

Dudi Indrajit

Mudah dan Aktif Belajar Fisika

untuk Kelas XI

Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam

2



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional





Dudi Indrajit

Mudah dan Aktif Belajar Fisika

2



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta Pada Departemen Pendidikan Nasional
dilindungi oleh Undang-Undang

**Mudah dan Aktif Belajar Fisika
untuk Kelas XI Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam**

Penulis : Dudi Indrajit
Penyunting : Ahmad Fauzi
Ahmad Saripudin
Pewajah Isi : Neni Yulianti
Ilustrator : S. Riyadi
Pewajah Sampul : A. Purnama

Ukuran Buku : 21 x 29,7cm

530.07

DUD

DUDI Indrajit

m

Mudah dan Aktif Belajar Fisika : untuk Kelas XI Sekolah Menengah Atas/
Madrasah Aliyah Program Ilmu Pengetahuan Alam / penulis, Dudi Indrajit
; penyunting, Ahmad Fauzi, Ahmad Saripudin, ; ilustrator, S. Riyadi.
. — Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
vi, 218 hlm, : ilus. ; 30 cm

Bibliografi : hlm. 218

Indeks

ISBN 978-979-068-816-2 (No. Jil Lengkap)

ISBN 978-979-068-818-6

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul
II. Ahmad Fauzi III. Ahmad Saripudin IV. S. Riyadi

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari Penerbit Setia Purna Inves, PT

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 (*down load*), 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

Kata Pengantar

Fisika adalah salah satu rumpun ilmu sains yang mempelajari alam semesta. Ruang lingkup ilmu Fisika sangat luas, mulai dari atom yang berdimensi nanometer hingga jagat raya yang berdimensi tahunan cahaya. Dalam kehidupan sehari-hari, banyak ditemukan aplikasi ilmu Fisika, baik berupa fenomena-fenomena di alam atau rekayasa teknologi. Oleh karena itu, Fisika memiliki tingkat urgensi yang tinggi karena merupakan dasar untuk penguasaan teknologi di masa depan.

Sesuai dengan misi penerbit untuk memberikan kontribusi yang nyata bagi kemajuan ilmu pengetahuan maka penulis dan penerbit merealisasikan tanggung jawab tersebut dengan menyediakan buku bahan ajar Fisika yang berkualitas, sesuai dengan tuntutan kurikulum yang berlaku saat ini.

Buku ini disusun dengan mengutamakan pendekatan secara inkuiri (eksperimen) dan disajikan secara sistematis, komunikatif, dan integratif, serta adanya keruntutan rangkaian (bab dengan subbab, antarsubbab dalam bab, antaralinea dalam subbab). Sebelum mempelajari materi, sebaiknya Anda terlebih dahulu membaca bagian **Advanced Organizer** yang terdapat pada halaman awal setiap bab agar Anda dapat mengetahui isi bab secara umum. Pada awal setiap bab, disajikan pula **Tes Kompetensi Awal** sebagai evaluasi materi prasyarat untuk mempelajari bab yang bersangkutan.

Di akhir setiap bab, terdapat **Rangkuman**, **Peta Konsep**, dan **Refleksi** yang bertujuan lebih meningkatkan pemahaman Anda tentang materi yang telah dipelajari dengan memunculkan umpan balik untuk evaluasi diri. Buku ini dilengkapi juga dengan beberapa materi, tugas, dan soal pengayaan, di antaranya **Informasi untuk Anda (Information for You)**, **Tantangan untuk Anda**, **Mari Mencari Tahu**, **Tugas Anda**, **Pembahasan Soal**, dan **Tokoh** yang dapat memperluas pengetahuan materi Fisika yang sedang dipelajari.

Untuk menguji pemahaman Anda terhadap materi yang telah dipelajari, diberikan **Tes Kompetensi Subbab** pada setiap akhir subbab, **Tes Kompetensi Bab** pada setiap akhir bab, dan **Tes Kompetensi Fisika Semester** pada setiap akhir semester. Selain itu, pada akhir buku juga diberikan **Tes Kompetensi Akhir** untuk menguji pemahaman materi Fisika selama satu tahun ajaran. Semua tes kompetensi tersebut merupakan sarana mengevaluasi pemahaman dan melatih kemampuan menerapkan konsep/prinsip Fisika yang berkaitan dengan materi yang telah dipelajari. Adapun **Kunci Jawaban** (nomor ganjil) kami sajikan untuk memudahkan Anda dalam mengevaluasi hasil jawaban.

Untuk menumbuhkan daya kreativitas, kemampuan psikomotorik, dan cara berpikir ilmiah, kami sajikan **Aktivitas Fisika** dan **Proyek Semester** yang menuntut peran aktif Anda dalam melakukan kegiatan tersebut.

Demikianlah persembahan kami untuk dunia pendidikan.

Bandung, Mei 2007

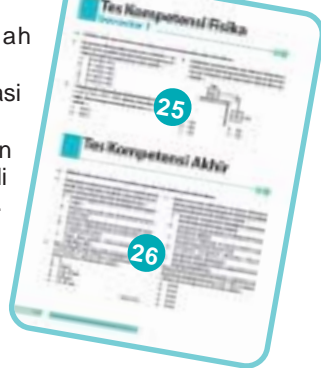
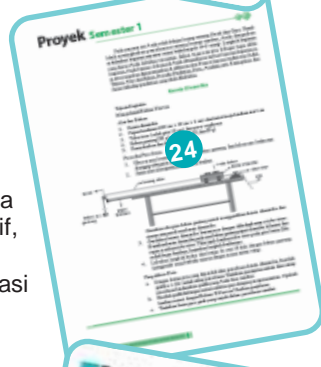
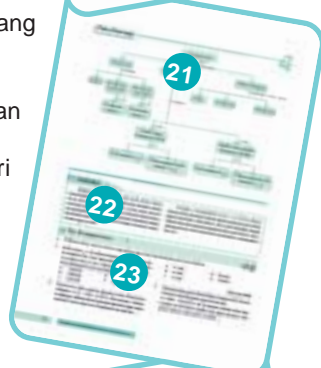
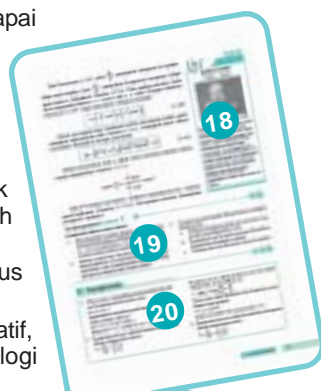
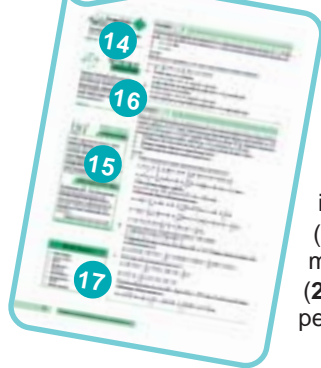
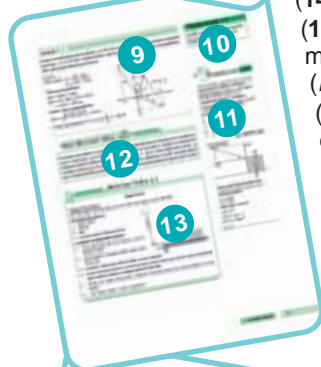
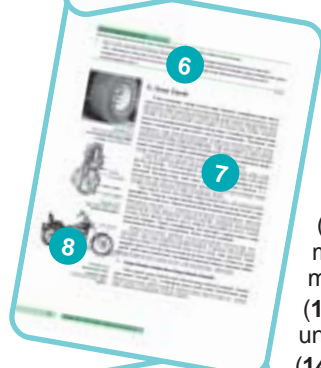
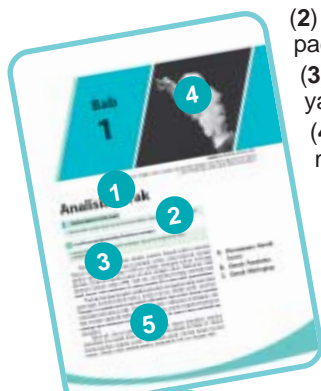
Penerbit

Panduan untuk Pembaca

Materi-materi pembelajaran pada buku ini berdasarkan kurikulum yang berlaku saat ini dan disajikan secara sistematis, komunikatif, dan integratif. Di setiap awal bab, dilengkapi gambar pembuka pelajaran, bertujuan memberikan gambaran materi pembelajaran yang akan dibahas, dan mengajarkan siswa konsep berpikir kontekstual sekaligus merangsang cara berpikir kontekstual. Selain itu, buku ini juga ditata dengan format yang menarik dan didukung dengan foto dan ilustrasi yang representatif. Penggunaan bahasa yang sederhana, sesuai dengan tingkatan kognitif siswa sehingga membuat pembaca lebih mudah memahaminya.

Buku Fisika untuk Kelas XI ini terdiri atas delapan bab, yaitu Analisis Gerak, Gaya, Usaha, Energi dan Daya, Momentum, Impuls dan Tumbukan, Gerak Rotasi dan Keseimbangan Benda Tegar, Fluida, Teori Kinetik Gas, dan Termodinamika. Untuk lebih jelasnya, perhatikan petunjuk untuk pembaca berikut.

- (1) **Judul Bab**, disesuaikan dengan tema materi dalam bab.
- (2) **Hasil yang harus Anda capai**, tujuan umum yang harus Anda capai pada bab yang Anda pelajari.
- (3) **Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu**, kemampuan yang harus Anda kuasai setelah mempelajari bab.
- (4) **Gambar Pembuka Bab**, disajikan untuk mengetahui contoh manfaat dari materi yang akan dipelajari.
- (5) **Advanced Organizer**, uraian singkat tentang isi bab untuk menumbuhkan motivasi belajar dan mengarahkan Anda agar lebih fokus terhadap isi bab.
- (6) **Tes Kompetensi Awal**, merupakan soal prasyarat yang harus Anda pahami sebelum memasuki materi pembelajaran.
- (7) **Materi Pembelajaran**, disajikan secara sistematis, komunikatif, integratif, dan sesuai dengan perkembangan ilmu dan teknologi terkini (*up to date*).
- (8) **Gambar dan Ilustrasi**, sesuai dengan materi dalam bab yang disajikan secara proporsional dan harmonis.
- (9) **Contoh Soal**, berisi contoh dan penyelesaian soal.
- (10) **Tugas Anda**, berisi tugas atau latihan soal yang berkaitan dengan materi tersebut.
- (11) **Pembahasan Soal**, berisi contoh soal yang berasal dari Ebtanas, UAN, UMPTN, atau SPMB.
- (12) **Mari Mencari Tahu**, tugas mencari informasi yang bertujuan menumbuhkan rasa ingin tahu dan mendorong siswa untuk mencari informasi lebih jauh.
- (13) **Aktivitas Fisika**, kegiatan yang dilakukan secara berkelompok untuk mengembangkan kecakapan hidup Anda.
- (14) **Ingatlah**, catatan atau hal-hal penting yang perlu Anda ketahui.
- (15) **Informasi untuk Anda (Information for You)**, berisi pengayaan mengenai informasi dan aplikasi materi, disajikan dalam 2 bahasa (*bilingual*).
- (16) **Tantangan untuk Anda**, berisi soal-soal yang disajikan dengan tingkat kesulitan lebih tinggi.
- (17) **Kata Kunci**
- (18) **Tokoh**, berisi tokoh Fisika penggagas ide baru dan pekerja keras sehingga akan menumbuhkan semangat inovatif/kreatif, etos kerja, dan mengembangkan kecakapan hidup Anda.
- (19) **Tes Kompetensi Subbab**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi subbab.
- (20) **Rangkuman**
- (21) **Peta Konsep**
- (22) **Refleksi**, sebagai umpan balik bagi siswa setelah mempelajari materi di akhir pembelajaran tiap bab.
- (23) **Tes Kompetensi Bab**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi bab.
- (24) **Proyek Semester**, kegiatan percobaan untuk meningkatkan pemahaman konsep Fisika dan memotivasi Anda untuk menggali informasi, memanfaatkan informasi, dan menyelesaikan masalah.
- (25) **Tes Kompetensi Fisika Semester**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi selama satu semester.
- (26) **Tes Kompetensi Akhir**, berisi soal-soal untuk mengevaluasi penguasaan materi selama satu tahun ajaran.



Daftar Isi

Kata Sambutan • iii
Kata Pengantar • iv
Panduan untuk Pembaca • v

Bab 1 Analisis Gerak • 1

- A. Persamaan Gerak Lurus • 2
- B. Gerak Parabola • 14
- C. Gerak Melingkar • 20
- Rangkuman • 21
- Peta Konsep • 22
- Refleksi • 22
- Tes Kompetensi Bab 1 • 23

Bab 2 Gaya • 25

- A. Gaya Gesek • 26
- B. Gaya Gravitasi • 35
- C. Elastisitas dan Gaya Pegas • 44
- D. Gerak Harmonik Sederhana • 51
- Rangkuman • 61
- Peta Konsep • 62
- Refleksi • 62
- Tes Kompetensi Bab 2 • 63

Bab 3 Usaha, Energi, dan Daya • 67

- A. Gaya Dapat Melakukan Usaha • 68
- B. Energi dan Usaha • 72
- C. Gaya Konservatif dan Hukum Kekekalan Energi Mekanik • 77
- D. Daya • 84
- Rangkuman • 86
- Peta Konsep • 87
- Refleksi • 87
- Tes Kompetensi Bab 3 • 88

Bab 4 Momentum, Impuls, dan Tumbukan • 91

- A. Momentum Linear • 92
- B. Tumbukan • 94
- C. Jenis Tumbukan • 96
- D. Tumbukan Lenting Sebagian pada Benda Jatuh Bebas • 100
- E. Ayunan Balistik • 102
- F. Gaya Dorong Roket • 104
- Rangkuman • 105
- Peta Konsep • 106
- Refleksi • 106
- Tes Kompetensi Bab 4 • 107
- Proyek Semester 1 • 110
- Tes Kompetensi Fisika Semester 1 • 111

Bab 5 **Gerak Rotasi dan** **Keseimbangan Benda** **Tegar • 115**

- A. Kinematika Gerak Rotasi • 116
- B. Dinamika Gerak Rotasi • 119
- C. Keseimbangan Benda Tegar • 132
- Rangkuman • 135
- Peta Konsep • 136
- Refleksi • 136
- Tes Kompetensi Bab 5 • 137

Bab 6 **Fluida • 139**

- A. Fluida Statis • 140
- B. Viskositas Fluida • 150
- C. Fluida Dinamis • 152
- Rangkuman • 159
- Peta Konsep • 160
- Refleksi • 160
- Tes Kompetensi Bab 6 • 161

Bab 7 **Teori Kinetik Gas • 163**

- A. Gas Ideal • 164
- B. Prinsip Ekuipartisi Energi • 167
- C. Kecepatan Efektif Partikel Gas • 173
- Rangkuman • 175
- Peta Konsep • 176
- Refleksi • 176
- Tes Kompetensi Bab 7 • 177

Bab 8 **Termodinamika • 179**

- A. Usaha pada Berbagai Proses Termodinamika • 180
- B. Hukum I Termodinamika • 184
- C. Kapasitas Kalor Gas dan Siklus Termodinamika • 187
- D. Hukum II Termodinamika • 191
- Rangkuman • 193
- Peta Konsep • 194
- Refleksi • 194
- Tes Kompetensi Bab 8 • 195
- Proyek Semester 2 • 198
- Tes Kompetensi Fisika Semester 2 • 200

- Tes Kompetensi Akhir • 204
- Kunci Jawaban • 208
- Apendiks • 212
- Senarai • 215
- Indeks • 216
- Daftar Pustaka • 218

Bab 1



Sumber: *Fundamentals of Physics*, 2001

Meriam dengan peluru manusia ditembakkan dengan sudut kemiringan dan kecepatan awal tertentu agar peluru jatuh tepat pada sasaran.

Analisis Gerak

Hasil yang harus Anda capai:

menganalisis gejala alam dan keteraturan dalam cakupan mekanika benda titik.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

menganalisis gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola dengan menggunakan vektor.

Pernahkah Anda melihat atraksi meriam dengan peluru manusia (*human cannonball*)? Salah satu kelompok sirkus yang terkenal dengan atraksi *canonball*-nya tahun 1930-an adalah kelompok sirkus keluarga Zachini. Prestasi mereka yang tercatat sebagai rekor dilakukan oleh Emanuel Zachini tahun 1940. Saat itu, ia berhasil terbang melewati tiga buah kincir dan mendarat di jaring sejauh 69 m dari titik penembakan.

Prestasi fenomenal pada kejadian tersebut merupakan salah satu bukti penerapan kaidah-kaidah Fisika, dalam hal ini adalah gerak parabola. Dengan kecepatan awal yang sudah diketahui dan sudut elevasi meriam terhadap horizontal sudah diatur maka titik maksimum ketinggian dan titik terjauh dapat diketahui. Oleh karena itu, mereka dapat menentukan setinggi apa rintangan yang digunakan dan di mana harus meletakkan jaringnya.

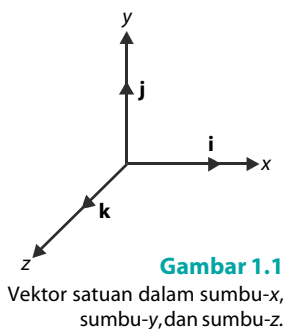
Tahukah Anda bahwa gerak parabola dapat dianalisis melalui perpaduan dua gerak lurus yang telah Anda pelajari di Kelas X? Untuk mempermudah analisis gerak, persamaan gerak diubah dalam bentuk vektor. Untuk lebih memahaminya, pelajarilah bab ini dengan baik.

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

Tes Kompetensi Awal

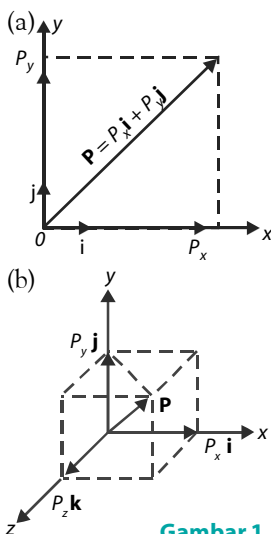
Sebelum mempelajari konsep Analisis Gerak, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

- Pada subbab Persamaan Gerak Lurus, Anda akan banyak menggunakan turunan dan integral. Hitunglah nilai turunan atau integral berikut.
 - $\frac{d}{dx}(x^3 - 3x^2 - 5x + 10)$
 - $\frac{d}{dx}(x^2y - 3xy^2z - 5x + 10y)$
 - $\int(x^2 + 5x - 3)dx$
 - $\int(x^2y + 5y + x)dx$
- Pada gerak parabola, asumsi gerak apa yang digunakan dalam arah sumbu-x dan sumbu-y?
- Apakah perbedaan kecepatan linear dan kecepatan sudut?



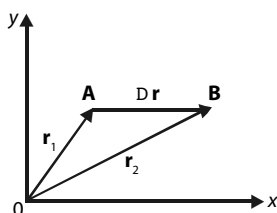
Gambar 1.1

Vektor satuan dalam sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z.



Gambar 1.2

- Posisi partikel pada bidang xy.
- Vektor \mathbf{P} dalam ruang.



Gambar 1.3

Perpindahan vektor posisi $\Delta \mathbf{r}$.

