit}$
 4. 0,024 N
 6. $1,8 \times 10^{-5}$ Pas

Evaluasi Materi Bab 7

A. Pilihan ganda

2. d 8. d 14. a
 4. b 10. d 16. e
 6. e 12. a 18. a

B. Esai

2. 15 cm
 4. 8 m/s

Bab 8 Teori Kinetik Gas

Soal Pramateri

2. Di daerah bersuhu tinggi, tekanan udara lebih tinggi daripada di daerah bersuhu rendah. Sesuai sifatnya, udara mengalir dari tempat bertekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah.

Soal Penguasaan Materi 8.1

2. 1,47 atm
 4. 240,68 K
 6. 4ρ
 8. 600 K

Soal Penguasaan Materi 8.2

2. $5,65 \times 10^{-21}$ J
 4. 10 : 1
 6. 1 : 2

Evaluasi Materi Bab 8

A. Pilihan ganda

2. b 10. b 16. e
 4. b 12. c 18. c
 6. c 14. a 20. c
 8. b

B. Esai

2. 30 cm
 4. 627°C

Bab 9 Termodinamika

Soal Pramateri

2. Proses isothermal adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada suhu tetap.

Proses isobarik adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada tekanan tetap.
 Proses isokhorik adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada volume tetap.

Soal Penguasaan Materi 9.1

2. 122,8 J

Soal Penguasaan Materi 9.2

2. 0,1860 J
 4. a. 14.200 J
 b. 49,86 J/K; 83,1 J/K

Soal Penguasaan Materi 9.3

2. a. 4 J/K
 b. -4 J/K
 c. nol

Evaluasi Materi Bab 9

A. Pilihan ganda

2. d 10. c 18. a
 4. e 12. b 20. d
 6. b 14. e 22. c
 8. c 16. c 24. b

B. Esai

2. 17.276,5 J
 4. 12 kJ; 30%
 6. 3 kkal atau 12,6 kJ
 8. a. 25%
 b. -0,25 J/K
 c. +0,25 J/K
 d. nol
 10. 200 K

Evaluasi Materi Semester 2

A. Pilihan ganda

2. d 12. b 22. e
 4. b 14. b 24. a
 6. e 16. e 26. a
 8. b 18. c 28. c
 10. b 20. d 30. b

B. Esai

2. 125 N; $\alpha = 53^\circ$
 4. 38,4 cm
 6. 10 m
 8. 27°C
 10. $1,5 \times 10^5 \text{ J}$

Evaluasi Materi Akhir Tahun

A. Pilihan ganda

2. c 12. c 22. a 32. e
 4. a 14. e 24. c 34. d
 6. d 16. b 26. b 36. b
 8. b 18. a 28. c 38. b
 10. c 20. d 30. c 40. d

B. Esai

2. a. 3.600 m
 b. $4,096 \text{ m/s}^2$
 4. a. 20 J
 b. 45°
 c. 20 m
 d. 4 sekon
 6. a. 0,8 m
 b. 650 N
 8. a. $4,14 \times 10^{-21} \text{ J}$
 b. $2,49 \times 10^4 \text{ J}$
 10. a. 40%
 b. 1.000 J
 c. 600 J

Apendiks

Sistem Satuan, Konversi, Konstanta, Matematis, dan Hadiah Nobel

Tabel Satuan Internasional (SI)

Kuantitas	Nama	Simbol	Definisi
Panjang	meter	m	"... panjang yang sama dengan 1.650.763,73 panjang gelombang dalam vakum dari radiasi yang bersesuaian dengan transisi di antara tingkat $2p_{10}$ dan tingkat $5d_5$ dari atom krypton-86." (1960)
Massa	kilogram	kg	"... prototip ini (sebuah silinder platinum-iridium tertentu). Dengan demikian akan dianggap satuan massa." (1889)
Waktu	sekon	s	"... lamanya 9.192.631.770 periode radiasi yang bersesuaian dengan transisi di antara kedua tingkat hiperhalus dari keadaan dasar atom cesium-133." (1967)
Arus listrik	ampere	A	"... bahwa jika arus konstan dipertahankan dalam dua penghantar sejajar yang lurus dan panjangnya tak berhingga, penampang lingkarannya dapat diabaikan, serta ditempatkan terpisah sejauh 1 m satu sama lain dalam vakum, akan menghasilkan sebuah gaya di antara penghantar-penghantar ini yang besarnya sama dengan 2×10^{-7} newton per meter panjang." (1946)
Temperatur termodinamika	kelvin	K	"... pecahan $1/273,16$ dari temperatur termodinamika titik tripel air." (1967)
Banyaknya zat	mol	mol	"... banyaknya zat sebuah sistem yang mengandung sejumlah entitas elementer sebanyak atom yang ada dalam 0,012 kilogram karbon-12." (1971)
Intensitas cahaya	kandela	cd	"... intensitas cahaya dalam arah tegak lurus dari sebuah permukaan benda hitam seluas $1/600.000$ meter kuadrat pada temperatur platinum beku di bawah tekanan sebesar 101.325 newton per meter kuadrat." (1967)

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Massa

	g	kg	slug	u	oz	lg	ton
1 gram =	1	0,001	$6,852 \times 10^{-5}$	$6,024 \times 10^{23}$	$3,527 \times 10^{-2}$	$2,205 \times 10^{-3}$	$1,102 \times 10^{-6}$
1 kilogram =	1000	1	$6,852 \times 10^{-2}$	$6,024 \times 10^{26}$	35,27	2,205	$1,102 \times 10^{-3}$
1 slug =	$1,459 \times 10^4$	14,59	1	$8,789 \times 10^{27}$	514,8	32,17	$1,609 \times 10^{-2}$
1 u =	$1,660 \times 10^{-24}$	$1,660 \times 10^{-27}$	$1,137 \times 10^{-28}$	1	$5,855 \times 10^{-26}$	$3,660 \times 10^{-27}$	$1,829 \times 10^{-30}$
1 ons =	28,35	$2,835 \times 10^{-2}$	$1,943 \times 10^{-3}$	$1,708 \times 10^{25}$	1	$6,250 \times 10^{-2}$	$3,125 \times 10^{-5}$
1 pon =	453,6	0,4536	$3,108 \times 10^{-2}$	$2,732 \times 10^{26}$	16	1	0,0005
1 ton =	$9,072 \times 10^5$	907,2	62,16	$5,465 \times 10^{29}$	$3,2 \times 10^4$	2000	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Laju

	ft/s	km/h	meter/sekon	mi/h	cm/s	knot
1 kaki per sekon =	1	1,097	0,3048	0,6818	30,48	0,5925
1 kilometer per jam =	0,9113	1	0,2778	0,6214	27,78	0,5400
1 meter per sekon =	3,281	3,6	1	2,237	100	1,944
1 mile =	1,467	1,609	0,4470	1	44,70	0,8689
1 centimeter per sekon =	$3,281 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-2}$	0,01	$2,237 \times 10^{-2}$	1	$1,944 \times 10^{-2}$
1 knot =	1,688	1,852	0,5144	1,151	51,44	1

Sumber: Fisika, 1996



Tabel Beberapa Konstanta Fisika yang Fundamental

Konstanta	Simbol	Nilai Komputasi	Nilai (1973) terbaik	
			Nilai	Ketidaktentuan
Laju cahaya dalam vakum	c	$3,00 \times 10^8$ m/s	2,99792458	0,004
Muatan elementer	e	$1,60 \times 10^{-19}$ C	1,6021892	2,9
Massa diam elektron	m_e	$9,11 \times 10^{-31}$ kg	9,109534	5,1
Konstanta permitivitas	ϵ_0	$8,85 \times 10^{-12}$ F/m	8,854187818	0,008
Konstanta permeabilitas	μ_0	$1,26 \times 10^{-6}$ H/m	4π (exactly)	–
Perbandingan muatan dan massa elektron	e/m_e	$1,76 \times 10^{11}$ C/kg	1,7588047	2,8
Massa diam proton	m_p	$1,67 \times 10^{-27}$ kg	1,6726485	5,1
Perbandingan massa proton dan massa elektron	m_p/m_e	1840	1836,15152	0,38
Massa diam neutron	m_n	$1,68 \times 10^{-27}$ kg	1,6749543	5,1
Massa diam muon	m_μ	$1,88 \times 10^{-28}$ kg	1,883566	5,6
Konstanta Planck	h	$6,63 \times 10^{-34}$ Js	6,626176	5,4
Panjang gelombang Compton elektron	λ_c	$2,43 \times 10^{-12}$ m	2,4263089	1,6
Konstanta gas molar	R	8,31 J/molK	8,31441	31
Bilangan Avogadro	N_A	$6,02 \times 10^{23}$ /mol	6,022045	5,1
Konstanta Boltzmann	k	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K	1,380662	32
Volume molar gas ideal pada STP	V_m	$2,24 \times 10^{-2}$ m ³ /mol	2,241383	31
Konstanta Faraday	F	$9,65 \times 10^4$ C/mol	9,648456	2,8
Konstanta Stefan-Boltzmann	σ	$5,67 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴	5,67032	125
Konstanta Rydberg	R	$1,10 \times 10^7$ /m	1,097373177	0,075
Konstanta gravitasi	G	$6,67 \times 10^{-11}$ m ³ /s ² kg	6,6720	615
Jari-jari Bohr	a_0	$5,29 \times 10^{-11}$ m	5,2917706	0,82
Momen magnet elektron	μ_e	$9,28 \times 10^{-24}$ J/T	9,284832	3,9
Momen magnet proton	μ_p	$1,41 \times 10^{-26}$ J/T	1,4106171	3,9
Magneton Bohr	μ_B	$9,27 \times 10^{-24}$ J/T	9,274078	3,9
Magneton nuklir	μ_N	$5,05 \times 10^{-27}$ J/T	5,050824	3,9