A. Persamaan Gerak Lurus

1. Posisi dan Arah Partikel Berdasarkan Vektor

Dalam Fisika, posisi suatu partikel selalu dituliskan dalam suatu sumbu koordinat. Sumbu koordinat yang sering digunakan, yaitu koordinat cartesius, koordinat silinder, dan koordinat bola. Untuk pembahasan pada bab ini, sumbu koordinat yang digunakan adalah koordinat cartesius, dengan posisi partikel dinyatakan dalam sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Untuk itu, kita aplikasikan vektor kali pertama pada gerak lurus.

a. Vektor Satuan dan Vektor Posisi

Suatu vektor dalam koordinat cartesius memiliki komponen di sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Pada setiap sumbu tersebut, terdapat vektor satuan yang besarnya satu dan memiliki arah sama dengan arah sumbunya. Pada sumbu-x, vektor satuannya adalah \mathbf{i} . Pada sumbu-y, vektor satuannya adalah \mathbf{j} dan sumbu-z vektor satuannya adalah \mathbf{k} . Sebagai contoh, perhatikan **Gambar 1.2(a)**. Vektor \mathbf{P} yang terletak pada bidang xy dapat dituliskan dalam bentuk vektor sebagai berikut.

$$\mathbf{P} = P_x \mathbf{i} + P_y \mathbf{j}$$

Adapun untuk vektor yang terletak dalam ruang (**Gambar 1.2(b)**), vektor \mathbf{P} dapat dituliskan dalam notasi vektor sebagai berikut.

$$\mathbf{P} = P_x \mathbf{i} + P_y \mathbf{j} + P_z \mathbf{k} \quad (1-1)$$

dengan P_x , P_y , dan P_z merupakan besaran skalar.

b. Vektor Perpindahan

Sebuah partikel yang bergerak pada suatu bidang datar, yaitu terhadap sumbu-x dan sumbu-y, vektor posisinya pada suatu titik ditunjukkan seperti pada **Gambar 1.3**. Jika partikel melakukan perpindahan dari posisi \mathbf{r}_1 ke posisi \mathbf{r}_2 , perpindahan posisi tersebut dinyatakan dengan $\Delta \mathbf{r}$. Perpindahan sebuah partikel $\Delta \mathbf{r}$ dapat diperoleh dengan menggunakan aturan vektor perpindahan, yaitu sebagai berikut.

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-2)$$

Jika vektor posisi $\mathbf{r}_1 = x_1 \mathbf{i} + y_1 \mathbf{j}$ dan vektor posisi $\mathbf{r}_2 = x_2 \mathbf{i} + y_2 \mathbf{j}$, persamaan perpindahan $\Delta \mathbf{r}$ menjadi:

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 \mathbf{i} + y_2 \mathbf{j}) - (x_1 \mathbf{i} + y_1 \mathbf{j}) \Rightarrow \Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1) \mathbf{i} - (y_2 - y_1) \mathbf{j}$$

Jika $\Delta x = x_2 - x_1$ dan $\Delta y = y_2 - y_1$ maka akan diperoleh

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

Untuk menentukan besar vektor perpindahan, dapat ditulis

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

Adapun arah perpindahan partikel dapat diperoleh melalui besar sudut yang dibentuk terhadap sumbu-x, yaitu

$$\tan \theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \text{ atau } \theta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Contoh 1.1

Posisi awal sebuah partikel adalah $\mathbf{r}_1 = (8\mathbf{i} - 5\mathbf{j})\text{m}$, kemudian partikel tersebut berpindah ke posisi $\mathbf{r}_2 = (3\mathbf{i} + 7\mathbf{j})\text{m}$. Tentukanlah vektor perpindahan, besar vektor perpindahan, dan arah perpindahan partikel itu.

Jawab:

Diketahui: $\mathbf{r}_1 = (8\mathbf{i} - 5\mathbf{j})\text{m}$
 $\mathbf{r}_2 = (3\mathbf{i} + 7\mathbf{j})\text{m}$

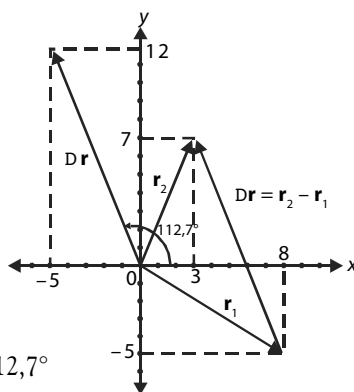
Vektor perpindahan:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} \\ \Delta \mathbf{r} &= (3 - 8)\mathbf{i} + (7 - (-5))\mathbf{j} \\ &= (-5\mathbf{i} + 12\mathbf{j}) \text{ m} \end{aligned}$$

Besar vektor perpindahan:

$$\Delta r = \sqrt{(-5)^2 + (12)^2} = 13 \text{ m}$$

$$\text{Arah perpindahan } \theta = \arctan \frac{12}{-5} = 112,7^\circ$$



c. Menentukan Komponen-Komponen Vektor Jika Arah dan Besarnya Diketahui

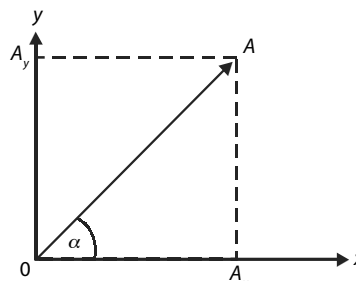
Perhatikan Gambar 1.4. Pada gambar tersebut, vektor \mathbf{A} diuraikan terhadap sumbu-x dan sumbu-y. A_x adalah komponen vektor \mathbf{A} pada sumbu-x, sedangkan A_y adalah komponen vektor \mathbf{A} pada sumbu-y. Jika α adalah sudut yang dibentuk oleh vektor \mathbf{A} terhadap sumbu-x, besar A_x dan A_y dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$A_x = A \cos \alpha \text{ dan } A_y = A \sin \alpha \quad (1-5)$$



Penulisan notasi vektor yang benar adalah dengan tanda panah di atas atau dengan huruf tebal.

$\vec{P} = \mathbf{P}$.
 Dalam buku ini digunakan huruf tebal sebagai penanda vektor.



Gambar 1.4
 A_x dan A_y merupakan komponen-komponen vektor \mathbf{A} pada sumbu-x dan sumbu-y.

Contoh 1.2

Dengan mengendarai sepeda, Tarigan mengikuti *touring* yang diselenggarakan sekolahnya dengan menempuh rute seperti ditunjukkan pada gambar. Pertama sepeda bergerak menuju kota A sejauh 60 km dalam arah 30° ke barat laut, kemudian bergerak ke kota B sejauh 30 km ke utara. Tentukan posisi kota B dan arahnya terhadap sekolah Tarigan.

Jawab:

Vektor perpindahan sepeda dinyatakan sebagai vektor \mathbf{A} dan \mathbf{B} . Komponen vektor \mathbf{A} :

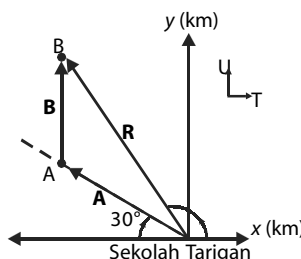
$$A_x = A \cos (150^\circ) = 60 \text{ km } (-0,866) = -52 \text{ km}$$

$$A_y = A \sin (150^\circ) = 60 \text{ km } (0,5) = 30 \text{ km}$$

Komponen vektor \mathbf{B} :

$$B_x = B \cos (90^\circ) = 30 \text{ km } (0) = 0 \text{ km}$$

$$B_y = B \sin (90^\circ) = 30 \text{ km } (1) = 30 \text{ km}$$



Posisi titik B dapat dituliskan sebagai berikut.

$$R_x = A_x + B_x = -52 \text{ km} + 0 \text{ km} = -52 \text{ km}$$

$$R_y = A_y + B_y = 30 \text{ km} + 30 \text{ km} = 60 \text{ km}$$

Posisi titik B dapat ditulis dalam notasi vektor, yaitu

$$\mathbf{R} = (-52\mathbf{i} + 60\mathbf{j}) \text{ km}$$

Jadi, arah perpindahan kota B dari sekolah Tarigan adalah

$$\tan \theta = \frac{R_y}{R_x} = \frac{60}{-52} \text{ (kuadran II)}$$

$$\theta = \arctan \frac{60}{-52} = 131^\circ$$

2. Perpindahan dan Jarak

Pada uraian sebelumnya, telah dijelaskan bahwa perubahan posisi memunculkan perpindahan, atau secara matematis ditulis $\Delta \mathbf{r}$. Posisi dan perpindahan keduanya merupakan besaran vektor. Sangat penting untuk diingat bahwa fisika membedakan pengertian perpindahan dan jarak.

Misalnya, Ibu pergi dari rumah ke pasar untuk belanja. Satu jam berikutnya, Ibu kembali lagi ke rumah. Menurut pengertian perpindahan, selama satu jam tersebut, Ibu mengalami perpindahan nol. Adapun jarak yang dialami Ibu adalah total panjang lintasan saat Ibu bergerak bolak-balik dari rumah ke pasar.

3. Persamaan Kecepatan dan Kelajuan

Benda atau seseorang dikatakan bergerak karena posisinya berubah atau mengalami perpindahan. Selain berpindah, gerak mengakibatkan perubahan waktu atau selang waktu. Dengan demikian, ketika benda bergerak terjadi perubahan posisi setiap saat, artinya posisi merupakan fungsi waktu. Pernyataan tersebut secara matematis dapat ditulis sebagai $\mathbf{r}(t)$. Saat benda berubah posisi atau berpindah dalam selang waktu tertentu, muncullah besaran kecepatan benda tersebut. Hal ini mengakibatkan kecepatan dapat diturunkan dari fungsi posisi.

a. Kecepatan dan Kelajuan Rata-Rata

Kecepatan rata-rata dari sebuah benda yang bergerak pada satu dimensi sama dengan perpindahan sebuah benda dibagi dengan interval waktu yang digunakan selama perpindahan tersebut.

Hal tersebut juga berlaku untuk gerak pada dua dimensi dan tiga dimensi. Secara matematis, kecepatan rata-rata dapat ditulis sebagai berikut.

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

Keterangan:

$\bar{\mathbf{v}}$ = kecepatan rata-rata (m/s)

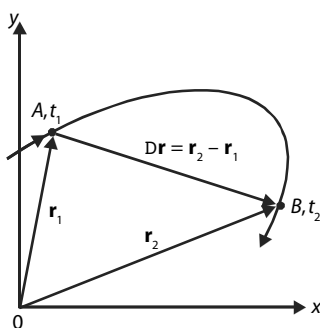
$\Delta \mathbf{r}$ = perpindahan benda (m)

Δt = selang waktu (sekon)

Jika Anda perhatikan Persamaan (1-3) dan (1-5) dengan $\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ dan

$\bar{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$, vektor kecepatan rata-rata dalam dua dimensi adalah

$$\bar{\mathbf{v}} = \bar{v}_x \mathbf{i} + \bar{v}_y \mathbf{j} \quad (1-7)$$



Gambar 1.5

Kecepatan rata-rata $\bar{\mathbf{v}}$ di antara A dan B searah dengan arah $\Delta \mathbf{r}$.



Penulisan vektor satuan yang benar adalah \mathbf{i} , \mathbf{j} , dan \mathbf{k} atau $\hat{\mathbf{i}}$, $\hat{\mathbf{j}}$, dan $\hat{\mathbf{k}}$.

Keterangan:

\bar{v} = vektor kecepatan rata-rata (m/s)

\bar{v}_x = besar kecepatan rata-rata pada sumbu-x (m/s)

\bar{v}_y = besar kecepatan rata-rata pada sumbu-y (m/s)

Besar kecepatan rata-rata memenuhi persamaan

$$\bar{v} = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2} \quad (1-8)$$

Kelajuan rata-rata berkaitan dengan jarak, bukan perpindahan. Sering kelajuan rata-rata sama dengan kecepatan rata-rata tanpa ada tanda arah (minus atau positif). Namun, hal ini terjadi pada gerak satu arah. Bagaimana kelajuan rata-rata dan kecepatan rata-rata suatu benda jika gerak berbalik arah ke tempat awal?

Jadi, kelajuan rata-rata dapat ditulis sebagai berikut.

$$\text{laju}_{\text{rata-rata}} = \frac{\text{total jarak}}{\Delta t}$$

Contoh 1.3

Diketahui vektor posisi suatu partikel yang bergerak adalah $\mathbf{r} = (4t)\mathbf{i} + (2t - 3t^2)\mathbf{j}$, dengan r dalam meter dan t dalam sekon. Tentukanlah:

- posisi benda pada saat $t = 2$ sekon;
- kecepatan dan besar kecepatan rata-rata selama selang waktu $t = 2$ sekon hingga $t = 4$ sekon.

Jawab:

Diketahui: $\mathbf{r} = (4t)\mathbf{i} + (2t - 3t^2)\mathbf{j}$

- Vektor posisi partikel pada saat $t = 2$ sekon adalah
 $\mathbf{r} = [(4)(2)]\mathbf{i} + [(2)(2) - (3)(2)^2]\mathbf{j} = 8\mathbf{i} - 8\mathbf{j}$
- Vektor posisi partikel pada saat $t = 4$ sekon adalah
 $\mathbf{r} = [(4)(4)]\mathbf{i} + [(2)(4) - (3)(4)^2]\mathbf{j} = 16\mathbf{i} - 40\mathbf{j}$
maka kecepatan rata-rata partikel adalah

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{v}} &= \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}(t=4) - \mathbf{r}(t=2)}{\Delta t} \\ &= \frac{(16\mathbf{i} - 40\mathbf{j})\text{m} - (8\mathbf{i} - 8\mathbf{j})\text{m}}{(4-2)\text{s}} \\ &= \frac{(8\mathbf{i} - 32\mathbf{j})\text{m}}{2\text{s}} = (4\mathbf{i} - 16\mathbf{j})\text{ m/s}. \end{aligned}$$

Adapun besar kecepatan rata-ratanya adalah

$$|\bar{\mathbf{v}}| = \bar{v} = \sqrt{4^2 + (-16)^2} = 16,5\text{ m/s}$$

atau

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{\sqrt{8^2 + (-32)^2}}{2} = 16,5\text{ m/s}.$$

b. Kecepatan dan Kelajuan Sesaat

Ketika Anda berangkat ke sekolah, baik dengan berjalan, bersepeda, atau dengan menaiki kendaraan, bagaimana nilai kecepatan gerak Anda? Tentunya, tidak sepanjang perjalanan memiliki nilai kecepatan yang sama. Nilai kecepatan selalu berubah setiap saat. Kecepatan sesaat (atau kecepatan saja) adalah kecepatan gerak benda di suatu titik pada lintasannya. Dengan kata lain, kecepatan sesaat dari suatu benda yang bergerak adalah kecepatan yang dimiliki benda pada interval waktu mendekati nol.

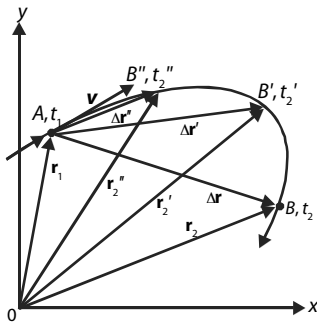


Laju adalah besaran skalar, sehingga ditulis dengan huruf v miring.



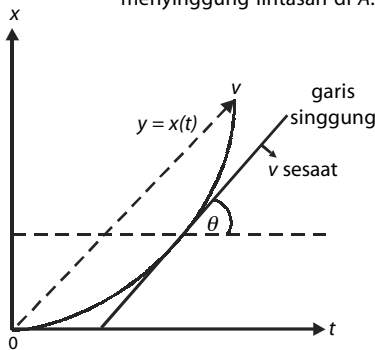
Tugas Anda 1.1

Berilah sebuah contoh persamaan kecepatan sebagai fungsi dari waktu yang berorde 2.



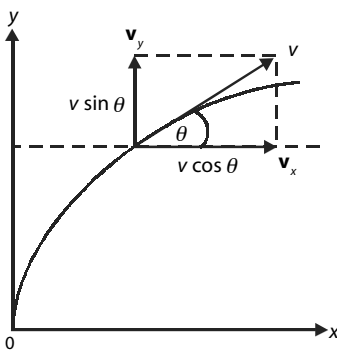
Gambar 1.6

Ketika B makin dekat dengan A atau $(\lim_{\Delta t \rightarrow 0})$, kecepatan sesaat v di A menyinggung lintasan di A.



Gambar 1.7

Kecepatan sesaat suatu benda dapat diperoleh dari garis singgung kurva lintasan benda untuk satu dimensi.



Gambar 1.8

Grafik kecepatan sesaat pada bidang xy atau bidang dua dimensi.

Pada **Gambar 1.6**, jika titik B mendekati posisi titik A, vektor perpindahan $AB = \Delta r$ akan berimpit dengan garis singgung pada lintasan di A. Jadi, arah kecepatan sesaat v sama dengan garis singgung lintasan di titik A. Secara matematis, kecepatan sesaat dituliskan

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1-9)$$

Secara matematis, sesuai dengan tafsiran geometris untuk turunan, turunan pertama dari suatu fungsi pada suatu titik adalah gradien garis singgung kurva di titik tersebut. Dengan demikian, kecepatan sesaat dari suatu titik materi dapat ditentukan secara grafik apabila diketahui grafik perpindahan titik materi terhadap waktu.

Perhatikan **Gambar 1.7**. Untuk grafik perpindahan x terhadap waktu t dalam gerak satu dimensi, dapat diketahui besar kecepatan sesaat benda. Jika garis singgung kurva di suatu titik membentuk sudut θ terhadap sumbu- t , besar kecepatan sesaat benda tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$v = \tan \alpha \quad (1-10)$$

Gambar 1.8 memperlihatkan sebuah titik materi pada bidang xy . Vektor kecepatan sesaatnya adalah $v = v_x i + v_y j$, sedangkan besarnya menjadi kelajuan sesaat. Kelajuan sesaat diperoleh dengan persamaan:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (1-11)$$

Adapun arah kecepatan sesaat pada bidang dengan melihat kecepatan pada sumbu- x adalah v_x dan kecepatan pada sumbu- y adalah v_y sehingga akan diperoleh

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} \quad (1-12)$$

Jadi, kelajuan pada sumbu- x dan sumbu- y adalah

$$v_x = v \cos \theta \text{ dan } v_y = v \sin \theta \quad (1-13)$$

Keterangan:

v_x = kelajuan pada sumbu- x (m/s)

v_y = kelajuan pada sumbu- y (m/s)

Contoh 1.4

Seekor burung terbang dengan kecepatan 20 m/s dalam arah 37° terhadap arah horizontal. Tentukanlah komponen-komponen kelajuan burung dan tentukan juga vektor kecepataannya dalam vektor satuan.

Jawab:

Lukislah terlebih dulu vektor kecepatan dan komponen-komponen kecepatan terhadap sumbu- x dan sumbu- y agar mudah dipahami.