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Sudut Bidang

	°	'	"	Radian	Putaran
1 derajat =	1	60	3.600	$1,745 \times 10^{-2}$	$2,778 \times 10^{-3}$
1 menit =	$1,667 \times 10^{-2}$	1	60	$2,909 \times 10^{-4}$	$4,630 \times 10^{-5}$
1 sekon =	$2,778 \times 10^{-4}$	$1,667 \times 10^{-2}$	1	$4,848 \times 10^{-6}$	$7,716 \times 10^{-7}$
1 radian =	57,30	3.438	$2,063 \times 10^5$	1	0,1592
1 putaran =	360	$2,16 \times 10^4$	$1,296 \times 10^6$	6,283	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Panjang

	cm	meter	km	in.	ft
1 centimeter =	1	10^{-2}	10^{-5}	0,3937	$3,281 \times 10^{-2}$
1 meter =	100	1	10^{-3}	39,3	3,281
1 kilometer =	105	1.000	1	$3,937 \times 10^4$	3.281
1 inci =	2,540	$2,540 \times 10^{-2}$	$2,540 \times 10^{-5}$	1	$8,333 \times 10^{-2}$
1 kaki =	30,48	0,3048	$3,048 \times 10^{-4}$	12	1
1 mil =	$1,609 \times 10^5$	1.609	1,609	$6,336 \times 10^4$	5.280

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Tekanan

	atm	dyne/cm ²	cm-Hg	PASCAL
1 atmosphere =	1	1,013 × 10 ⁶	76	1,013 × 10 ⁵
1 dyne per cm ² =	9,869 × 10 ⁻⁷	1	7,501 × 10 ⁻⁴	0,1
1 inci air pada 0°C =	2,458 × 10 ⁻³	2491	0,1868	249,1
1 centimeter of mercury at 0°C =	1,316 × 10 ⁻²	1,333 × 10 ⁴	1	1.333
1 pascal =	9,869 × 10 ⁻⁶	10	7,501 × 10 ⁻⁴	1
1 pon per inci ² =	6,805 × 10 ⁻²	6,895 × 10 ⁴	5,171	6,895 × 10 ³
1 pon per fit ² =	4,725 × 10 ⁻⁴	478,8	3,591 × 10 ⁻²	47,88

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Tenaga, Kerja, dan Kalor

	joule	cal	kWh	eV	MeV	kg
1 satuan kalor Inggris =	1055	252,0	2,930 × 10 ⁻⁴	6,585 × 10 ²¹	6,585 × 10 ¹⁵	1,174 × 10 ⁻¹⁴
1 erg =	10 ⁻⁷	2,389 × 10 ⁻⁸	2,778 × 10 ⁻¹⁴	6,242 × 10 ¹¹	6,242 × 10 ⁵	1,113 × 10 ⁻²⁴
1 kaki-pon =	1,356	0,3239	3,766 × 10 ⁻⁷	8,464 × 10 ¹⁸	8,464 × 10 ¹²	1,509 × 10 ⁻¹⁷
1 daya kuda-jam =	2,685 × 10 ⁴	6,414 × 10 ⁵	0,7457	1,676 × 10 ²⁵	1,676 × 10 ¹⁹	2,988 × 10 ⁻¹¹
1 joule =	1	0,2389	2,778 × 10 ⁻⁷	6,242 × 10 ¹⁸	6,242 × 10 ¹²	1,113 × 10 ⁻¹⁷
1 kalori =	4,186	1	1,163 × 10 ⁻⁶	2,613 × 10 ¹⁹	2,613 × 10 ¹³	4,659 × 10 ⁻¹⁷
1 kilowatt-jam =	3,6 × 10 ⁸	8,601 × 10 ⁵	1	2,247 × 10 ²⁵	2,247 × 10 ¹⁹	4,007 × 10 ⁻¹¹
1 elektron volt =	1,602 × 10 ⁻¹⁹	3,827 × 10 ⁻²⁰	4,450 × 10 ⁻²⁶	1	10 ⁻⁶	1,783 × 10 ⁻³⁶
1 juta elektron volt =	1,602 × 10 ⁻¹³	3,827 × 10 ⁻¹⁴	4,450 × 10 ⁻²⁰	10 ⁶	1	1,783 × 10 ⁻³⁰
1 kilogram =	8,987 × 10 ¹⁶	2,147 × 10 ¹⁶	2,497 × 10 ¹⁰	5,610 × 10 ³⁵	5,610 × 10 ²⁹	1
1 satuan massa atom terpadu =	1,492 × 10 ⁻¹⁰	3,564 × 10 ⁻¹¹	4,145 × 10 ⁻¹⁷	9,31 × 10 ⁸	931,0	1,660 × 10 ⁻²⁷