Kelajuan pada sumbu- x :

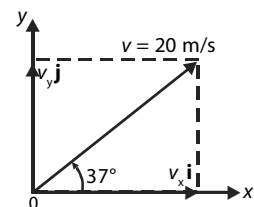
$$v_x = v \cos 37^\circ = (20 \text{ m/s})(0,8) = 16 \text{ m/s.}$$

Kelajuan pada sumbu- y :

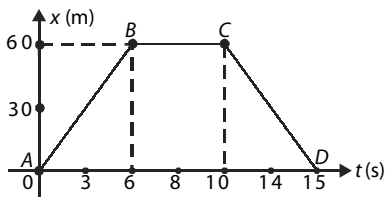
$$v_y = v \sin 37^\circ = (20 \text{ m/s})(0,6) = 12 \text{ m/s.}$$

Vektor kecepatan burung adalah

$$v = v_x i + v_y j = (16i + 12j) \text{ m/s.}$$



Contoh 1.5



Gambar di samping adalah grafik perpindahan sebuah sepeda yang bergerak terhadap waktu. Tentukan kecepatan sepeda pada saat:

- $t = 3$ sekon;
- $t = 6$ sekon; dan
- $t = 14$ sekon.

Jawab:

Sepanjang grafik gerak ($x-t$), gerak sepeda dibagi dalam tiga garis lurus, yaitu garis AB, garis BC, dan garis CD.

- a. Pada saat $t = 3$ sekon, grafik gerak ($x-t$) sepeda berada pada garis lurus AB. Besar kecepatan sepanjang garis tersebut adalah

$$v_{AB} = \tan \alpha_{AB} = \frac{y_{AB}}{x_{AB}} = \frac{60 \text{ m} - 0}{6 \text{ s} - 0} = 10 \text{ m/s.}$$

- b. Pada saat $t = 6$ sekon, grafik gerak ($x-t$) sepeda berada pada garis lurus BC. Besar kecepatannya adalah

$$v_{BC} = \tan \alpha_{BC} = \frac{y_{BC}}{x_{BC}} = \frac{0}{6 \text{ s} - 0} = 0. \text{ (sepeda tidak bergerak)}$$

- c. Pada saat $t = 14$ sekon, sepeda berada pada garis lurus CD. Kecepatan sepeda merupakan kemiringan garis CD, yaitu

$$v_{CD} = \tan \alpha_{CD} = \frac{y_{CD}}{x_{CD}} = \frac{0 - 60 \text{ m}}{15 - 10 \text{ s}} = -12 \text{ m/s.}$$

Tanda negatif menunjukkan sepeda berbalik arah.



Tantangan untuk Anda

Pada saat balapan A1-GP, pembalap Indonesia, Ananda Mikola memantau kecepatannya melalui *speedometer*. Menurut Anda, bagaimanakah cara kerja *speedometer*? Gunakan bahasa Anda sendiri untuk menerangkan cara kerja *speedometer*.

Contoh 1.6

Sebuah partikel bergerak dengan persamaan lintasan $\mathbf{r} = (t^2 + 3t - 4)\mathbf{i}$ m, dengan r dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan kecepatan partikel ketika $t = 2$ sekon.

Jawab:

Kecepatan diperoleh dari diferensial persamaan posisi. Dengan memasukkan waktu $t = 2$, diperoleh

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d}{dt} (t^2 + 3t - 4)\mathbf{i} = (2t + 3)\mathbf{i} \text{ m/s.}$$

$$\mathbf{v} = (2t + 3)\mathbf{i} = (2(2) + 3)\mathbf{i} = 7\mathbf{i} \text{ m/s.}$$

c. Menghitung Posisi dari Kecepatan

Telah Anda ketahui bahwa kecepatan merupakan turunan pertama dari fungsi posisi, yaitu $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j}$. Secara matematis, posisi sebuah partikel dapat diperoleh dari fungsi kecepatannya melalui proses integrasi.

Besar kecepatan dalam arah sumbu- x :

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

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

$$(x - x_0) = \int_0^t v_x dt$$

$$x = \left(x_0 + \int_0^t v_x dt \right) \quad (1-14)$$

Besar kecepatan dalam arah sumbu-y:

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

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

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

$$y = \left(y_0 + \int_0^t v_y dt \right) \quad (1-15)$$

Contoh 1.7

Seekor kelinci berjalan di atas rumput pada bidang xy . Letak awal kelinci pada koordinat $(2, 3)$ m. Komponen kecepatannya adalah $v_x = 6t$ dan $v_y = 2 + 3t^2$. Jika v_x dan v_y dalam m/s dan t dalam sekon, tentukanlah:

- vektor posisi kelinci; dan
- posisi kelinci pada saat $t = 2$ sekon.

Jawab:

- Koordinat awal $(2, 3)$ m dan besar komponen kecepatannya adalah

$$v_x = 6t \text{ dan } v_y = 2 + 3t^2 \text{ sehingga}$$

$$x = x_0 + \int v_x dt = 2 + \int 6t dt = 2 + 3t^2$$

$$y = y_0 + \int v_y dt = 3 + \int (2 + 3t^2) dt = 3 + 2t + t^3$$

Vektor posisi kelinci adalah

$$\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j} = (2 + 3t^2) \mathbf{i} + (3 + 2t + t^3) \mathbf{j}$$

- Koordinat kelinci pada saat $t = 2$ sekon adalah

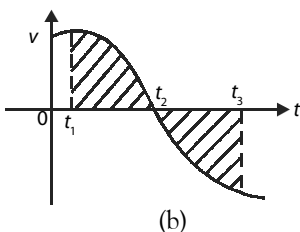
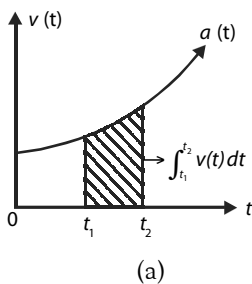
$$x = 2 + 3(2)^2 = 2 \text{ m} + 12 \text{ m} = 14 \text{ m}$$

$$y = 3 + 2(2) + (2)^3 = 3 \text{ m} + 4 \text{ m} + 8 \text{ m} = 15 \text{ m}$$

Jadi, vektor posisi pada saat $t = 2$ sekon adalah

$$\mathbf{r} = (14 \text{ m})\mathbf{i} + (15 \text{ m})\mathbf{j}$$

d. Menghitung Perpindahan dan Jarak dari Grafik Kecepatan terhadap Waktu



Gambar 1.9

- Grafik fungsi kecepatan (v) terhadap waktu (t).
- Grafik $v-t$ untuk gerak benda yang berbalik arah.

Grafik kecepatan terhadap waktu dari gerak suatu benda dapat dilihat pada **Gambar 1.9(a)**. Secara grafik, luas daerah yang diarsir, yaitu daerah yang dibatasi grafik besar kecepatan sebagai fungsi waktu $v(t)$ dengan sumbu horizontal t adalah posisi dari benda.

Jika sebuah benda bergerak menempuh garis lurus tanpa berbalik arah, besar perpindahan selalu sama dengan jarak yang ditempuh benda. Akan tetapi, untuk benda yang bergerak lurus dan sesaat kemudian berbalik arah, akan memiliki besar jarak yang berbeda dengan besar perpindahan.

Perhatikan gambar **Gambar 1.9(b)**. Luas daerah yang diarsir menunjukkan besarnya jarak. Dengan mengintegrasikan persamaan garisnya diperoleh besar jarak sebagai berikut.

$$x = \left| \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt - \int_{t_2}^{t_3} v(t) dt \right|$$

Tanda mutlak digunakan untuk memastikan bahwa besar jarak selalu bertanda positif. Adapun untuk menghitung besar perpindahannya, digunakan persamaan berikut.

$$\Delta x = \int_{t_1}^{t_3} v(t) dt$$

Contoh 1.8

Kecepatan partikel yang bergerak lurus memenuhi persamaan $v = (3t^2 - 6t - 9)$ dengan besar v dalam m/s dan t dalam sekon. Tentukan perpindahan dan jarak yang ditempuh partikel untuk selang waktu antara $t = 2$ sekon dan $t = 4$ sekon.

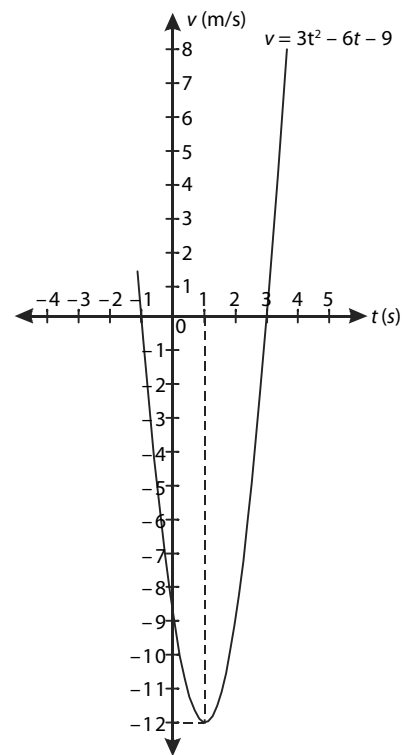
Jawab:

Gambarkan grafik $v = 3t^2 - 6t - 9$ terlebih dahulu dengan perhitungan berikut.

- Titik potong terhadap sumbu- t diperoleh dari $v = 0$.
 $3t^2 - 6t - 9 = 0$
 $t^2 - 2t - 3 = 0$
 $(t - 3)(t + 1) = 0$
 $t = 3$ dan $t = -1$
- Titik puncak grafik:
 $x = \frac{-b}{2a} = \frac{6}{2(3)} = 1$
 sehingga kecepatan di $t = 1$ s adalah $v = 3(1)^2 - 6(1) - 9 = -12$ m/s

Untuk selang waktu $t = 2$ sekon hingga $t = 4$ sekon, diperoleh:

- Perpindahan $= \int_2^4 v dt = \int_2^4 (3t^2 - 6t - 9) dt = \left[(t^3 - 3t^2 - 9t) \right]_2^4$
 $= (4^3 - 3(4)^2 - 9(4)) - (2^3 - 3(2)^2 - 9(2)) = 2$ m.
- Jarak $= -\int_2^3 v(t) dt + \int_3^4 v(t) dt = -\int_2^3 (3t^2 - 6t - 9) dt + \int_3^4 (3t^2 - 6t - 9) dt$
 $= -\left[t^3 - 3t^2 - 9t \right]_2^3 + \left[t^3 - 3t^2 - 9t \right]_3^4$
 $= -\left([3^3 - 3 \cdot 3^2 - 9 \cdot 3] - [2^3 - 3 \cdot 2^2 - 9 \cdot 2] \right) +$
 $\left[4^3 - 3 \cdot 4^2 - 9 \cdot 4 \right] - \left[3^3 - 3 \cdot 3^2 - 9 \cdot 3 \right] = 12$ m.



4. Percepatan

Setiap benda yang mendapat gaya F akan mengalami perubahan kecepatan sehingga benda tersebut memiliki percepatan. Sama halnya dengan kecepatan, pada percepatan dikenal juga istilah percepatan rata-rata dan percepatan sesaat. Oleh karena kecepatan termasuk besaran vektor, maka percepatan juga merupakan besaran vektor yang nilainya merupakan turunan pertama dari kecepatan. Untuk benda yang bergerak vertikal ke atas, percepatan yang dimiliki adalah percepatan gravitasi dan bernilai negatif, sedangkan untuk gerak jatuh, percepatannya bernilai positif.

a. Percepatan Rata-Rata

Percepatan rata-rata pada gerak dua dimensi memiliki pengertian sama dengan percepatan rata-rata pada gerak satu dimensi, yaitu hasil bagi perubahan kecepatan terhadap interval waktu.

Gambar 1.10 memperlihatkan grafik hubungan kecepatan terhadap waktu. Pada saat t_1 benda berada di titik A dengan kecepatan yang dimiliki v_1 . Pada saat t_2 , benda berada di titik B dengan kecepatan yang dimiliki v_2 . Percepatan rata-rata benda dari A sampai B adalah

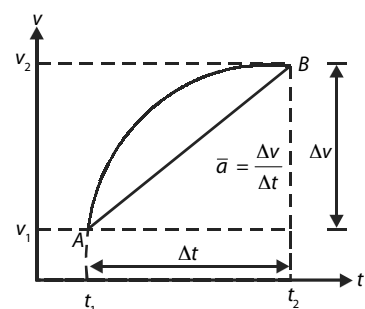
$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1-16)$$

Keterangan:

- \bar{a} = percepatan rata-rata (m/s²)
- Δv = perubahan kecepatan (m/s)
- Δt = selang waktu (s)

Tugas Anda 1.2

Diskusikan dengan teman sebangkumu Anda, apa perbedaan antara jarak dan perpindahan? Bagaimana Anda menerangkan konsep jarak dan perpindahan ini pada kasus mobil F1 yang sedang balapan di sirkuit? Pada balapan F1, garis *start* dan *finish* berada di tempat yang sama, dan mobil hanya bergerak mengelilingi sirkuit.



Gambar 1.10
Percepatan rata-rata.

Vektor percepatan sebuah benda yang bergerak pada bidang, yaitu pada sumbu horizontal (sumbu-x) dan sumbu vertikal (sumbu-y) nilainya adalah:

$$\bar{\mathbf{a}} = \bar{a}_x \mathbf{i} + \bar{a}_y \mathbf{j} \quad (1-17)$$

Adapun besar percepatan rata-rata memenuhi persamaan:

$$\bar{a} = \sqrt{\bar{a}_x^2 + \bar{a}_y^2} \quad (1-18)$$

Keterangan:

$\bar{\mathbf{a}}$ = percepatan rata-rata (m/s²)

\bar{a}_x = besar percepatan pada sumbu-x (m/s²)

\bar{a}_y = besar percepatan pada sumbu-y (m/s²)

b. Percepatan Sesaat

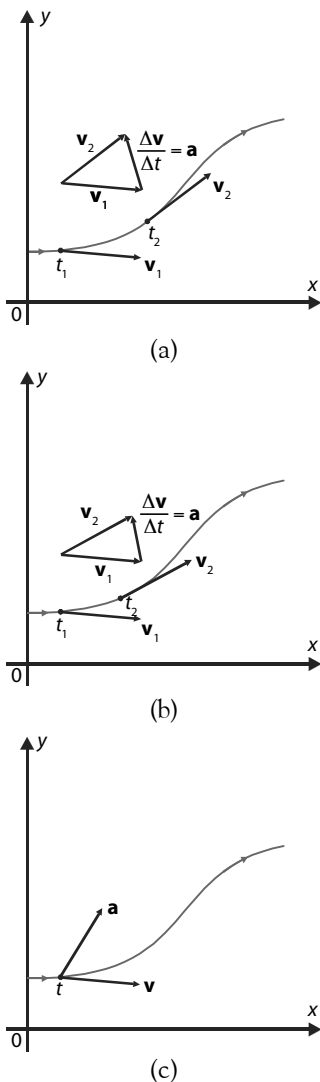
Seperti pada kecepatan sesaat, percepatan sesaat gerak sebuah partikel membutuhkan selang waktu (Δt) yang sangat singkat, yaitu Δt mendekati nol. Jadi, percepatan sesaat merupakan turunan pertama dari persamaan kecepatan untuk selang waktu mendekati nol.

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{a}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-19)$$

Percepatan sesaat merupakan turunan kedua dari fungsi posisi karena $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$. Oleh karena itu,

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-20)$$

Tahukah Anda, cara menunjukkan proses limit dalam menentukan percepatan sesaat berdasarkan grafik? Untuk mengetahuinya, perhatikan **Gambar 1.11**.



Gambar 1.11

Percepatan sesaat $\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ merupakan percepatan pada saat $t_2 - t_1$ menuju nol atau Δt menuju nol.

Pada **Gambar 1.11(a)** dan **Gambar 1.11(b)**, vektor \mathbf{v}_1 dan \mathbf{v}_2 , merupakan vektor kecepatan pada saat t_1 dan t_2 , sedangkan $\Delta \mathbf{v}$ merupakan perubahan kecepatan. t_1 dibuat tetap, sedangkan t_2 dibuat mendekati t_1 sehingga $\Delta t \rightarrow 0$. Berdasarkan definisi $\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$, $\bar{\mathbf{a}}$ memiliki arah yang sama dengan $\Delta \mathbf{v}$. Oleh karena itu, \mathbf{a} memiliki arah yang sama dengan $\Delta \mathbf{v}$ ketika Δt mendekati nol. Pada saat $\Delta t \rightarrow 0$ dicapai, seperti ditunjukkan **Gambar 1.11(c)**, t_1 dan \mathbf{v}_1 , ditunjukkan dengan t dan \mathbf{v} sehingga $\bar{\mathbf{a}}$ menjadi \mathbf{a} . Vektor percepatan sesaat \mathbf{a} selalu menjadi sisi lengkung lintasan titik materi, sedangkan vektor kecepatan \mathbf{v} tetap menyinggung lintasan di t .

Jika partikel bergerak pada bidang xy , di dapat komponen-komponen percepatan berikut ini

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d}{dt} (v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}) \\ &= \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} \end{aligned}$$

Anda tentu telah mengetahui bahwa $v_x = \frac{dx}{dt}$ dan $v_y = \frac{dy}{dt}$.

Dengan demikian, $a_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2}$ dan $a_y = \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) = \frac{d^2y}{dt^2}$

sehingga

$$\mathbf{a} = \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \mathbf{j} \quad (1-21)$$

Adapun besar percepatan sesaat adalah

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (1-22)$$

Adapun, arah percepatan sesaat terhadap sumbu- x dapat ditentukan dengan persamaan

$$\tan \theta = \frac{a_y}{a_x} \quad (1-23)$$

Contoh 1.9

Sebuah partikel bergerak dengan persamaan kelajuan $v(t) = 4t^2 - 2t + 8$ dengan v dalam m/s dan t dalam sekon. Tentukanlah:

- besar percepatan rata-rata gerak partikel untuk $t = 2$ s sampai dengan $t = 4$ s;
- besar percepatan awal partikel; dan
- besar percepatan partikel pada saat $t = 3$ sekon.

Jawab:

- Persamaan kecepatan adalah $v(t) = 4t^2 - 2t + 8$.

Untuk $t_1 = 2$ s ; $v_1 = 4(2)^2 - 2(2) + 8 = 20$ m/s

Untuk $t_2 = 4$ s ; $v_2 = 4(4)^2 - 2(4) + 8 = 64$ m/s

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{64 - 20}{4 - 2} = 22 \text{ m/s}^2$$

- Persamaan percepatan diperoleh dari turunan pertama persamaan kecepatan, yaitu

$$a = \frac{d}{dt}(4t^2 - 2t + 8) = 8t - 2$$

Besar percepatan awal partikel pada saat $t = 0$ adalah

$$a = 8t - 2 = 8(0) - 2 = -2 \text{ m/s}^2$$

- Besar percepatan partikel pada saat $t = 3$ sekon adalah

$$a = 8t - 2 = 8(3) - 2 = 22 \text{ m/s}^2$$

c. Persamaan Kecepatan dari Percepatan Fungsi Waktu

Untuk gerak benda pada satu bidang, kecepatan didefinisikan sebagai perubahan posisi dalam selang waktu tertentu. Oleh karena percepatan dan kecepatan merupakan besaran vektor maka kecepatan dapat juga diperoleh dari fungsi percepatan dengan metode integrasi berikut.

$$a = \frac{dv}{dt} \text{ atau } \int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt \quad (1-24)$$

$$v_t - v_0 = \int_0^t a dt \quad (1-25)$$

Keterangan:

v = kecepatan benda pada saat t sekon (m/s)

v_0 = kecepatan awal benda pada saat $t = 0$ (m/s)

a = percepatan benda (m/s^2)

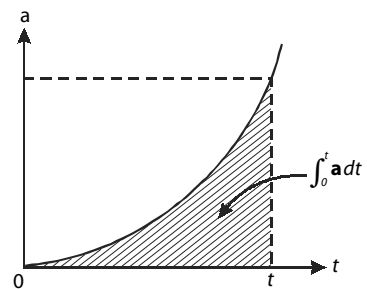
Grafik besar percepatan terhadap waktu dari gerak sebuah benda dapat dilihat pada **Gambar 1.12**. Luas daerah yang diarsir, yaitu daerah yang dibatasi oleh grafik besar percepatan sebagai fungsi waktu $a(t)$ dengan sumbu horizontal t adalah perubahan kecepatan gerak benda.