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Daya

	Btu/h	ftlb/s	hp	cal/s	kW	watt
1 satuan kalor Inggris per jam =	1	0,2161	3,929 × 10 ⁻⁴	7,000 × 10 ⁻²	2,930 × 10 ⁻⁴	0,2930
1 kaki-pon per sekon =	4,628	1	1,818 × 10 ⁻³	0,3239	1,356 × 10 ⁻³	1,356
1 daya kuda =	2545	550	1	178,2	0,7457	745,7
1 kalor per sekon =	14,29	3,087	5,613 × 10 ⁻³	1	4,186 × 10 ⁻³	4,186
1 kilowatt =	3,413	737,6	1,341	238,9	1	1000
1 watt =	3,413	0,7376	1,341 × 10 ⁻³	0,2389	0,001	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Muatan

	abcoul	Ah	coulomb	statcoul
1 abcoulomb =	1	2,778 × 10 ⁻³	10	2,998 × 10 ¹⁰
1 ampere-hour =	360	1	3.600	1,079 × 10 ¹³
1 coulomb =	0,1	2,778 × 10 ⁻⁴	1	2,998 × 10 ⁹
1 statcoulomb =	3,336 × 10 ⁻¹¹	9,266 × 10 ⁻¹⁴	3,336 × 10 ⁻¹⁰	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Fluks Magnet

	maxwell	weber
1 maxwell =	1	10 ⁻⁸
1 weber =	10 ⁸	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Medan Magnet

	gauss	tesla	milligauss
1 gauss =	1	10 ⁻⁴	1000
1 tesla =	10 ⁴	1	10 ⁷
1 milligauss =	0,001	10 ⁻⁷	1

Sumber: Fisika, 1996



Tanda dan Simbol Matematika

=	menyamai
≅	kira-kira menyamai
≠	tidak sama dengan
≡	identik dengan, didefinisikan sebagai
>	lebih besar daripada (\gg jauh lebih besar daripada)
<	lebih kecil daripada (\ll jauh lebih kecil daripada)
\geq	lebih daripada atau sama dengan (atau, tidak kurang daripada)
\leq	kurang daripada atau sama dengan (atau, tidak lebih daripada)
+	tambah atau kurang ($\sqrt{4} = \pm 2$)
~	sebanding dengan (hukum Hooke: $F \sim x$, atau $F = -kx$)
Σ	jumlah dari
\bar{x}	nilai x rata-rata

Alfabet Yunani

Alpha	A	α	Nu	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Omicron	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Upsilon	Υ	υ
Lota	I	ι	Phi	Φ	ϕ, φ
Kappa	K	κ	Chi	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mu	M	μ	Omega	Ω	ω

Geometri

Lingkaran yang jari-jarinya r : keliling = $2\pi r$
 luas = πr^2

Bola yang jari-jarinya r : luas = $4\pi r^2$

$$\text{volume} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Silinder lingkaran tegak yang jari-jarinya r dan tingginya h : luas = $2\pi r^2 + 2\pi rh$
 volume = $\pi r^2 h$

Identitas Trigonometri

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

$$\sec^2 \theta - \tan^2 \theta = 1$$

$$\csc^2 \theta - \cot^2 \theta = 1$$

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2 \cos^2 \theta - 1 = 1 - 2 \sin^2 \theta$$

$$\sin \theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}$$

$$\cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2i}$$

$$e^{\pm i\theta} = \cos \theta \pm i \sin \theta$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \pm \sin \alpha \sin \beta$$

$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan \alpha \pm \tan \beta}{1 \pm \tan \alpha \tan \beta}$$

$$\sin \alpha \pm \sin \beta = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha \pm \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha \pm \beta)$$

Turunan dan Integral tidak tentu

- | | |
|---|---|
| 1. $\frac{dx}{dx} = 1$ | 1. $\int dx = x$ |
| 2. $\frac{d}{dx}(au) = a \frac{du}{dx}$ | 2. $\int au \, dx = a \int u \, dx$ |
| 3. $\frac{d}{dx}(u+v) = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dx}$ | 3. $\int (u+v) \, dx = \int u \, dx + \int v \, dx$ |
| 4. $\frac{d}{dx} x^m = mx^{m-1}$ | 4. $\int x^m \, dx = \frac{x^{m+1}}{m+1} \quad (m \neq -1)$ |
| 5. $\frac{d}{dx} \ln x = \frac{1}{x}$ | 5. $\int \frac{dx}{x} = \ln x $ |
| 6. $\frac{d}{dx}(uv) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}$ | 6. $\int u \frac{dv}{dx} \, dx = uv - \int v \frac{du}{dx} \, dx$ |
| 7. $\frac{d}{dx} e^x = e^x$ | 7. $\int e^x \, dx = e^x$ |
| 8. $\frac{d}{dx} \sin x = \cos x$ | 8. $\int \sin x \, dx = -\cos x$ |
| 9. $\frac{d}{dx} \cos x = -\sin x$ | 9. $\int \cos x \, dx = \sin x$ |

Perkalian Vektor

Misalkan \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} adalah vektor-vektor satuan dalam arah-arah x , y , z maka

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1, \quad \mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = 0,$$

$$\mathbf{i} \times \mathbf{i} = \mathbf{j} \times \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{k} = 0,$$

$$\mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}, \quad \mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i}, \quad \mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j}.$$

Setiap vektor \mathbf{a} dengan komponen-komponen a_x , a_y , a_z sepanjang sumbu-sumbu x , y , z dapat dituliskan

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}$$

Misalkan \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} adalah vektor-vektor sebarang yang besarnya a , b , c maka

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c}$$

$$(s\mathbf{a}) \times \mathbf{b} = \mathbf{a} \times (s\mathbf{b}) = s(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \quad (s = \text{sebuah skalar})$$

Misalkan θ adalah yang lebih kecil dari kedua sudut di antara \mathbf{a} dan \mathbf{b} maka

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = ab \cos \theta$$

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - b_y a_z) \mathbf{i} + (a_z b_x - b_z a_x) \mathbf{j} + (a_x b_y - b_x a_y) \mathbf{k}$$

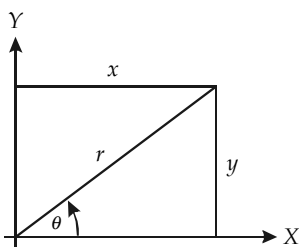
$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = ab \sin \theta$$

$$\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})$$

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$$

Teorema Pythagoras

$$x^2 + y^2 = r^2$$





Hadiah Nobel dalam Fisika

1901	Wilhelm Conrad Röntgen	1845–1923	untuk penemuan sinar yang mengagumkan yang selanjutnya dinamai sinar Röntgen
1902	Hendrik Antoon Lorentz Pieter Zeeman	1853–1928 1865–1943	untuk penelitian mereka ke dalam pengaruh magnetisma pada fenomena radiasi
1903	Antoine Henri Becquerel	1852–1908	untuk penemuannya mengenai radiasi dioaktivitas spontan
	Pierre Curie Marie Skłodowska-Curie	1859–1906 1867–1934	untuk penelitian bersama mengenai fenomena radiasi yang ditemukan oleh Profesor Henri Becquerel
1904	Lord Rayleigh (John William Strutt)	1842–1919	untuk penyelidikannya mengenai kerapatan gas-gas yang paling penting dan untuk penemuan gas argon
1905	Philipp Eduard Anton	1862–1947	untuk karyanya mengenai sinar katoda
1906	Joseph John Thomson	1856–1940	untuk penyelidikan teoretis dan eksperimentalnya mengenai hantaran listrik oleh gas
1907	Albert Abraham Michelson	1852–1931	untuk alat presisi optiknya dan penyelidikan metrologis yang dilakukan dengan menggunakan alat tersebut
1910	Johannes Diderik van der Waals	1837–1923	untuk karyanya mengenai persamaan keadaan untuk gas dan cairan
1911	Wilhelm Wien	1864–1928	untuk penemuannya mengenai hukum yang mengatur radiasi kalor
1915	William Henry Bragg William Lawrence Bragg	1862–1942 1890–1971	untuk pelayanan mereka dalam analisis struktur kristal dengan menggunakan sinar Röntgen
1917	Charles Glover Barkla	1877–1944	untuk penemuannya mengenai karakteristik radiasi sinar Röntgen dari elemen-elemen
1918	Max Planck	1858–1947	untuk penemuan kuantum tenaga
1921	Albert Einstein	1879–1955	untuk pelayanannya dalam Fisika Teoretik, dan khususnya untuk penemuannya mengenai hukum efek fotolistrik
1922	Niels Bohr	1855–1962	untuk penyelidikan struktur atom, dan radiasi yang memancar keluar dari atom tersebut
1923	Robert Andrews Millikan	1868–1983	untuk karyanya mengenai muatan listrik elementer dan mengenai efek fotolistrik
1925	James Franck Gustav Hertz	1882–1964 1887–1975	untuk penemuan mereka mengenai hukum yang mengatur tumbukan sebuah elektron pada sebuah atom
1927	Arthur Holly Compton	1892–1962	untuk penemuannya mengenai efek yang dinamakan seperti namanya
1929	Prince Louis Victor de Broglie	1892–1987	untuk penemuannya mengenai sifat gelombang elektron
1932	Werner Heisenberg	1901–1976	untuk terciptanya mekanika kuantum, yang pemakaiannya antara lain, menghasilkan penemuan bentuk alotropik dari hidrogen
1933	Erwin Schrodinger Paul Adrien Maurice Dirac	1887–1961 1902–1984	untuk penemuan bentuk baru yang produktif dari teori atom.
1936	Victor Franz Hess	1883–1964	untuk penemuan radiasi kosmis
1938	Enrico Fermi	1901–1954	untuk demonstrasi adanya elemen radioaktif baru yang dihasilkan oleh penyinaran neutron, dan untuk penemuan reaksi nuklir yang dihubungkan dengan hal tersebut yang dihasilkan oleh neutron lambat
1945	Wolfgang Pauli	1900–1958	untuk penemuan Prinsip Larangan yang juga dinamakan Prinsip Pauli
1954	Max Born	1882–1970	untuk penelitian dasar dalam mekanika kuantum, khususnya untuk interpretasi statistik dari fungsi gelombang