Jika sebuah benda bergerak pada dua dimensi, yaitu pada bidang horizontal dan bidang vertikal, besar komponen-komponen kecepatan terhadap sumbu- x dan sumbu- y memenuhi persamaan berikut.

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt \text{ dan } v_y = v_{0y} + \int_0^t a_y dt \quad (1-26)$$

Tugas Anda 1.3

Jika Anda naik mobil dan duduk di sebelah sopir, coba perhatikan bagaimana gerakan speedometer mobil. Diskusikan bersama teman Anda bagaimana pengaruhnya terhadap percepatan mobil.



Gambar 1.12
Grafik fungsi percepatan (a) terhadap waktu (t).



Informasi untuk Anda

Pada 26 September 1993, seorang mekanik mesin diesel bernama Dave Munday yang untuk kedua kalinya melakukan aksi jatuh bebas setinggi 48 m di air terjun Niagara yang berada di wilayah Kanada. Pada aksinya itu, ia menggunakan sebuah bola baja yang diberi lubang udara supaya ia bisa bernapas ketika berada di dalamnya. Munday sangat memperhatikan faktor keselamatan pada aksinya itu karena sudah 4 orang yang tewas ketika melakukan aksi serupa. Oleh karena itu, ia memperhitungkan aspek fisika (terutama gerak lurus) dan aspek teknis dari bola baja yang digunakannya.

Information for You

On September 26th, 1993, Dave Munday a diesel mechanic went over the Canadian edge of Niagara Falls for the second time. Freely falling 48 m to the water (and rocks) below. On this attempt, he rode in a steel ball with a hole of air. Munday keep on surviving this plunge that had killed four other stuntman, had done considerable research on the physics (motion along a straight line) and engineering aspects of the plunge.

Sumber: *Fundamental of Physics*, 2001

Contoh 1.10

Sebuah partikel bergerak sepanjang sumbu- x dengan persamaan percepatan $a(t) = 3t$. Jika pada $t = 0$ memiliki besar kecepatan $v_0 = 2$ m/s, tentukan kelajuan partikel pada saat:

- $t = 2$ s, dan
- $t = 4$ s.

Jawab:

Kelajuan awal partikel $v_0 = 2$ m/s maka persamaan besar kelajuan

$$v = v_0 + \int_0^t a dt = 2 + \int_0^t 3t dt = 2 + 1,5 t^2$$

- Pada saat $t = 2$ s maka
 $v = 2 + 1,5 t^2 = 2 + (1,5)2^2 = 8$ m/s.
 Jadi, kelajuan awal partikel pada saat $t = 2$, yaitu 8 m/s.
- Pada saat $t = 4$ s maka
 $v = 2 + 1,5 t^2 = 2 + (1,5)4^2 = 26$ m/s.
 Jadi, kelajuan awal partikel pada saat $t = 4$ s adalah 26 m/s.

Contoh 1.11

Sebuah bola dilemparkan pada bidang xy . Komponen percepatan bola pada arah horizontal adalah $\mathbf{a}_x = (6t^2)\mathbf{i}$ m/s² dan komponen percepatan dalam arah vertikal $\mathbf{a}_y = (4 - 2t)\mathbf{j}$ m/s². Pada saat $t = 0$, bola berada di pusat koordinat $(0, 0)$ dengan komponen-komponen kecepatan awalnya adalah $v_{0x} = 6$ m/s dan $v_{0y} = 8$ j m/s.

- Tuliskan vektor kecepatan dan vektor posisi sebagai fungsi waktu.
- Berapa tinggi maksimum yang dicapai bola?
- Tentukan jarak terjauh yang dicapai bola.

Jawab:

- Vektor kecepatan dapat diperoleh dengan persamaan

$$v_x = (v_{0x} + \int_0^t a_x dt)\mathbf{i} = (6 + \int_0^t 6t^2 dt)\mathbf{i} = (6 + 2t^3)\mathbf{i} \text{ m/s}$$

$$v_y = (v_{0y} + \int_0^t a_y dt)\mathbf{j} = (8 + \int_0^t (4 - 2t)dt)\mathbf{j} = (8 + 4t - t^2)\mathbf{j} \text{ m/s}$$

Vektor kecepatannya adalah

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} = \{(6 + 2t^3)\mathbf{i} + (8 + 4t - t^2)\mathbf{j}\} \text{ m/s.}$$

Vektor posisi diperoleh dari persamaan

$$x = (x_0 + \int_0^t v_x dt)\mathbf{i} = (0 + \int_0^t (6 + 2t^3)dt)\mathbf{i} = (6t + \frac{1}{2}t^4)\mathbf{i}$$

$$y = (y_0 + \int_0^t v_y dt)\mathbf{j} = (0 + \int_0^t (8 + 4t - t^2)dt)\mathbf{j} = (8t + 2t^2 - \frac{1}{3}t^3)\mathbf{j}$$

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} = \left(6t + \frac{1}{2}t^4\right)\mathbf{i} + \left(8t + 2t^2 - \frac{1}{3}t^3\right)\mathbf{j}.$$

- Tinggi maksimum yang dicapai ketika $v_y = 0$ adalah

$$v_y = 8 + 4t - t^2 \Rightarrow 0 = 8 + 4t - t^2.$$

Dengan perhitungan matematika diperoleh $t = 5,5$ s. Tinggi maksimum diperoleh melalui persamaan

$$y(t = 5,5 \text{ s}) = 8t + 2t^2 - \frac{1}{3}t^3 = 8(5,5) + 2(5,5)^2 - \frac{1}{3}(5,5)^3 = 49 \text{ m.}$$

- Bola kembali ke tanah, berarti $y = 0$.

$$y = 8t + 2t^2 - \frac{1}{3}t^3 \Rightarrow 0 = t(8 + 2t - \frac{1}{3}t^2)$$

$$0 = 8 + 2t - \frac{1}{3}t^2 \Rightarrow t^2 - 6t - 24 = 0.$$

Dengan perhitungan matematika, diperoleh $t = 8,74$ sekon. Jarak terjauh dapat dihitung melalui persamaan

$$x(t = 8,74 \text{ s}) = 6t + \frac{1}{2}t^4 = 6(8,74) + \frac{1}{2}(8,74)^4 = 2.970 \text{ m.}$$

5. Perpaduan Dua Vektor

Perpaduan antara dua vektor akan menghasilkan vektor perpaduan atau vektor resultan. Contoh vektor perpaduan atau vektor resultan ini dapat Anda jumpai pada sebuah perahu yang sedang menyeberangi sungai dengan kecepatan tetap.

Misalkan, kecepatan aliran sungai dinyatakan dengan v_1 dan kecepatan perahu dinyatakan dengan v_2 , seperti ditunjukkan pada **Gambar 1.13**. Perpaduan antara dua buah gerak lurus beraturan tersebut membentuk resultan dua vektor, yaitu $v = v_1 + v_2$. Besar resultan kecepatannya adalah

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2 \cos \theta} \quad (1-27)$$

Adapun jarak yang ditempuh perahu karena resultan kecepatannya adalah

$$s = vt$$

Keterangan:

v = besar resultan kecepatan kedua gerak (m/s)

s = jarak (m)

t = waktu tempuh (s)

Contoh 1.12

Sebuah perahu hendak menyeberangi sungai dengan kecepatan 3 m/s dan membentuk sudut 60° terhadap arah arus sungai yang mengalir dengan kecepatan 4 m/s.

- Gambarkan lintasan perahu.
- Tentukan resultan kecepatan perahu.
- Berapakah perpindahan perahu sampai ke seberang setelah 5 sekon?

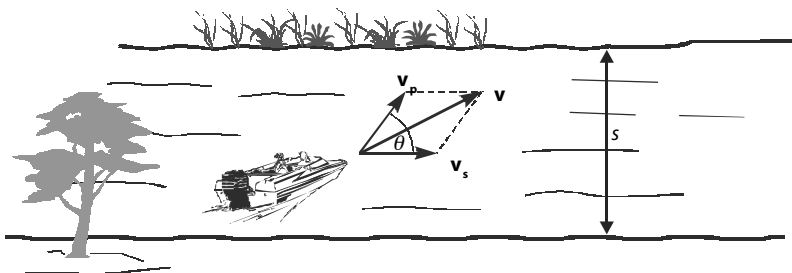
Jawab:

Diketahui:

$$v_p = 3 \text{ m/s}; \quad \theta = 60^\circ$$

$$v_s = 4 \text{ m/s}$$

- Lintasan perahu:



s = lebar sungai;

v_p = kecepatan perahu;

$$v = v_p + v_s$$

$$v = \sqrt{v_p^2 + v_s^2 + 2v_p v_s \cos \theta}$$

$$v = \sqrt{(3)^2 + (4)^2 + [(2)(3)(4)(\cos 60^\circ)]} = \sqrt{9 + 16 + [(24)(0,5)]}$$

$$v = 6,08 \text{ m/s.}$$

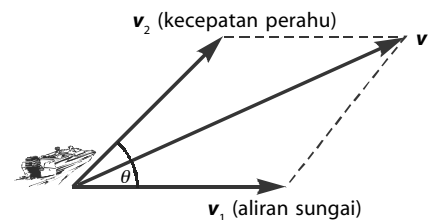
Jadi, besar resultan kecepatan perahu adalah 6,08 m/s.

$$c. \quad s = v \cdot t = (6,08 \text{ m/s}) \times (5 \text{ s}) = 30,4 \text{ m}$$

Jadi, panjang lintasan yang ditempuh perahu setelah 5 sekon adalah 30,4 m.

Tugas Anda 1.4

Buatlah kelompok diskusi kecil. Apakah Anda dan teman-teman dapat **memprediksi** gerak seperti apa yang dihasilkan oleh perpaduan dua buah gerak lurus berubah beraturan? Setelah selesai diskusi, kemukakan pendapat kelompok Anda di depan kelas.



Gambar 1.13

v adalah vektor resultan dari v_1 (kecepatan aliran sungai) dan v_2 (kecepatan perahu).

Kata Kunci

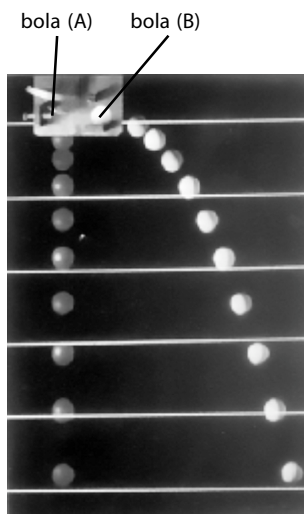
- arah vektor
- besar vektor
- jarak
- kecepatan
- kelajuan
- percepatan
- perpindahan
- posisi
- vektor satuan

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Sebuah partikel berpindah dari posisi \mathbf{r}_1 ke posisi \mathbf{r}_2 . Jika posisi $\mathbf{r}_1 = 4\mathbf{i} - 7\mathbf{j}$ dan posisi $\mathbf{r}_2 = 10\mathbf{i} + 3\mathbf{j}$, tentukanlah:
 - vektor perpindahannya; dan
 - besar perpindahannya.
- Sebuah partikel bergerak berdasarkan fungsi kecepatan $v(t) = at^2 + bt + c$ dengan v dalam m/s dan t dalam sekon. Jika konstanta $a = 3 \text{ m/s}^3$, $b = -2 \text{ m/s}^2$, dan $c = 5 \text{ m/s}$, tentukanlah:
 - percepatan rata-rata partikel untuk selang waktu $t = 1$ sekon sampai $t = 5$ sekon;
 - percepatan awal partikel; dan
 - percepatan partikel pada saat $t = 5$ sekon.
- Persamaan gerak sebuah partikel dinyatakan oleh fungsi $x = \frac{1}{10}t^3$ dengan x dalam meter dan t dalam sekon.
 - Hitunglah percepatan rata-rata dalam selang waktu $t = 3$ sekon sampai dengan $t = 4$ sekon.
 - Hitunglah kecepatan sesaat pada $t = 5$ sekon.
 - Hitunglah percepatan sesaat pada $t = 5$ sekon.
- Posisi sebuah benda dinyatakan oleh $\mathbf{r}(t) = (3t - 1)\mathbf{i} + (2t^2 + 1)\mathbf{j}$, dengan \mathbf{r} dalam meter dan t dalam sekon.
 - Tentukan vektor posisi dan jarak benda dari titik asal pada saat $t = 2$ sekon.
 - Tentukan perpindahan dan kecepatan rata-rata benda dalam selang waktu 1 sekon sampai dengan 3 sekon.
 - Turunkan persamaan umum kecepatan benda.
 - Tentukan kelajuan benda pada saat $t = 2$ sekon.
- Sebuah batu dilemparkan vertikal dengan persamaan $y(t) = 10t - 2t^2$ dengan y dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan:
 - besar percepatan batu; dan
 - tinggi maksimum yang dicapai batu.
- Sebuah roket bergerak pada bidang xy . Percepatan roket memiliki komponen $a_x = 5t^2 \text{ m/s}^2$ dan $a_y = (12 - 6t) \text{ m/s}^2$ dengan t dalam sekon. Pada saat $t = 0$, roket berada di titik pusat koordinat $(0, 0)$ dengan komponen kecepatan awal $v_{0x} = 4 \text{ m/s}$ dan $v_{0y} = 5 \text{ m/s}$ sehingga secara vektor dituliskan $\mathbf{v}_0 = (4\mathbf{i} + 5\mathbf{j}) \text{ m/s}$.
 - Nyatakan vektor kecepatan dan posisi sebagai fungsi dari waktu.
 - Berapa tinggi maksimum yang dicapai roket?
 - Berapa jarak terjauh yang dicapai roket?

B. Gerak Parabola



Sumber: *Physics for Scientist & Engineers*, 2000

Gambar 1.14

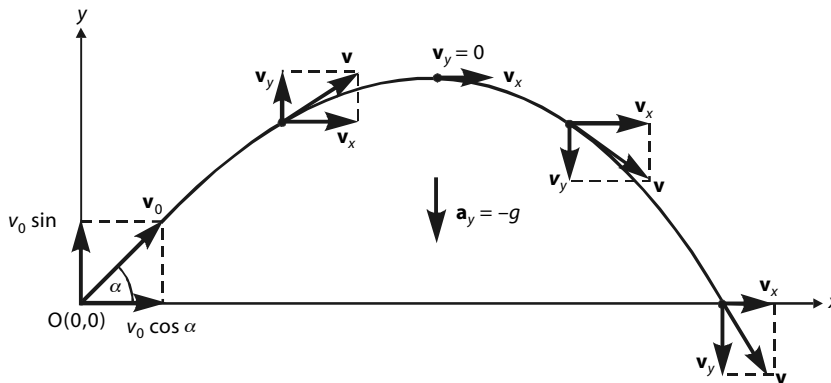
Dua buah bola dilepaskan dari ketinggian yang sama dengan perlakuan yang berbeda.

Tahukah Anda yang dimaksud dengan gerak parabola? Menurut Galileo, gerak parabola dapat dipandang sebagai hasil perpaduan gerak lurus beraturan pada sumbu horizontal (sumbu- x) dan gerak lurus berubah beraturan pada sumbu vertikal (sumbu- y) secara terpisah. Setiap gerak tidak saling memengaruhi. Gabungan dari kedua gerak tersebut berupa gerak parabola. Gerak parabola disebut juga sebagai gerak peluru. Dalam kehidupan sehari-hari, hal tersebut dapat Anda jumpai, misalnya ketika Anda menendang bola dengan sudut tendangan tertentu atau $< 90^\circ$ terhadap bidang horizontal maka lintasan gerak bola akan berbentuk parabola.

Perhatikan **Gambar 1.14**, dua buah bola dilepaskan dari ketinggian tertentu. Bola A dilepaskan dari keadaan diam. Dalam hal ini, gerak bola A adalah gerak jatuh bebas, yang dipengaruhi oleh percepatan gravitasi Bumi. Pada saat yang bersamaan, bola B diberi gaya horizontal dengan pegas. Lintasan bola B seperti pada **Gambar 1.14** berupa parabola. Pada awalnya, kedua bola terletak pada ketinggian yang sama, kemudian dilepaskan pada saat yang sama. Dapatkah Anda menebak bola mana yang menyentuh tanah lebih cepat?

Ternyata, waktu yang dibutuhkan oleh kedua bola hingga menyentuh tanah adalah sama. Dengan demikian, kecepatan mendarat akibat adanya gaya terhadap bola B tidak menjadikan bola A menyentuh tanah lebih cepat. Gerak benda yang sering dijadikan sebagai contoh gerak parabola adalah gerak peluru yang arahnya membentuk sudut elevasi tertentu terhadap permukaan Bumi.

Perhatikan gambar berikut.



Gambar 1.15

Lintasan gerak parabola. Nilai a selalu negatif karena ditetapkan arah positif adalah arah ke atas, dan arah gravitasi selalu ke bawah.

Pada **Gambar 1.15** terlihat kecepatan pada sumbu- x , yaitu v_x dengan arah dan besarnya selalu konstan. Adapun kecepatan pada sumbu- y , yaitu v_y , arah dan besarnya dipengaruhi oleh percepatan gravitasi g . Vektor resultan kecepatan v setiap saat di koordinat (x, y) merupakan resultan dari komponen vektor v_x dan v_y .

Jika besar kecepatan awal peluru adalah v_0 , besar kecepatan dalam arah sumbu- x adalah v_x , dan besar kecepatan pada sumbu- y adalah v_y , diperoleh persamaan-persamaan berikut ini.

1. Persamaan pada sumbu- x :

Besar kecepatan pada sumbu- x adalah

$$v_x = v_0 \cos \alpha \quad (1-28)$$

Jarak pada sumbu- x adalah

$$x = v_0 \cos \alpha t \quad (1-29)$$

2. Persamaan pada sumbu- y :

Besar kecepatan pada sumbu- y dengan $a = -g$ adalah

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt \quad (1-30)$$

Jarak pada sumbu- y adalah

$$y = v_0 \sin \alpha t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (1-31)$$

Keterangan:

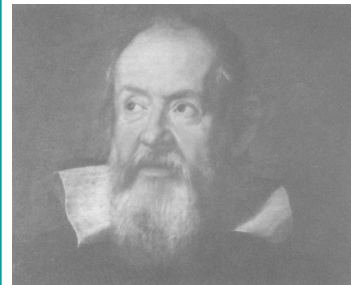
- v_y = besar kecepatan pada sumbu- y (m/s)
- v_x = besar kecepatan pada sumbu- x (m/s)
- v_0 = besar kecepatan awal (m/s)
- g = besar percepatan gravitasi (m/s²)
- α = sudut elevasi
- x = jarak tempuh mendatar (m)
- y = jarak tempuh vertikal (m)

Berdasarkan persamaan-persamaan tersebut, dapat disimpulkan bahwa komponen gerak pada sumbu- y (vertikal) sangat dipengaruhi oleh percepatan gravitasi Bumi, sedangkan besar kecepatan dalam arah mendatar selalu tetap. Gerak pada sumbu- y adalah gerak lurus berubah beraturan dan sumbu- x adalah gerak lurus beraturan.