Kamus Fisika

A

Aliran turbulen: suatu jenis aliran fluida di mana partikel-partikel fluida bergerak secara acak dalam lintasan yang tidak teratur.

B

Berat benda: gaya tarik gravitasi yang dialami benda ke arah Bumi tanpa memperhitungkan pengaruh rotasi Bumi.

D

Daya: kelajuan melakukan usaha.

Debit: volume fluida yang dalam satu satuan waktu melewati suatu penampang lintang dalam alirannya.

E

Efisiensi: ukuran kinerja suatu mesin yang merupakan perbandingan antara energi atau daya dihasilkan terhadap energi atau daya yang diberikan.

Elastisitas: sifat beberapa bahan tertentu yang memungkinkan bahan tersebut kembali ke ukuran semula setelah tegangan yang diberikan diadakan.

Entropi: fungsi suatu sistem termodinamika yang perubahannya dalam setiap proses terbalikkan secara diferensial sama dengan gaya yang diserap sistem itu dari lingkungannya dibagi suhu mutlak sistem tersebut.

G

Gerak Harmonik: gerak periodik yang berfungsi sinusoidal terhadap waktu.

Gerak Lurus: gerak titik atau materi titik pada arah yang tetap, sepanjang garis lurus.

Gerak Melingkar: gerak titik melalui lintasan berupa lingkaran karena titik tersebut mengalami gaya memusat (sentrifugal) yang memberinya percepatan sentripetal.

Gerak Translasi: gerak benda tegar sedemikian rupa sehingga setiap garis yang dibayangkan terhubung tegar dengan benda itu dan tetap sejajar dengan arahnya semula.

H

Hidrodinamika: ilmu mengenai gerak fluida dan interaksinya, terutama dalam hal zat alir (fluida) itu taktermampatkan dan takkental.

Hidrostatika: ilmu mengenai zat cair yang berada dalam keadaan diam dan mengenai gaya-gaya yang bekerja pada zat cair tersebut.

K

Koefisien restitusi: ukuran elastisitas benda-benda yang bertumbukan

M

Massa: ukuran kelembaman suatu benda.

Meniskus: permukaan bebas cairan yang berada di dekat dinding bejana dan berbentuk melengkung karena pengaruh tegangan permukaan.

Mesin Kalor: alat yang dengan melalui daur tertentu mengubah sebagian dari kalor yang diterimanya menjadi usaha mekanik.

P

Proses reversibel: proses perubahan variabel-variabel yang membatasi keadaan sistem sehingga variabel-variabel tersebut melalui nilai-nilai yang sama, namun dengan urutan terbalik jika proses dibalik.

Pusat massa: sebuah titik yang dapat dianggap sebagai pusat konsentrasi seluruh massa sebuah benda.

S

Satuan Astronomi: satuan yang dipakai untuk menyatakan jarak di dalam tata surya. Satu satuan astronomi adalah jarak rata-rata antara Bumi dan Matahari, yaitu 149.504.000 km.

Siklus: sekelompok perubahan pada sebuah sistem yang berulang secara beraturan dan mengembalikan semua parameter ke nilai awal sistem untuk setiap kelompok perubahan.

T

Titik berat: sebuah titik yang dianggap sebagai tempat seluruh berat benda bekerja, jika benda berada di dalam medan gravitasi homogen.

Tekanan Atmosfer: tekanan pada sembarang titik di atmosfer yang semata-mata disebabkan oleh berat gas atmosfer di atas titik tersebut.

Turbin: mesin yang menggunakan zat alir (fluida) untuk menghasilkan gerak rotasi.

Indeks

A

adhesi 155
Air Safety Bag 96
aliran laminar 158
aliran turbulen 158
amplitudo 49, 56
Archimedes 148, 151, 153
ayunan matematis 54

B

barometer 144, 146
Bernoulli, Daniel 162
besaran skalar 2
vektor 2
bilangan Avogadro 177
Boyle, Robert 173, 174
Brahe, Tycho 30

C

Carnot, Sadi 200, 201
Cavendish, Henry 36
Clausius 204
Copernicus 30

D

daya 80, 81
derajat kebebasan 182
dinamika rotasi 120

E

efisiensi 81
efisiensi mesin kalor 200, 202
elastisitas 46, 47, 49
energi 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 81
dalam 182, 183
kinetik 76, 78
potensial elastis 73, 74
potensial gravitasi 38, 73, 74, 78
entropi 190, 204, 205

F

fase 58, 59
fluida dinamis 142, 156, 157
ideal 157, 158, 159, 161
sejati 161
statis 142, 157
frekuensi 56, 60, 61

G

gas ideal 172, 173, 176, 177, 180, 182, 183
gaya gravitasi 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38
pemulih pada ayunan matematis 54
pemulih pada pegas 46, 47, 49, 51, 53
gerak harmonik sederhana 49, 55, 56, 58, 59, 60
lurus 2, 12, 14, 15
lurus beraturan 12, 14
lurus berubah beraturan 12, 14, 15
melingkar 19, 20
melingkar beraturan 128
melingkar berubah beraturan 111
parabola 14, 15, 16, 19
rotasi 106, 112, 114, 117, 120, 121, 123, 125, 126,
127, 128

H

Habibie, Bacharuddin Jusuf 161
hidrometer 151, 152
Hooke, Robert 49, 50
Hukum
Archimedes 148, 151, 153
Boyle 172, 173, 174, 176
Charles 175, 176
Gay-Lussac 173, 174, 176
Gravitasi Newton 31, 33
Hooke 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53
Kedua Kepler 30
Kedua Termodinamika 204
Kekekalan Energi Mekanik 77, 78
Kekekalan Momentum 92, 94, 95
Kekekalan Momentum Sudut 126
Ketiga Kepler 30, 33
Pascal 146, 147
Pertama Kepler 30
Pertama Termodinamika 196, 197, 198, 199, 201
Stokes 163
Toricelli 161
Utama Hidrostatik 145

I

impuls 88, 89, 90, 92, 94, 95, 96

J

jarak terjauh 15, 16
Joule, James Prescott 73

K

kapasitas kalor 195, 198, 199
kapilaritas 142, 155
kecepatan sesaat 4, 5, 6
sudut 126

sudut rata-rata 106, 107
sudut sesaat 106, 107, 108
terminal 163
Kepler, Johannes 30, 31
kesetimbangan benda tegar 126
koefisien performansi 205
 restitusi 94
kohesi 155
konstanta gravitasi 32, 36, 37
 pegas 51, 52, 53, 60

L

lengan gaya 114, 115
lingkungan 190, 191, 205

M

makroskopis 179, 181
manometer 144, 159
massa jenis 142, 143, 144, 145, 146, 148, 149, 151, 152,
 157, 158, 159, 160, 163
Maxwell, James Clerk 182
medan gravitasi 34
melayang 148, 149, 152, 153
meniskus cekung 155
 cembung 155
mesin pendingin 205
mikroskopis 179, 181
modulus elastisitas 47
 young 47
momen gaya 124, 125, 126, 129
 inersia 126
 kopel 116, 117
momentum 88, 89, 90, 92, 94, 95, 96, 97
momentum sudut 126

N

neraca cavendish 36, 37
Newton, Sir Isaac 33

P

Pascal, Blaise 146, 148
percepatan gravitasi 34
 linear 112, 113, 114
 rata-rata 9, 10
 sesaat 9
 sudut 127
 sudut rata-rata 109
 sudut sesaat 109
periode 55, 56, 60, 61
perpindahan 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11
perpindahan sudut 106, 107
persamaan bernoulli 159
persamaan keadaan gas ideal 176, 177

persamaan kontinuitas 158
posisi sudut 106, 107, 108, 111
prinsip ekuipartisi energi 182, 183
proses adiabatik 192, 194, 195, 198, 201
 isobarik 190, 193, 198, 199
 isokhorik 193, 197, 198, 199
 isotermal 192, 195, 197, 201
 reversibel 200, 201
Ptolomeus 30
pusat massa 123, 124, 128

R

regangan 46
reservoir suhu rendah 201, 202, 204
 suhu tinggi 201, 202, 204
roket 95

S

Salam, Abdus 93
setimbang statik 127
siklus carnot 200, 201, 202, 204
simpangan 55, 56, 58, 59
sistem 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199
sudut fase 58, 59
susunan pegas 51

T

tabung pitot 160
tegangan 46, 47
tegangan permukaan 142, 153, 154, 155, 156
tekanan hidrostatis 143, 144, 146
tekanan udara luar 145
tenggelam 148, 149, 152, 153
terapung 148, 149, 152, 153
tetapan umum gas 177
tinggi maksimum 16
titik berat 128, 129, 130
tumbukan lenting sempurna 94
 lenting sebagian 94
 tidak lenting 94