Tokoh

Galileo Galilei
(1564–1642)



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Galileo Galilei lahir di kota Pisa, Italia, pada 15 Februari 1564. Ia belajar kedokteran di Universitas Pisa. Oleh karena ia lebih tertarik dengan ilmu alam, ia tidak melanjutkan belajar kedokterannya, tetapi belajar matematika. Ia meninggalkan Pisa untuk belajar di Universitas Padua. Ia adalah pendukung teori Heliosentris yang menyatakan bahwa Matahari adalah pusat tata surya. Penemuan Galileo yang terkenal adalah teleskop dan menemukan pegunungan di Bulan serta satelit di Jupiter. Oleh karena hobinya mengamati benda-benda langit termasuk Matahari, ia menderita kebutaan pada usia 74 tahun. Ia meninggal dunia 4 tahun kemudian pada usia 78 tahun.

Contoh 1.13

Seorang siswa melempar bola dengan kecepatan 10 m/s pada arah yang membentuk sudut 53° terhadap tanah ($\sin 53 = 0,8$). Tentukan:

- besar kecepatan bola setelah 0,5 s; dan
- besar kedudukan bola setelah 0,5 s jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 .

Jawab:

Diketahui:

$$v_0 = 10 \text{ m/s}$$

$$\alpha = 53^\circ$$

$$\sin \alpha = \sin 53^\circ = 0,8$$

$$\cos \alpha = 0,6$$

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

- a. Besar komponen kecepatan pada saat $t = 0$ sekon adalah

$$\begin{aligned} v_{0x} &= v_0 \cos \alpha & v_{0y} &= v_0 \sin \alpha \\ &= (10 \text{ m/s})(0,6) = 6 \text{ m/s} & &= (10 \text{ m/s})(0,8) = 8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Besar kecepatan pada saat $t = 0,5$ sekon adalah

$$v_{tx} = v_{0x} = 6 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} v_{ty} &= v_{0y} - gt \\ &= 8 \text{ m/s} - (10 \text{ m/s}^2)(0,5 \text{ s}) = 3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$v_t = \sqrt{v_{tx}^2 + v_{ty}^2} = \sqrt{(6 \text{ m/s})^2 + (3 \text{ m/s})^2} = \sqrt{45} = 6,71 \text{ m/s}$$

Jadi, besar kecepatan bola saat $t = 0,5$ s adalah 6,71 m/s.

- b. Kedudukan bola saat $t = 0,5$ sekon adalah

$$\begin{aligned} x &= v_{0x} t \\ &= (6 \text{ m/s})(0,5 \text{ s}) = 3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \\ &= (8 \text{ m/s})(0,5 \text{ s}) - \frac{1}{2} (10 \text{ m/s}^2)(0,5 \text{ s})^2 = (4 - 1,25) \text{ m} = 2,75 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, kedudukan bola pada saat $t = 0,5$ s adalah pada koordinat (3 m; 2,75 m).

1. Tinggi Maksimum dan Jarak Terjauh

Untuk menentukan tinggi maksimum dan jarak terjauh yang dapat dicapai oleh benda yang bergerak dengan lintasan parabola, perlu ditentukan dahulu waktu yang diperlukan untuk mencapai titik tertinggi dan jarak terjauhnya.

a. Waktu untuk Mencapai Tinggi Maksimum

Ketika mencapai tinggi maksimum, besar kecepatan benda yang bergerak parabola pada arah vertikal sama dengan nol, $v_y = 0$. Artinya, benda sempat berhenti beberapa saat sebelum akhirnya turun. Jadi, waktu tempuh benda saat mencapai tinggi maksimum adalah

$$v_y = v_0 \sin \alpha - g t$$

$$0 = v_0 \sin \alpha - g t$$

$$t_{y \text{ maks}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \quad (1-32)$$

b. Waktu untuk Mencapai Jarak Terjauh

Pada gerak parabola, arak terjauh adalah jarak yang ditempuh benda saat kembali ke permukaan tanah. Pada kondisi tersebut, jarak menurut sumbu-y = 0 dan jarak menurut sumbu-x adalah maksimum. Oleh karena itu, digunakan kondisi kedua, yaitu $y = 0$. Jadi, waktu untuk mencapai jarak terjauh adalah

$$y = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2$$

$$0 = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2$$

$$t_{x \text{ maks}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \quad (1-33)$$

c. Tinggi Maksimum

Tinggi maksimum yang dapat dicapai oleh benda yang melakukan gerak parabola dapat dicari dengan menggunakan waktu untuk mencapai tinggi maksimum ke persamaan gerak dalam sumbu-y. Dengan melakukan substitusi **Persamaan (1-31)** ke dalam **Persamaan (1-30)** diperoleh tinggi maksimum sebagai berikut.

$$y_{\text{maks}} = v_0 \sin \alpha \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right) - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2$$

$$= \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} - \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

$$y_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad (1-34)$$

d. Jarak Terjauh pada Sumbu-x

Dengan melakukan substitusi **Persamaan (1-33)** ke dalam **Persamaan (1-29)** maka diperoleh jarak terjauh pada sumbu-x sebagai berikut.

$$x_{\text{maks}} = v_0 \cos \alpha t_{x \text{ maks}}$$

$$= v_0 \cos \alpha \left(\frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \right)$$

$$= \frac{v_0^2 (2 \sin \alpha \cos \alpha)}{g}$$

$$x_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} \quad (1-35)$$

2. Jarak Terjauh dan Pasangan Sudut Elevasi

Perhatikan **Gambar 1.16** yang menunjukkan grafik lintasan parabola yang ditempuh sebuah benda dengan kelajuan awal yang sama, tetapi dengan sudut-sudut elevasi yang berbeda. Anda dapat menyimpulkan bahwa pasangan sudut elevasi yang berjumlah 90° , yaitu 75° dan 15° , serta 60° dan 30° akan menghasilkan jarak terjauh yang sama. Pada gambar tersebut terlihat bahwa jarak terjauh mencapai harga maksimum untuk sudut elevasi 45° . Berdasarkan persamaan-persamaan gerak parabola, jarak terjauh diperoleh jika $\sin 2\alpha = 1$ atau $\alpha = 45^\circ$.

Contoh 1.14

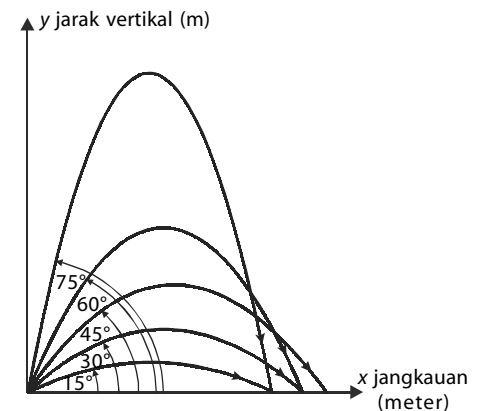
Sebuah benda dilepaskan dari pesawat terbang yang sedang terbang mendatar dengan kecepatan 40 m/s dan berada pada ketinggian 500 m di atas tanah. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah:

- waktu yang diperlukan benda hingga tiba di tanah;
- jarak mendatar jatuhnya benda; dan
- kecepatan benda sebelum menyentuh tanah.



Tantangan untuk Anda

Apakah tendangan bebas yang biasa dilakukan oleh pemain sepakbola seperti David Beckham termasuk gerak parabola?



Gambar 1.16

Grafik lintasan sebuah benda dengan sudut elevasi berbeda dan kecepatan awal yang sama.



Tantangan untuk Anda

Buktikan bahwa jika kecepatan awalnya sama, pasangan sudut elevasi yang hasil jumlahnya 90° akan menghasilkan jarak terjauh yang sama. Kemudian, apakah waktu tempuh keduanya sama?



Jawab:

- a. Gerak vertikal benda sama dengan gerak jatuh bebas.

$$v_{0y} = 0$$

$$y = -\frac{1}{2} g t^2$$

$$500 \text{ m} = \left(\frac{1}{2}\right) (10 \text{ m/s}^2) (t^2)$$

$$500 \text{ m} = 5 t^2 \text{ m/s}^2$$

$$t = 10 \text{ s}$$

Jadi, benda tiba di tanah setelah 10 sekon.

- b. Jarak mendarat diperoleh melalui persamaan

$$x = v_x t$$

$$= (40 \text{ m/s}) (10 \text{ s})$$

$$= 400 \text{ m}$$

Jadi, jarak mendarat benda 400 m.

- c. Kecepatan benda sebelum menyentuh tanah dapat diperoleh dengan rumus vektor resultan kecepatan, yaitu

$$v_x = 40 \text{ m/s}$$

$$v_y = -g t = (10 \text{ m/s}^2) (10 \text{ s}) = -100 \text{ m/s}$$

$$v_B = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$= \sqrt{(40 \text{ m/s})^2 + (-100 \text{ m/s})^2}$$

$$= 107,7 \text{ m/s}$$

Jadi, besar kecepatan benda sebelum menyentuh tanah 107,7 m/s.

Contoh 1.15

Dua buah peluru dengan jangkauan R membutuhkan waktu t_1 dan t_2 untuk mencapai ketinggian semula (peluru kembali ke tanah). Buktikan bahwa $t_1 t_2 = \frac{2R}{g}$.

Jawab:

$$R = v \cos \theta t \text{ atau } \cos \theta = \frac{R}{vt}$$

$$t = \frac{(2v \sin \theta)}{g} \text{ atau } \sin \theta = \frac{gt}{2v}$$

Dengan memasukkan harga $\sin \theta$ dan $\cos \theta$ pada rumus $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$,

Anda akan memperoleh $g^2 t^4 - 4v^2 t^2 + 4R^2 = 0$.

Untuk mendapatkan nilai t_1 dan t_2 , Anda harus mencari nilai akar-akar persamaan tersebut dengan menggunakan rumus berikut:

$$t_{1,2}^2 = \frac{-(-4v^2) \pm \sqrt{(-4v^2)^2 - 4g^2(4R^2)}}{2g^2}; a = g^2; b = -4v^2; c = 4R^2$$

$$t_1^2 = \frac{2v^2 + \sqrt{-4v^4 - 4g^2R^2}}{g^2}$$

$$t_2^2 = \frac{2v^2 + \sqrt{-4v^4 - 4g^2R^2}}{g^2}$$

$$t_1^2 t_2^2 = \left[\frac{4v^4 - (4v^4 - 4g^2R^2)}{g^4} \right]$$
$$= \frac{4g^2R^2}{g^4} = \frac{4R^2}{g^2}$$

$$t_1 t_2 = \frac{2R}{g} \text{ (terbukti)}$$



Ingatlah

Untuk mencari nilai akar-akar dari $y = ax^2 + bx + c$ digunakan rumus abc berikut ini.

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$



Contoh 1.16

Sebuah peluru ditembakkan dengan sudut elevasi 30° . Tentukan perbandingan antara tinggi maksimum dan jarak terjauh yang dicapai peluru.

Jawab:

Dari persamaan tinggi maksimum (h_m) dan jarak horizontal terjauh (x_m), diperoleh

$$\begin{aligned}h_m : x_m &= \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} : \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g} \\&= \frac{\sin^2 \alpha}{2} : \sin 2\alpha \\&= \frac{\sin^2 30^\circ}{2} : \sin 60^\circ \\&= \left(\frac{1}{2}\right)^2 : \frac{1}{2}\sqrt{3} = \frac{1}{8} : \frac{1}{2}\sqrt{3} = 1 : 4\sqrt{3}\end{aligned}$$

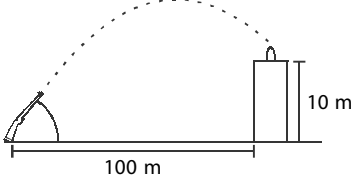
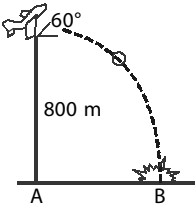
Jadi, perbandingannya adalah $1 : 4\sqrt{3}$.

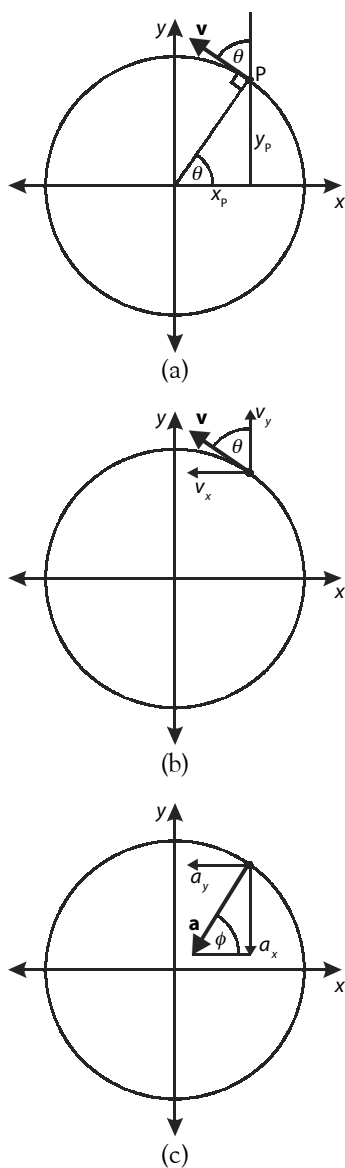
Kata Kunci

- jarak terjauh
- sudut elevasi
- tinggi maksimum

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Sebuah benda dilemparkan dengan sudut elevasi 53° dan kecepatan awalnya 10 m/s. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ tentukanlah:
 - waktu tempuh benda di udara;
 - tinggi maksimum yang dicapai; dan
 - jarak mendatar terjauh.
- Buktikan bahwa benda yang dilemparkan dengan sudut elevasi α akan mencapai titik terjauh jika $\alpha = 45^\circ$.
- Sebuah benda dilemparkan dengan sudut elevasi 60° dan kecepatan 10 m/s. Hitung besar dan arah kecepatan setelah:
 - $\frac{1}{2}\sqrt{3}$ sekon; dan
 - $\sqrt{3}$ sekon.
- Posisi burung terletak pada koordinat (50, 8)m. Seorang anak melontarkan batu dengan menggunakan katepelnya pada sudut elevasi 37° ke arah burung. Berapakah kecepatan yang harus diberikan agar batu mengenai burung tersebut?
- Dalam permainan sepakbola, Putu menendang bola dengan sudut elevasi α sehingga mencapai ketinggian maksimum 10 meter. Berapa lama bola harus ditunggu hingga tiba kembali di tanah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)?
- Sebuah sasaran terletak pada jarak 100 m dan pada ketinggian 10 m. Berapa sudut elevasi peluru agar tembakannya tepat mengenai sasaran jika kecepatan awalnya 60 m/s?
- Sebuah sasaran terletak pada koordinat (80, 20)m. Seseorang melemparkan batu dengan sudut 53° ke arah sasaran tersebut dari pusat koordinat. Berapakah kecepatan yang harus diberikan agar batu itu tepat mengenai sasaran?
- Sebuah pesawat tempur bergerak dengan kecepatan 100 m/s dan arahnya membentuk sudut 60° dengan bidang datar. Ketika berada pada ketinggian 800 m dari A (arah vertikal), sebuah bom dilepaskan dari pesawat tersebut. Jika bom jatuh di titik B, tentukan jarak AB.



Gambar 1.17

- Sebuah partikel bergerak melingkar.
- Posisi dan kecepatan partikel pada saat tertentu.
 - Komponen-komponen vektor kecepatan.
 - Percepatan gerak partikel dan komponen-komponennya.

C. Gerak Melingkar

Di Kelas X, Anda telah mempelajari gerak melingkar beraturan. Pada subbab ini akan dibahas gerak melingkar secara umum dengan menggunakan kaidah vektor. Perhatikan **Gambar 1.17(a)**. Sebuah partikel bergerak melingkar pada bidang xy dengan jari-jari r terhadap pusat koordinat. Anda tentu telah mengetahui bahwa dalam gerak melingkar vektor kecepatan gerak partikel \mathbf{v} selalu menyinggung lintasan gerak partikel dan tegak lurus jari-jari lintasan partikel.

Di titik P , vektor kecepatan \mathbf{v} membentuk sudut θ terhadap garis vertikal dan besarnya sama dengan sudut θ yang dibentuk oleh jari-jari \mathbf{r} dan sumbu x . Oleh karena itu, komponen vektor \mathbf{v} dinyatakan dengan persamaan

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

$$\mathbf{v} = (-v \sin \theta) \mathbf{i} + (v \cos \theta) \mathbf{j} \quad (1-36)$$

Adapun posisi partikel pada bidang xy dinyatakan dengan persamaan

$$\mathbf{r} = x_p \mathbf{i} + y_p \mathbf{j} \quad (1-37)$$

Dengan demikian vektor kecepatan \mathbf{v} dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\mathbf{v} = \left(-\frac{vy_p}{r} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{vx_p}{r} \right) \mathbf{j} \quad (1-38)$$

Anda tentu mengetahui bahwa persamaan gerak partikel didapatkan dari turunan pertama persamaan kecepatan atau turunan kedua persamaan posisi partikel. Oleh karena itu, persamaan percepatan linear dalam gerak melingkar dinyatakan dengan persamaan

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left(-\frac{v}{r} \frac{dy_p}{dt} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{v}{r} \frac{dx_p}{dt} \right) \mathbf{j} \quad (1-39)$$

Dari **Persamaan (1-39)**, nilai $\frac{dy_p}{dt}$ merupakan komponen kecepatan dalam arah sumbu- y dan $\frac{dx_p}{dt}$ merupakan komponen kecepatan dalam arah sumbu- x . Perhatikan **Gambar 1.17(b)**. Dari gambar tersebut, Anda akan mengetahui bahwa $v_x = -v \sin \theta$ dan $v_y = v \cos \theta$. Dengan demikian, **Persamaan (1-39)** dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\mathbf{a} = \left(-\frac{v^2}{r} \cos \theta \right) \mathbf{i} + \left(-\frac{v^2}{r} \sin \theta \right) \mathbf{j} \quad (1-40)$$

Vektor percepatan dan komponen vektor percepatan dalam gerak melingkar ditunjukkan oleh **Gambar 1.17(c)**, sedangkan besar vektor percepatan dinyatakan dengan persamaan

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \frac{v^2}{r} \sqrt{(\cos \theta)^2 + (\sin \theta)^2} = \frac{v^2}{r} \quad (1-41)$$

Untuk menentukan arah \mathbf{a} , dapat Anda tentukan melalui sudut ϕ , seperti ditunjukkan **Gambar 1.17(c)**.

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

Jadi, $\phi = \theta$, artinya percepatan \mathbf{a} arahnya sepanjang jari-jari r menuju pusat lingkaran (**Gambar 1.17(c)**). Percepatan tersebut dinamakan *percepatan sentripetal*.

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Sebuah partikel bergerak melingkar dengan kecepatan konstan dalam bidang xy . Ketika partikel berada di posisi $x = -2$ m, kecepatannya $-(4 \text{ m/s})\mathbf{j}$. Tentukanlah kecepatan dan percepatan partikel pada posisi $y = 2$ m.
- Sebuah satelit Bumi bergerak pada orbitnya yang berjarak 640 km di atas permukaan Bumi dengan periode 98 menit. Tentukanlah kecepatan dan besar percepatan sentripetal dari satelit tersebut.
- Seorang astronaut bergerak dalam lintasan melingkar berjari-jari 5 m.
 - Tentukan kecepatan gerak astronaut jika besar percepatan sentripetalnya $7,0g$.
 - Berapakah jumlah putaran yang dihasilkan berdasarkan percepatan tersebut?
 - Tentukan periode dari gerak astronaut tersebut.

Rangkuman

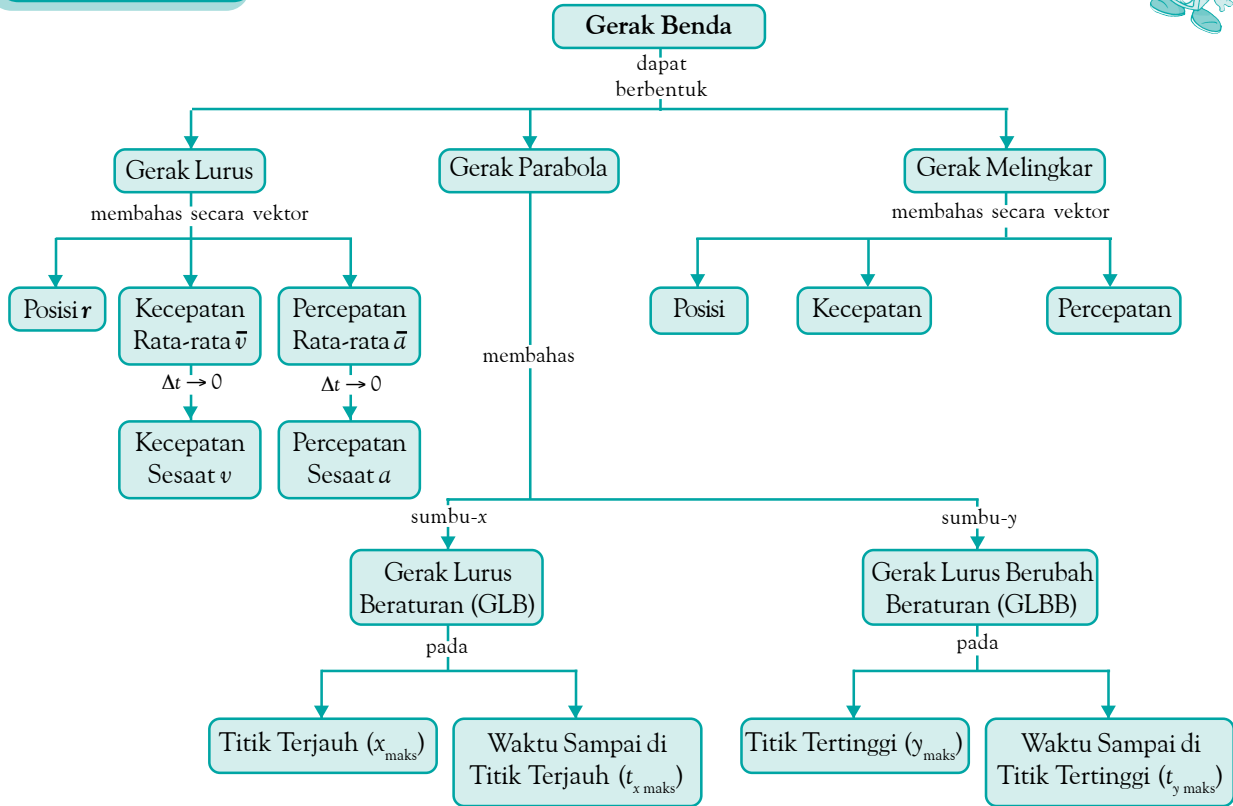
- Vektor posisi \mathbf{r} menunjukkan posisi partikel dari titik asal ke posisi partikel tersebut, yaitu
$$\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j}$$
Perpindahan merupakan perubahan vektor posisi $\Delta \mathbf{r}$ selama selang waktu Δt .
$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j}$$
dengan $\Delta x = x_2 - x_1$ dan $\Delta y = y_2 - y_1$
- Kecepatan rata-rata adalah besarnya perpindahan dalam selang waktu tertentu.
$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{t_2 - t_1}$$
Kecepatan sesaat adalah kecepatan rata-rata untuk selang waktu Δt mendekati nol.
$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$
Vektor posisi dapat ditentukan dari kecepatan sesaat dengan cara integrasi.
$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int \mathbf{v} dt$$
dengan \mathbf{r}_0 adalah vektor posisi pada $t = 0$.
- Percepatan rata-rata adalah perubahan kecepatan dalam setiap satuan waktu.
$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{t_2 - t_1}$$
Percepatan sesaat adalah percepatan rata-rata untuk selang waktu Δt mendekati nol.
$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{a}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$
Kecepatan sesaat dapat ditentukan dari percepatan sesaat dengan cara integrasi.
$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \int \mathbf{a} dt; \text{ dengan } \mathbf{v}_0 \text{ adalah kecepatan pada saat } t = 0.$$
- Gerak parabola merupakan perpaduan dari GLB pada sumbu- x dan GLBB pada sumbu- y sehingga
$$v_x = v_{0x} = \text{tetap, dan } x = v_{0x} t$$

$$v_y = v_{0y} + a_y t, \text{ dan } y = v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2$$
dengan $a_y = -g$
- Pada gerak parabola, titik tertinggi dicapai pada saat $v_y = 0$. Dengan memasukkan syarat ini, dapat ditentukan
$$t_{y \text{ maks}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

$$y_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$
- Titik paling jauh dicapai pada saat $y = 0$. Dengan menggunakan sifat simetri parabola, diperoleh
$$t_{x \text{ maks}} = 2t_{y \text{ maks}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

$$x_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$
- Pada gerak melingkar, besar percepatan sentripetal dinyatakan dengan persamaan
$$|\mathbf{a}| = \frac{v^2}{r}$$
Adapun sudut yang dibentuk arah vektor percepatan sentripetal dinyatakan dengan persamaan
$$\tan \phi = \frac{a_y}{a_x}$$
Percepatan sentripetal adalah percepatan gerak partikel yang bergerak melingkar dan arahnya menuju ke pusat lingkaran.

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu dapat membedakan antara besaran vektor dan besaran skalar yang ada pada konsep gerak. Anda juga dapat menentukan persamaan besaran fisika dari persamaan yang diketahui dengan menggunakan operasi integral dan diferensial. Dari materi bab ini, bagian manakah yang Anda anggap sulit?

Dengan mempelajari bab ini, Anda dapat menentukan bentuk lintasan gerak suatu benda. Pada gerak parabola, titik terjauh dan titik tertinggi dapat ditentukan dari persamaan gerak dan waktunya. Nah, sekarang coba Anda sebutkan manfaat lain mempelajari bab ini.

Tes Kompetensi Bab 1

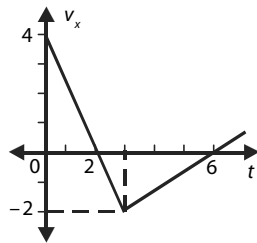
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

- Pada saat $t_1 = 0$, seekor burung memiliki posisi di koordinat (4 m, 2 m) dan pada saat $t_2 = 4$ s memiliki koordinat (8 m, 5 m). Dalam selang waktu tersebut, besar kecepatan rata-rata burung adalah
 - 1,25 m/s
 - 1,50 m/s
 - 2,25 m/s
 - 2,50 m/s
 - 5,00 m/s
- Persamaan vektor posisi sebuah materi dinyatakan dengan $\mathbf{r} = (t^3 - 2t^2)\mathbf{i} + (3t^2)\mathbf{j}$. Jika satuan \mathbf{r} dalam meter dan t dalam sekon, besar percepatan materi tepat setelah 2 sekon dari awal pengamatan adalah
 - 2 m/s²
 - 4 m/s²
 - 6 m/s²
 - 8 m/s²
 - 10 m/s²

(Ebtanas 1998)

- Sebuah peluru yang ditembakkan dengan sudut elevasi tertentu memiliki persamaan vektor posisi $\mathbf{r} = 30t\mathbf{i} + (30\sqrt{3}t - 5t^2)\mathbf{j}$ dengan t dalam sekon dan \mathbf{r} dalam meter. Jarak terjauh yang dapat dicapai oleh peluru dalam arah sumbu- x adalah
 - 135 m
 - $180\sqrt{3}$ m
 - 180 m
 - 270 m
 - $135\sqrt{3}$ m
- Posisi sebuah benda yang dilemparkan vertikal ke atas dinyatakan dengan persamaan $y = 40t - 5t^2$, dengan y dalam meter dan t dalam sekon. Kecepatan awal dan tinggi maksimum yang dapat dicapai benda masing-masing adalah
 - 5 m/s dan 40 m
 - 10 m/s dan 80 m
 - 20 m/s dan 40 m
 - 40 m/s dan 80 m
 - 80 m/s dan 160 m

- Perhatikan gambar berikut.



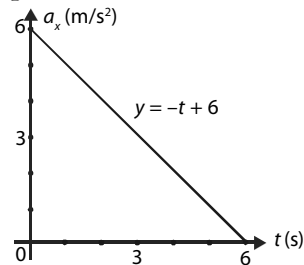
Sebuah partikel yang bergerak sepanjang sumbu- x memiliki grafik kecepatan v_x terhadap waktu seperti tampak pada gambar tersebut. Jika pada saat $t = 1$ sekon partikel berada pada $x = 3$ m, posisi partikel pada saat $t = 6$ sekon berada pada

- $x = -2$ m
 - $x = +2$ m
 - $x = +1$ m
 - $x = -1$ m
 - $x = 0$ m
- Sebuah partikel bergerak lurus dari keadaan diam dengan persamaan percepatan $a = (t + 2)^2$. Besar kecepatan partikel setelah 2 sekon adalah

- 18,7 m/s
- 17 m/s
- 16 m/s
- 15 m/s
- 14 m/s

- Sebuah partikel bergerak sepanjang sumbu- x dengan besar percepatan $a = 0,5t$, dengan a dalam m/s². Jika pada saat $t = 0$, kecepatan 4 m/s, kecepatan partikel pada saat $t = 2$ s adalah
 - 2 m/s
 - 4 m/s
 - 5 m/s
 - 7 m/s
 - 9 m/s
- Sebuah partikel bermuatan listrik mula-mula bergerak lurus dan memiliki kecepatan 100 m/s. Partikel mengalami percepatan yang dinyatakan dengan persamaan $a = (2 - 10t)$ m/s² dengan t adalah waktu lamanya gaya listrik bekerja. Kecepatan partikel setelah gaya bekerja selama 4 sekon adalah
 - 24 m/s
 - 28 m/s
 - 32 m/s
 - 36 m/s
 - 40 m/s

- Perhatikan grafik berikut.



Pada saat $t = 0$, sebuah partikel berada pada $x = 3$ m dan bergerak dengan kecepatan awal 15 m/s dengan arah sumbu- x positif. Percepatan partikel berubah terhadap waktu seperti tampak pada gambar. Posisi benda pada $t = 6$ sekon adalah

- 175 m
- 165 m
- 150 m
- 138 m
- 129 m

- Perahu motor jika bergerak searah dengan arah arus sungai memiliki kelajuan 7 m/s, dengan kecepatan arus sungai 3 m/s. Jika bergerak tegak lurus terhadap arah arus, perahu mungkin hanya mampu bergerak dengan kelajuan
 - 3 m/s
 - 4 m/s
 - 5 m/s
 - 6 m/s
 - 7 m/s

- Perahu motor memerlukan waktu 10 menit untuk menyeberangi danau yang lebarnya 400 meter (danau tidak berarus). Waktu yang dibutuhkan perahu untuk menyeberangi danau jika di danau timbul arus air berkecepatan 30 meter/menit tegak lurus terhadap arah perahu adalah

- a. 5 menit d. 12,5 menit
b. 8 menit e. 15 menit
c. 10 menit
12. Perbandingan antara jarak tembakan dua buah peluru yang ditembakkan dari sebuah senapan dengan sudut elevasi 30° dan 60° adalah
a. $\sqrt{3} : 1$ d. $1 : 2$
b. $1 : \sqrt{3}$ e. $2 : 3$
c. $1 : 1$
13. Sebuah bola ditendang mengikuti gerak parabola. Jika tinggi maksimum yang dapat dicapai adalah 45 m, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, waktu yang diperlukan oleh bola selama di udara adalah
a. 3 sekon d. 10 sekon
b. 6 sekon e. 12 sekon
c. 8 sekon
14. Peluru ditembakkan dari tanah datar dengan kecepatan awal 40 m/s. Sudut elevasi α ($\tan \alpha = \frac{4}{3}$) dan percepatan gravitasi 10 m/s^2 . Besar kecepatan peluru setelah 2 sekon dari tembakan adalah
a. $6\sqrt{5} \text{ m/s}$ d. $12\sqrt{3} \text{ m/s}$
b. 12 m/s e. 24 m/s
c. $12\sqrt{5} \text{ m/s}$
15. Sebuah batu dilempar dengan kecepatan awal 10 m/s pada sudut elevasi α ($\cos \alpha = \frac{3}{5}$) dan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Pada suatu saat, kecepatan batu ke arah sumbu-y adalah 3 m/s. Ketinggian batu pada saat tersebut adalah
a. 2,75 m d. 4,00 m/s
b. 3,25 m/s e. 4,25 m/s
c. 3,75 m/s
16. Dua peluru ditembakkan dari sebuah senapan. Jarak tembakan akan sama jika sudut elevasinya
- a. 15° dan 60° d. 37° dan 53°
b. 30° dan 45° e. 35° dan 75°
c. 40° dan 60°
17. Sebuah peluru ditembakkan dengan sudut elevasi 60° dan kecepatan awalnya 400 m/s. Setelah mencapai titik puncak, kecepatan peluru menjadi
a. 0 d. 50 m/s
b. 25 m/s e. 100 m/s
c. 40 m/s
18. Pesawat pembom terbang rendah 500 m dari atas permukaan tanah dengan kecepatan 360 km/jam. Pesawat tersebut melepaskan sebuah bom. Jarak horizontal yang ditempuh oleh bom sebelum tiba di tanah adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
a. 100 m d. 800 m
b. 400 m e. 1.000 m
c. 500 m
19. Pada gerak parabola, di titik puncak
a. percepatan benda adalah nol
b. kecepatan benda adalah nol
c. percepatan dan kecepatan benda tidak adalah nol
d. kecepatan benda sesaat adalah nol
e. kelajuan benda arah horizontal adalah nol
(SIPENMARU 1984)
20. Benda A dan B dijatuhkan dari ketinggian yang sama secara bersamaan. Akan tetapi, benda A dijatuhkan secara bebas, dan benda B dijatuhkan secara horizontal dengan kecepatan awal. Waktu yang dibutuhkan kedua benda untuk mencapai tanah adalah (gesekan dengan udara diabaikan)
a. $t_A > t_B$ d. $t_A = \frac{1}{2} t_B$
b. $t_A < t_B$ e. $t_A = 2 t_B$
c. $t_A = t_B$

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Sebuah partikel bergerak dengan persamaan fungsi kecepatan $v(t) = at^2 + bt + c$ dengan v dalam m/s dan t dalam sekon. Jika $a = 3 \text{ m/s}^3$, $b = -2 \text{ m/s}^2$, dan $c = 5 \text{ m/s}$, tentukanlah:
a. percepatan rata-rata partikel untuk selang waktu $t = 1$ sekon sampai $t = 5$ sekon;
b. percepatan awal partikel; dan
c. percepatan partikel pada saat $t = 5$ sekon.
2. Persamaan gerak suatu partikel dinyatakan oleh fungsi $x = \frac{2}{9}t^4$, dengan x dalam meter dan t dalam sekon.
a. Tentukan kecepatan rata-rata dalam selang waktu $t = 2$ sekon sampai dengan $t = 3$ sekon.
b. Hitung kecepatan sesaat pada saat $t = 4$ sekon.
3. Peluru meriam ditembakkan dengan kecepatan awal 50 m/s dan sudut elevasi α dengan $\cos \alpha = \frac{4}{5}$. Jika percepatan gravitasi = 10 m/s^2 , tentukanlah:
a. kecepatan peluru meriam setelah 0,5 sekon;
b. posisi peluru meriam setelah 0,5 sekon;
c. tinggi maksimum; dan
d. jarak tembakan maksimum.
4. Sebuah peluru ditembakkan dari atap gedung yang tingginya 100 meter dengan kecepatan awal 50 m/s, condong ke atas dengan sudut elevasi α di mana $\cos \alpha = \frac{3}{5}$. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:
a. waktu yang dibutuhkan peluru untuk sampai di tanah; dan
b. jarak terjauh yang dicapai peluru dari dasar gedung saat mencapai tanah.
5. Pada permainan sepakbola, seorang anak menerima dan meneruskan bola dengan menggunakan kepala. Bola meninggalkan kepala anak tersebut dengan laju 4,75 m/s. Sudut elevasi terhadap horizontal adalah α dimana $\tan \alpha = \frac{4}{3}$. Jika bola sampai di tanah pada jarak 3,14 meter, berapa tinggi anak itu? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Bab 2



Sumber: F1 Racing, Mei 2003

Tikungan pada sirkuit balapan F1 dibuat kasar dan miring ke dalam agar pembalap dapat melintas dengan aman.

Gaya

Hasil yang harus Anda capai:

menganalisis gejala alam dan keteraturan dalam cakupan mekanika benda titik.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

- menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan hukum-hukum Newton;
- menganalisis pengaruh gaya pada sifat elastisitas bahan; dan
- menganalisis hubungan antara gaya dengan gerak getaran.

Grand Prix Formula 1 merupakan salah satu cabang olahraga yang cukup populer di dunia. Salah satu faktor yang membuat olahraga ini populer adalah karena olahraga ini menggunakan teknologi yang canggih. Sebagai contoh, ban yang digunakan oleh mobil Formula 1 memiliki ukuran lebar dan tinggi khusus. Jenis ban yang digunakan tidak boleh ban *slick* (polos), tetapi harus ban beralur. Selain itu, sirkuit harus menggunakan aspal yang khusus dan lintasan di setiap tikungan harus memiliki kemiringan tertentu.

Apakah Anda tahu alasan teknis diterapkannya teknologi tersebut? Peraturan tersebut didasarkan pada prinsip-prinsip Fisika yang akan Anda pelajari dalam bab ini. Selain itu, Anda pun akan belajar tentang gaya gravitasi, elastisitas dan gaya pegas, serta gerak harmonik sederhana.

- A. Gaya Gesek**
- B. Gaya Gravitasi**
- C. Elastisitas dan Gaya Pegas**
- D. Gerak Harmonik Sederhana**

Tes Kompetensi Awal

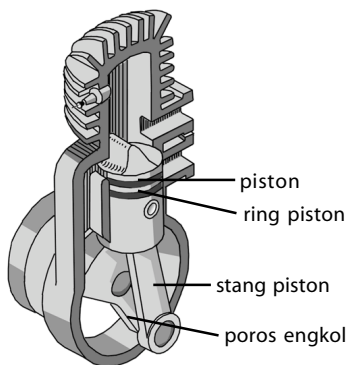
Sebelum mempelajari konsep Gaya, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Jika Anda menjatuhkan sebuah apel dan sebuah anggur dari ketinggian yang sama dalam ruang vacum, mengapa waktu jatuh kedua buah yang beratnya berbeda tersebut sama?
2. Mengapa terjadi pasang surut pada air laut?
3. Bagaimanakah konstanta pegas gabungan dari pegas-pegas yang disusun secara seri dan paralel?



Gambar 2.1

Ban mobil dibuat bergerigi untuk memperbesar gaya gesek sehingga mobil tidak slip.