U

usaha 70, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 80

V

vektor posisi 2, 3, 19
 satuan 2
venturimeter 159
viskositas 142, 158, 161, 162

W

Watt, James 204



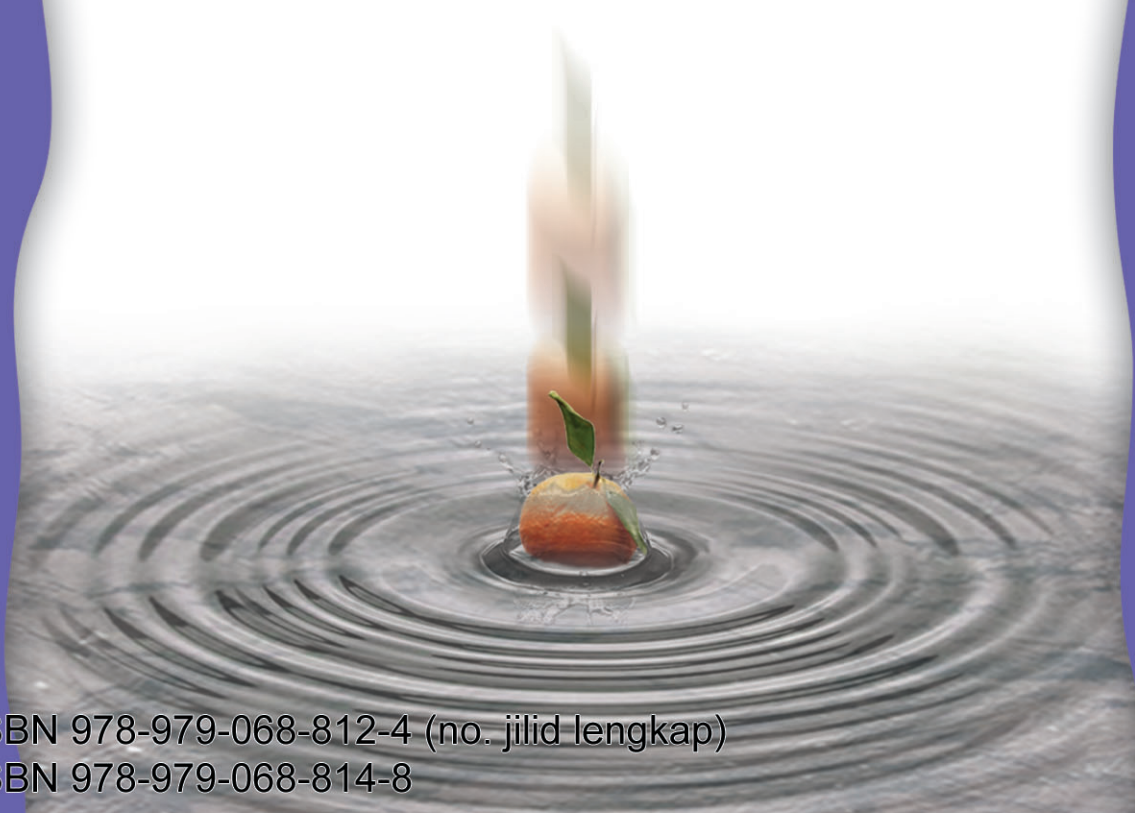
Daftar Pustaka

- Giancoli, Douglas C. 2000. *Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics, Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Halliday, David, Robert Resnick, dan Jearl Walker. 2001. *Fundamentals of Physics, Sixth Edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Hewitt, Paul G. 1998. *Conceptual Physics, Eight Edition*. New York: Addison Wesley Longman.
- Jones, E.R. dan Chiulders, R.L. 1994. *Contemporary College Physics, Second Edition*. New York: Addison Wesley Longman.
- Tipler, Paul A. 1991. *Physics for Scientists and Engineers, Third Edition*. New Jersey: Worth Publisher.
- Tim Redaksi Dorling Kindersley. 1997. *Jendela IPTEK, Cetakan Pertama*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Tim Redaksi Pustaka Setia. 2005. *Panduan SPMB IPA 2006*. Bandung: Pustaka Setia.
- Tim Redaksi Usborne Publishing LTD. 2000. *Science Encyclopedia*. London: Usborne Publishing LTD.
- Tim Widya Gamma. 2005. *Pemantapan Menghadapi Ujian Nasional (UN) dan Ujian Sekolah (US) SMA IPA 2005/2006*. Bandung: Yrama Widya.



Praktis Belajar Fisika

Disajikan untuk menambah pemahaman siswa tentang kehidupan manusia dan berbagai penemuan penting di bidang fisika. Buku ini dapat mengarahkan siswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam memecahkan masalah di lingkungan sekitar.



ISBN 978-979-068-812-4 (no. jilid lengkap)
ISBN 978-979-068-814-8

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 Tanggal 25 Juni 2007 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk Digunakan dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp15.412,--