Gambar 2.2

Gaya gesek pada mesin bersifat merugikan.



Gambar 2.3

Rem cakram pada sepeda motor menerapkan konsep gaya gesek.

A. Gaya Gesek

Pada umumnya, setiap benda yang bergerak mengalami gaya gesek. Gaya gesek timbul karena dua permukaan benda yang bersentuhan. Arah gaya gesek selalu berlawanan dengan arah gerak benda. Supaya lebih jelas, cobalah Anda tarik sebuah meja belajar di ruang kelas. Ketika menarik meja, Anda membutuhkan tenaga cukup besar. Semakin kasar permukaan lantai, semakin besar gaya tarik yang Anda keluarkan. Demikian pula sebaliknya. Jadi, besarnya gaya gesek antara lain ditentukan oleh kasar atau licinnya bidang yang bersinggungan. Arah gaya gesek (f) antara lantai dan kaki meja selalu berlawanan dengan arah gaya tarik sehingga tenaga untuk menarik meja tidak seluruhnya berguna untuk melakukan gerak, tetapi sebagian gaya tarik hilang untuk melawan gaya gesek.

Contoh lainnya adalah gaya gesek antara ban dengan jalan pada gerak kendaraan. Arah gaya gesek selalu berlawanan dengan arah gerak ban. Hal tersebut menyebabkan kendaraan tidak tergelincir ketika melewati lintasan yang naik atau turun. Perhatikan **Gambar 2.1**. Permukaan ban dibuat bergerigi agar ban tidak selip dan kendaraan dapat dengan mudah berhenti ketika kendaraan direm.

Gaya gesek pada dua bidang yang bersentuhan ada yang bersifat merugikan. Gesekan antara dinding silinder dengan piston (torak) yang bekerja terus-menerus, dapat menimbulkan keausan pada sisi luar piston. Perhatikan **Gambar 2.2**. Keausan pada piston menyebabkan efisiensi energi gerak yang dihasilkan menjadi rendah. Demikian juga gesekan antara stang piston dengan poros engkol menyebabkan poros engkol menjadi longgar. Untuk menghindari hal tersebut, bagian mesin yang bersentuhan dan saling bergesekan diberi minyak pelumas.

Dalam kasus lain, gesekan antara permukaan benda yang bersentuhan ada yang bersifat menguntungkan. Panjang dan kekasaran landasan pesawat terbang dirancang secara ideal agar pesawat dapat tinggal landas (*take-off*) dan mendarat di jalur landasan. Selain itu, gaya gesek pada rem sepeda dan kendaraan bermotor lainnya berguna untuk memperlambat laju sepeda motor saat pengereman dilakukan.

1. Gaya Gesek Statis dan Gaya Gesek Kinetik

Gaya gesek yang timbul pada benda yang sedang bergerak disebut gaya gesek kinetik (f_k), sedangkan gaya gesek pada benda diam atau benda yang tepat akan bergerak disebut gaya gesek statis (f_s). Untuk lebih jelasnya, pelajari uraian berikut.

a. Gaya Gesek Statis

Perhatikan **Gambar 2.4**. Sebuah balok yang memiliki berat w terletak di atas bidang datar kasar dan ditarik mendatar oleh gaya sebesar F . Gaya normal N dengan arah vertikal ke atas tegak lurus bidang sentuh memiliki nilai yang sama dengan gaya berat $w = mg$. Gesekan antara balok dengan bidang sentuh menyebabkan balok belum dapat bergerak ($F=f_s$). Gaya gesek yang mempertahankan balok tetap diam disebut gaya gesek statis. Jika besar gaya F mendatar pada balok diperbesar, pada saat yang sama gaya gesek statis pada lantai juga ikut naik. Hal tersebut terus berlangsung sampai balok dalam keadaan tepat akan bergerak atau f_s maksimum.

Menurut percobaan (empiris), gaya gesek statis maksimum antara dua permukaan kering tanpa pelumas memenuhi aturan berikut. Gaya gesek statis maksimum (f_s maksimum) sebanding dengan gaya normal (N) yang bekerja pada salah satu permukaan. Perbandingan antara besar gaya gesek statis maksimum dengan besar gaya normal disebut koefisien gesek statis (μ_s) antarkedua permukaan tersebut. Oleh karena itu, besar gaya gesek statis f_s dapat dituliskan

$$f_s \leq \mu_s N \tag{2-1}$$

Keterangan:

f_s = gaya gesek statis (N)

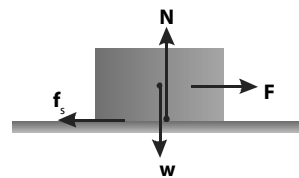
μ_s = koefisien gesek statis

N = besar gaya normal (N)

Tanda sama dengan (=) berlaku jika f_s bernilai maksimum.

Bagaimana mengetahui besarnya gaya normal N ? Perhatikan **Gambar 2.4**. Jika hanya ada besar gaya berat w dan tidak ada gaya lain pada arah sumbu vertikal, besar gaya normal N sama dengan besar gaya berat benda itu sendiri (ingat Hukum III Newton). Oleh karena itu, **Persamaan (2-1)** dapat dituliskan

$$f_s \leq \mu_s mg \tag{2-2}$$



Gambar 2.4

Gaya gesek statis f_s mempertahankan keadaan balok agar tetap diam.

Contoh 2.1

Sebuah balok bermassa 2 kg terletak di atas bidang datar kasar. Balok diberi gaya tarik F sebesar 4 N mendatar seperti pada gambar. Jika koefisien gesekan statis antara balok dan lantai 0,4, tentukan:

- besar gaya gesek statis maksimum; dan
- besar gaya gesek yang memengaruhi benda.

Jawab:

Diketahui:

$m = 2$ kg

$F = 4$ N

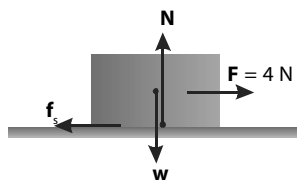
$\mu_s = 0,4$

$g = 10$ m/s²

$$\begin{aligned} \text{a. } f_{s \text{ maks}} &= \mu_s N = \mu_s mg \\ &= (0,4)(2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 8 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, gaya gesek statis maksimum pada balok adalah 8 N.

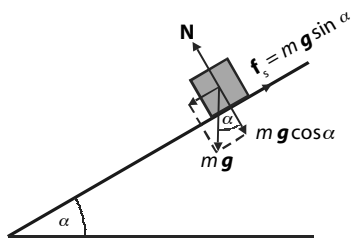
- Gaya luar yang memengaruhi benda hanya $F = 4$ N. Besar gaya tersebut lebih kecil daripada gaya gesek statis sehingga balok masih tetap diam. Dalam kasus ini, besarnya gaya gesek sama dengan besarnya gaya luar, $f_s - F = 4$ N. Jadi, gaya gesek statis yang berfungsi pada benda adalah sebesar 4 N.



Tantangan untuk Anda

Mengapa koefisien gesek (μ) tidak memiliki satuan?





Gambar 2.5

Sebuah balok tepat akan bergerak pada suatu bidang miring.

b. Koefisien Gaya Gesek Statis Benda pada Bidang Miring

Sebuah balok dengan berat w terletak di atas bidang miring kasar dengan sudut kemiringan α terhadap horizontal. Pada saat balok tepat akan bergerak, persamaan koefisien geseknya adalah sebagai berikut.

Besar gaya normal: $N = mg \cos \alpha$

Besar gaya gesek statis: $f_{s \text{ maks}} = mg \sin \alpha$

$$\mu_s = \frac{f_s}{N} = \frac{mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$

Jadi, koefisien gesek statis maksimum antara balok dengan bidang miring pada saat tepat akan bergerak adalah

$$\mu_s = \tan \alpha \quad (2-3)$$

c. Gaya Gesek Kinetik

Untuk memahami perbedaan antara gaya gesek statis f_s dan gaya gesek kinetik f_k , lakukanlah aktivitas berikut.



Aktivitas Fisika 2.1

Gaya Gesek

Tujuan Percobaan

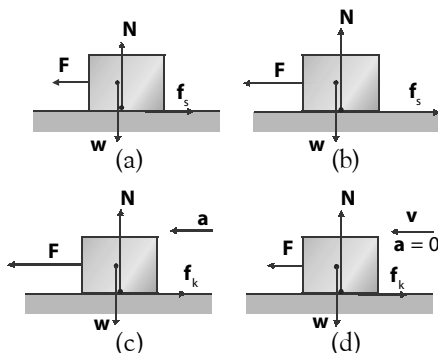
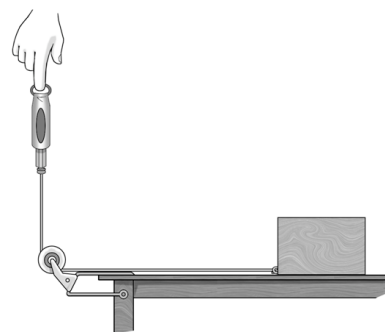
Membedakan antara gaya gesek statis dan gaya gesek kinetik

Alat-Alat Percobaan

1. Balok kayu
2. Katrol
3. Tali
4. Neraca pegas/Dinamometer

Langkah-Langkah Percobaan

1. Susunlah alat-alat percobaan seperti pada gambar.
2. Tarik balok sehingga balok tepat akan bergerak.
3. Catatlah skala yang ditunjukkan neraca pegas.
4. Tarik kembali balok tersebut dengan gaya tarik yang lebih besar daripada gaya tarik pertama sehingga balok bergerak.
5. Pada saat balok bergerak, catatlah kembali skala yang ditunjukkan neraca pegas.
6. Apa yang dapat Anda simpulkan?



Gambar 2.6

- (a) Balok diam, $F < f_{s \text{ maks}}$.
- (b) Balok tepat akan bergerak, $F = f_{s \text{ maks}}$.
- (c) Balok mengalami percepatan, $F > f_k$.
- (d) Balok bergerak dengan kecepatan konstan, $a = 0$.

Jika gaya tarik bertambah, pada saat yang sama gaya gesek statis juga bertambah sampai maksimum. Sampai saat tersebut, balok belum bergerak karena gaya gesek selalu dapat mengimbangi gaya tarik. Jadi, balok masih diam. Pada saat balok bergerak, besar gaya tarik melampaui $\mu_s N$. Gaya gesek kinetik memenuhi hukum empiris sama seperti gaya gesek statis. Oleh karena itu, besar gaya gesek kinetik dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$f_k = \mu_k N \quad (2-4)$$

Pada umumnya, $\mu_k N < \mu_s N$ sehingga pada saat mulai bergerak, balok sempat mengalami percepatan. Pada balok yang bergerak tanpa percepatan, balok terus bergerak dengan kecepatan konstan dan besar $f_k = F$.

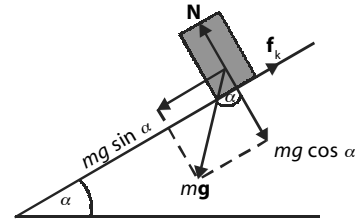
d. Koefisien Gaya Gesek Kinetik Benda pada Bidang Miring

Sebuah balok dengan berat w bergerak ke bawah di atas bidang miring kasar yang memiliki kemiringan α terhadap horizontal. Persamaan koefisien geseknya dapat diturunkan dari Hukum II Newton.

$$\begin{aligned} \sum F &= ma \\ mg \sin \alpha - \mu_k N &= ma \\ mg \sin \alpha - \mu_k mg \cos \alpha &= ma \\ \mu_k mg \cos \alpha &= mg \sin \alpha - ma \\ \mu_k &= \frac{mg \sin \alpha - ma}{mg \cos \alpha} \\ \mu_k &= \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha} \end{aligned} \quad (2-5)$$

Dengan demikian, koefisien gesek kinetik dapat diketahui dengan mengukur percepatan yang dialami oleh benda. Jika koefisien gesek kinetik diketahui, besar percepatan benda dapat diketahui dengan menggunakan persamaan.

$$a = g (\sin \alpha - \mu_k \cos \alpha) \quad (2-6)$$



Gambar 2.7
Sebuah balok bergerak di atas bidang miring.

Contoh 2.2

Sebuah benda bermassa 5 kg terletak pada bidang miring dengan sudut kemiringan α dengan $\sin \alpha = 0,8$. Jika koefisien gesek kinetik antara balok dan bidang 0,25, tentukan besar percepatan balok tersebut.

Jawab:

Diketahui: $m = 5 \text{ kg}$; $\sin \alpha = 0,8$; $f_k = 0,25$

Gaya-gaya yang bekerja pada benda terlebih dulu diuraikan.

Besar gaya gesekan kinetik:

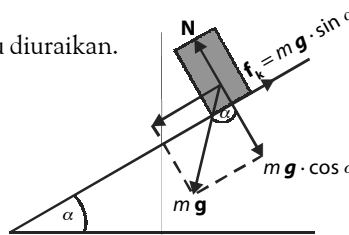
$$\begin{aligned} f_k &= \mu_k N \\ &= \mu_k mg \cos \alpha \\ &= (0,25)(5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(0,6) = 7,5 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= mg \sin \alpha \\ &= (5)(10 \text{ kg})(0,8 \text{ m/s}^2) = 40 \text{ N} \end{aligned}$$

Besar percepatan balok diperoleh dari Hukum II Newton.

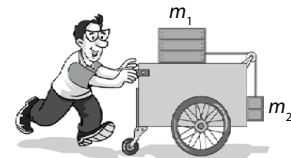
$$a = \frac{\sum F}{m} = \frac{F - f_k}{m} = \frac{(40 \text{ N} - 7,5 \text{ N})}{5} = 6,5 \text{ m/s}^2$$

Jadi, balok meluncur pada bidang miring dengan percepatan $6,5 \text{ m/s}^2$.



Tantangan untuk Anda

Perhatikan gambar berikut.



Ketika gerobak diam, balok bermassa m akan bergerak ke arah balok bermassa m_2 karena pengaruh gaya berat $m_2 g$. Berapa gaya dorong F minimum yang harus diberikan pada gerobak supaya sistem berada dalam keadaan setimbang?

Contoh 2.3

Sebuah benda 4 kg terletak di atas bidang datar. Koefisien gesek kinetik benda dengan permukaan bidang datar adalah 0,3. Benda ditarik oleh gaya sebesar F seperti pada gambar. Supaya benda bergerak dengan kecepatan konstan, berapakah besar gaya F yang harus diberikan ($g = 10 \text{ m/s}^2$)?

Jawab:

Diketahui:

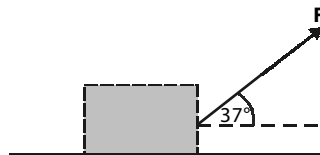
$m = 4 \text{ kg}$;

$\mu_k = 0,3$

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

Gaya-gaya yang bekerja pada benda diuraikan terlebih dulu.

Benda bergerak lurus beraturan, berarti $a = 0$.





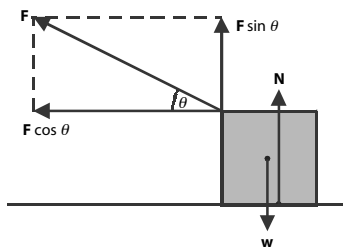
Pembahasan Soal

Sebuah balok yang beratnya w ditarik sepanjang permukaan mendatar dengan kelajuan konstan v oleh gaya F yang bekerja dengan arah membentuk sudut θ terhadap bidang horizontal. Besar gaya normal yang bekerja pada balok oleh permukaan adalah

- $w + F \cos \theta$
- $w + F \sin \theta$
- $w - F \sin \theta$
- $w - F \cos \theta$
- w

Soal UMPN 2000

Pembahasan:



Gaya tarik F jika diuraikan atas komponen searah sumbu- x dan sumbu- y adalah

$$F_y = F \sin \theta$$

$$F_x = F \cos \theta$$

Besar gaya normal:

$$\sum F_y = 0$$

$$F \sin \theta + N = w$$

$$N = w - F \sin \theta$$

Jawaban: c

$$N + F \sin 37^\circ = mg$$

$$N = mg - F \sin 37^\circ$$

$$N = (4 \text{ kg})(10 \text{ ms}^{-1}) - (F)(0,6)$$

$$N = 40 \text{ N} - 0,6F$$

Besar gaya dalam arah sumbu- x :

$$\sum F_x = 0$$

$$F \cos 37^\circ - f_k = 0$$

$$0,8F - \mu_k N = 0$$

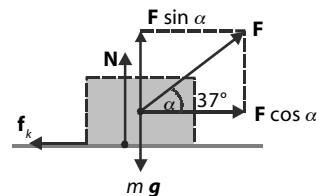
$$0,8F - 0,3(40 \text{ N} - 0,6F) = 0$$

$$0,8F - 12 \text{ N} + 0,18F = 0$$

$$0,98F = 12 \text{ N}$$

$$F = 12,24 \text{ N}$$

Jadi, agar benda bergerak dengan kecepatan konstan, harus diberi gaya tarik sebesar 12,24 N.



Contoh 2.4

Dua buah benda bermassa m_1 dan m_2 dihubungkan dengan seutas tali melalui sebuah katrol. Benda bermassa m_1 terletak di atas meja, sedangkan benda bermassa m_2 tergantung pada tali seperti pada gambar. Massa benda masing-masing 3 kg dan 2 kg. Besar percepatan gravitasi (g) = 10 m/s². Jika koefisien gesek kinetik antara benda bermassa m_1 dan alasnya $\frac{1}{3}$, tentukan percepatan kedua benda tersebut.

Jawab:

Kedua benda bergerak dengan percepatan yang sama karena kedua benda dihubungkan oleh seutas tali. Perhatikan gambar berikut.

Diketahui:

$$m_1 = 3 \text{ kg}$$

$$m_2 = 2 \text{ kg}$$

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

$$\mu_k = \frac{1}{3}$$

$$\text{Balok 1 : } N = m_1 g = (3 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 30 \text{ N}$$

$$\text{Balok 2 : } w_2 = m_2 g = (2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 20 \text{ N}$$

Dari balok 1 dan 2 diperoleh

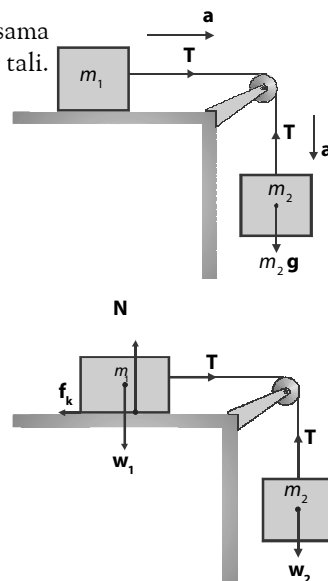
$$w_2 - \mu_k N = (m_1 + m_2) a$$

$$20 \text{ N} - \frac{1}{3} 30 \text{ N} = (3 + 2) a$$

$$10 \text{ N} = 5 a$$

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

Jadi, besar percepatan kedua balok sama, yaitu 2 m/s².



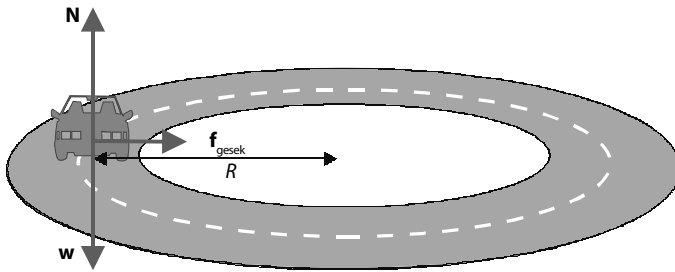
Tugas Anda 2.1

Amatilah sebuah tabung pejal yang berada di puncak suatu bidang miring. Jika tabung mulai bergerak di sepanjang bidang miring tersebut, bagaimanakah gerakannya? Jika bidang miring tersebut diberi oli sehingga licin, apa yang akan terjadi pada tabung tersebut? Jelaskan fenomena tersebut di depan teman-teman Anda.

2. Penerapan Gaya Gesek pada Jalan Menikung

a. Tikungan Mendatar

Jalan yang basah sering menyebabkan kendaraan mudah tergelincir, apalagi jika kendaraan melaju kencang pada jalan menikung. Untuk menghindari selip, jalan datar tersebut harus dibuat kasar sehingga ketika kendaraan menikung akan timbul gaya gesek. Gaya gesek tersebut berfungsi sebagai gaya sentripetal yang selalu menuju ke pusat lintasan lingkaran. Gambar 2.8 menggambarkan gaya gesek yang menuju pusat lingkaran.



Gambar 2.8

Sebuah mobil sedang melaju pada lintasan melingkar dan datar.

Apakah Anda mengetahui jenis gaya gesek yang bekerja pada kasus ini? Jika mobil membelok dalam keadaan ban masih berputar, gaya yang bekerja adalah gaya gesek statis. Tetapi, ketika mobil meluncur (selip), gaya gesek yang bekerja adalah gaya gesekan kinetik. Besar kecepatan maksimum mobil yang melintas pada tikungan jalan kasar mendatar agar tidak selip memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$F_{sp} = f_s$$

$$\frac{mv_{maks}^2}{r} = \mu_s N \Leftrightarrow \frac{mv_{maks}^2}{r} = \mu_s mg$$

$$v_{maks} = \sqrt{\mu g r} \quad (2-7)$$

Contoh 2.5

Sepeda motor melaju pada jalan melingkar dengan jari-jari lingkarannya 30 m. Jika gaya gesek maksimum yang bekerja antara ban dan jalan 5.000 N, massa motor dengan penumpangnya 187,5 kg, tentukan kelajuan maksimum yang dapat dicapai oleh motor agar tidak selip.

Jawab:

Diketahui:

$$F_{sp} = 5.000 \text{ N}$$

$$m = 187,5 \text{ kg}$$

$$R = 30 \text{ m}$$

Kelajuan diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$F_{sp} = m \frac{v^2}{R}$$

$$5.000 \text{ N} = (187,5 \text{ kg}) \frac{v^2}{30 \text{ m}}$$

$$v_{maks}^2 = \sqrt{800} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$v_{maks} = 20 \sqrt{2} \text{ m/s}$$

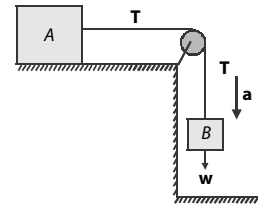
Jadi, agar tidak selip kelajuan maksimal motor harus sebesar $20 \sqrt{2}$ m/s.

b. Tikungan Miring Licin

Perhatikan **Gambar 2.9**. Sebuah mobil sedang bergerak di belokan miring di lintasan licin. Sudut kemiringan jalan terhadap bidang horizontal adalah θ . Gaya normal kendaraan yang bekerja pada komponen horizontal ($N \sin \theta$) akan memberikan gaya sentripetal yang diperlukan mobil agar dapat menikung.

Tugas Anda 2.2

Perhatikan gambar berikut.



Diskusikan dengan teman Anda, apakah benar percepatan sistem tersebut adalah:

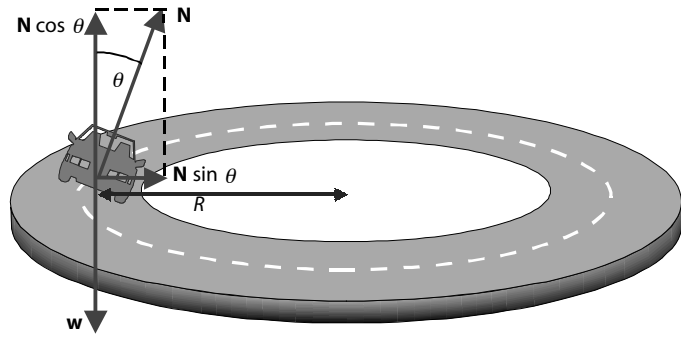
- Jika permukaan bidang datar licin,

$$a = \left[\frac{m_B}{m_A + m_B} \right] g$$

- Jika permukaan bidang datar kasar,

$$a = \left[\frac{m_B - \mu_k \cdot m_A}{m_A + m_B} \right] g$$

Gambar 2.9
Sebuah mobil sedang melaju pada lintasan melingkar yang miring dan licin.



Oleh karena besar gaya gesek statis (f_s) sama dengan nol, diperoleh persamaan gaya normal sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ N \cos \theta - mg &= 0 \\ \boxed{N \cos \theta &= mg} \end{aligned} \quad (2-8)$$

Gaya yang menuju pusat lingkaran merupakan gaya sentripetal, yaitu

$$\begin{aligned}N \sin \theta &= F_{sp} \\ \boxed{N \sin \theta &= m \frac{v^2}{r}} \end{aligned} \quad (2-9)$$

Dengan membagi **Persamaan (2-9)** dengan **Persamaan (2-8)**, diperoleh

$$\begin{aligned}\frac{N \sin \theta}{N \cos \theta} &= \frac{mv^2}{r} \\ \boxed{\tan \theta &= \frac{v^2}{rg}} \end{aligned} \quad (2-10)$$

Kelajuan maksimum mobil agar dapat bergerak dinyatakan dengan

$$\boxed{v_{maks} = \sqrt{rg \tan \theta}} \quad (2-11)$$

Keterangan:

- θ = sudut kemiringan belokan terhadap horizontal
- v_{maks} = kelajuan maksimum (m/s)
- r = jari-jari tikungan (m)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Tahukah Anda teknologi mobil terbaru yang paling mutakhir? Sistem komputerisasi yang terpasang pada mobil dapat mengatur pilihan daya cengkram rem roda yang paling dibutuhkan ketika mobil melaju di jalan menikung. Secara otomatis, kampas rem pada setiap roda dapat bekerja sesuai besar kecilnya daya cengkram setiap ban mobil terhadap jalan raya.

c. Tikungan Miring dan Kasar

Para ahli mendesain jalan tikungan miring dengan memperhitungkan jari-jari tikungan (r), percepatan gravitasi (g), kemiringan jalan (θ), serta nilai kekasaran jalan. Jika Anda perhatikan **Persamaan (2-10)**, semakin besar sudut kemiringan jalan, semakin besar juga kelajuan maksimum kendaraan yang diperbolehkan untuk melewati tikungan tersebut.



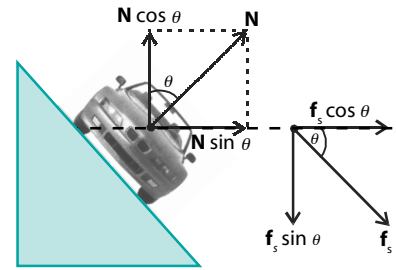
Informasi untuk Anda

Pernahkah Anda menonton balap motor di TV? Jika Anda perhatikan, pada setiap tikungan, pembalap motor selalu memiringkan badannya. Apakah Anda tahu alasannya? Jika pembalap motor itu menikung dengan kecepatan yang cukup tinggi, dia membutuhkan gaya sentripetal yang lebih besar. Gaya sentripetal tersebut berupa gaya gesek dan gaya normal. Untuk mendapatkan gaya normal yang arahnya menuju pusat lingkaran, pembalap tersebut harus memiringkan badannya.

Information for You

Have you watched motorcycle racing on TV? If you watch it, you can see that the riders always put their bodies at an angle with road in each corners. Do you know what is their reason? If the riders come in the corner at high velocity, they need bigger centripetal force which are from friction and normal force. To get normal force which has direction to the center of circle, the riders should put their bodies at an angle.

Bagaimanakah cara menghitung batas kelajuan pada tikungan jalan yang miring dan kasar? Perhatikan **Gambar 2.10**. Terdapat dua komponen gaya dalam arah radial ke pusat tikungan jalan, yaitu komponen gaya normal $N \sin \theta$ dan komponen gaya gesekan statis $f_s \cos \theta$. Resultan kedua gaya tersebut berfungsi sebagai gaya sentripetal. Kelajuan maksimum mobil agar tidak selip dapat diperoleh sebagai berikut.



Gambar 2.10
Diagram gaya pada mobil yang sedang melaju pada lintasan melingkar yang miring dan kasar.

$$F_s = m \frac{v_{\text{maks}}^2}{r}$$

$$N \sin \theta + f_s \cos \theta = m \frac{v_{\text{maks}}^2}{r}$$

$$N \sin \theta + \mu_s N \cos \theta = m \frac{v_{\text{maks}}^2}{r}$$

$$N (\sin \theta + \mu_s \cos \theta) = m \frac{v_{\text{maks}}^2}{r} \quad (2-12)$$

Mobil tidak bergerak pada sumbu-y sehingga

$$\sum F_y = 0 \text{ (ambil arah ke atas positif)}$$

$$N \cos \theta - mg - f_s \sin \theta = 0$$

$$N \cos \theta - \mu_s N \sin \theta = mg$$

$$N (\cos \theta - \mu_s \sin \theta) = mg \quad (2-13)$$

Jika **Persamaan (2-12)** dibagi dengan **Persamaan (2-13)**, diperoleh

$$\frac{\cos \theta \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} + \mu_s \right)}{\cos \theta \left(1 - \mu_s \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right)} = \frac{v_{\text{maks}}^2}{gr}$$

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{gr \frac{\mu_s + \tan \theta}{1 - \mu_s \tan \theta}} \quad (2-14)$$

Dari persamaan tersebut, dapat disimpulkan bahwa sudut kemiringan jalan (θ) dan kekasaran jalan (μ_s) berpengaruh terhadap laju maksimum mobil untuk membelok agar tidak terjadi selip.

Kata Kunci

- gaya gesek kinetik
- gaya gesek statis
- koefisien gaya gesek

Contoh 2.6

Mobil melewati tikungan jalan yang jari-jari kelengkungannya 50 m. Jika sudut kemiringan jalan (θ) = 35° , tentukan kecepatan maksimum mobil yang diperbolehkan untuk kondisi:

- jalan licin karena berair (gesekan diabaikan)
- jalan kering dengan koefisien gesekan statis 0,25 (ambil $g = 10 \text{ m/s}^2$)

Jawab:

- Untuk kondisi jalan licin, gunakan persamaan

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{gr \tan \theta} = \sqrt{10 \text{ m/s}^2 (50 \text{ m}) \tan 35^\circ}$$

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{500 (0,70)} = 18,7 \text{ m/s}$$



Tantangan untuk Anda

Sebuah benda bermassa m meluncur pada bidang miring kasar. Sudut kemiringan bidang tersebut adalah μ . Jika benda berhenti setelah berpindah sejauh x akibat gaya gerak, buktikan bahwa:

$$w = \frac{\mu mg x}{1 - \mu \cos \gamma}$$

b. Untuk kondisi jalanan kasar, gunakan persamaan

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{g r \frac{\mu_s + \tan \theta}{1 - \mu_s \tan \theta}} = \sqrt{10(50) \frac{0,25 + \tan 35}{1 - 0,25 \tan 35^\circ}}$$
$$v_{\text{maks}} = \sqrt{\frac{10 \text{ m/s}^2 (50 \text{ m}) 0,95}{0,825}} = 24 \text{ m/s}$$

Mari Mencari Tahu

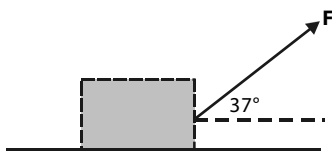


Dalam aktivitas fisika yang telah Anda lakukan di subbab ini, Anda dapat menentukan secara langsung gaya gesek statis suatu benda. Kemudian, dengan melakukan substitusi nilai tersebut ke dalam persamaan $f_s = \mu_s N$, Anda dapatkan nilai μ_s tersebut. Sekarang, rancanglah suatu percobaan sederhana untuk mendapatkan nilai. Tuliskanlah rancangan percobaan tersebut dan kumpulkan kepada guru Anda.

Tes Kompetensi Subbab A

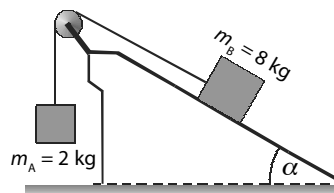
Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Benda bermassa 5 kg terletak di atas bidang datar. Besar koefisien gesekan statis antara benda dan alas adalah 0,4. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapa besar gaya yang dibutuhkan untuk menarik benda ketika tepat akan bergerak?
2. Balok bermassa 15 kg terletak di atas lantai kasar. Pada balok dikerjakan gaya mendatar 60 N agar balok tepat akan bergerak. Setelah balok bergerak, diperlukan gaya 45 N hingga balok bergerak dengan kecepatan tetap. Hitung koefisien gesekan statis pada balok dan lantai.
3. Benda bermassa 4 kg terletak pada sebuah bidang datar. Pada benda bekerja gaya horizontal sebesar 20 N. Jika koefisien gesekan kinetik antara benda dan bidang 0,2, berapakah percepatan yang dialami benda?
4. Balok bermassa 2 kg terletak di atas lantai dan ditarik oleh gaya 4 N miring ke atas dan membentuk sudut 37° dengan arah horizontal. Jika koefisien gesekan kinetik dan statis masing-masing 0,1 dan 0,9, serta percepatan gravitasi $= 10 \text{ m/s}^2$, tentukan gaya gesekan yang bekerja antara balok dan lantai.



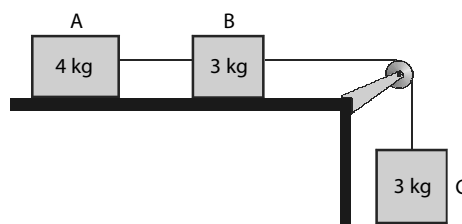
5. Benda bermassa 10 kg terletak pada bidang kasar ($\mu = 0,25$). Dari keadaan diam, benda diberi gaya tetap 75 N selama 12 sekon. Setelah menempuh jarak 250 m, keadaan bidang mulai licin sempurna. Berapakah perpindahan benda?

6. Perhatikan gambar berikut.



Saat dilepaskan, kedua benda memiliki percepatan 2 m/s^2 . Jika $\sin \alpha = \frac{3}{5}$, berapa koefisien gesek antara benda B dan bidang?

7. Tiga buah benda disusun seperti pada gambar.



Koefisien gesek kinetik benda A dan B terhadap bidang datar berturut-turut $\frac{1}{4}$ dan $\frac{1}{3}$. Jika benda C dilepaskan, berapakah percepatan ketiga benda tersebut?

8. Sebuah tikungan jalan raya yang dapat dianggap sebagai bagian lingkaran berjari-jari 40 m akan dibangun oleh seorang ahli bangunan. Untuk keperluan tersebut, ahli bangunan menanyakan kepada seorang ahli fisika, berapakah kemiringan tikungan sehingga mobil dapat melaju dengan kecepatan 15 m/s tanpa keluar dari lintasan? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

9. Massa sebuah sepeda dan pengendaranya sama dengan 100 kg. Sepeda tersebut akan melintas di suatu jalan dengan sudut kemiringan sebesar θ . Diketahui jari-jari lintasan sama dengan 30 m. Jika kelajuan sepeda sama dengan 16 m/s dan besar percepatan gravitasi = 10 m/s², tentukan:
- percepatan sentripetal pada sepeda;
 - besar sudut θ jika koefisien gesekan jalan 0,25.
10. Sebuah mobil berbelok tanpa selip dengan kelajuan maksimum 25 m/s pada sebuah jalan tikungan. Jari-jari kelengkungan tikungan 50 m dan koefisien gesek statisnya 0,27. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapa sudut kemiringan jalan tikungan tersebut?

B. Gaya Gravitasi

Gaya yang membuat benda jatuh ke tanah adalah gaya yang sama dengan gaya yang membuat planet-planet terus mengitari Matahari. **Isaac Newton** ialah orang pertama yang mengetahui hal ini. Pada tahun 1687, Newton melalui bukunya, *Principia*, menjelaskan bahwa planet-planet mengitari Matahari karena adanya gaya gravitasi yang menarik planet-planet ke arah Matahari. Newton juga dapat menunjukkan bahwa besar gaya gravitasi antara Matahari dan planet bergantung pada jarak antara keduanya. Semakin jauh jarak planet dari Matahari, gaya gravitasi yang bekerja semakin kecil. Newton juga dapat menunjukkan bahwa gaya tarik gravitasi antara dua buah benda bergantung pada massa keduanya. Semakin besar massa benda, semakin besar pula gaya tariknya.

1. Hukum Gravitasi Universal Newton

Tahun 1686, Newton menyatakan hukum gravitasi berlaku di seluruh alam semesta (gravitasi universal). Jika ada dua buah benda bermassa m_1 dan m_2 , serta berjarak r satu dengan yang lainnya seperti tampak pada **Gambar 2.11**, di antara kedua benda tersebut akan terjadi gaya tarik-menarik yang disebut *gaya gravitasi*. Newton berkesimpulan bahwa gaya tarik gravitasi yang bekerja antara dua benda tersebut, sebanding dengan massa setiap benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda tersebut. Secara matematis, pernyataan tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan

$$F \approx \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2-15)$$

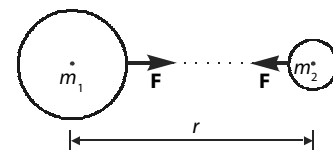
Untuk menyetarakan ruas kiri dan ruas kanan maka ruas kanan harus dikalikan suatu konstanta tertentu yang disebut *konstanta gravitasi universal* (G) sehingga diperoleh persamaan

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2-16)$$

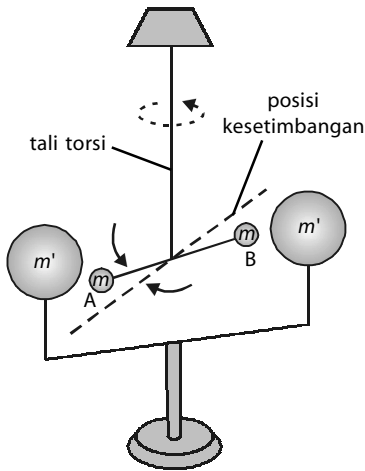
Keterangan:

- F = gaya tarik gravitasi kedua benda (N)
- m_1 dan m_2 = massa benda (kg)
- r = jarak antara kedua benda (m)
- G = konstanta gravitasi universal (Nm²/kg²)

Seorang ilmuwan Inggris, **Sir Henry Cavendish** (1731–1810), secara sederhana berhasil menentukan nilai konstanta gravitasi universal G . Pengamatan dilakukan secara saksama dan teliti dengan menggunakan sebuah alat yang disebut *neraca Cavendish*.



Gambar 2.11
Gaya tarik menarik pada dua benda bermassa m_1 dan m_2 .



Gambar 2.12
Skema neraca Cavendish.

Neraca Cavendish terbuat dari batang AB ringan, seperti pada **Gambar 2.12**. Pada ujung-ujung A dan B, terdapat bola-bola kecil dari emas atau platina yang massanya sama, yaitu m . Kedua bola tersebut dapat bergerak dengan bebas. Bagian tengah batang diikat dengan menggunakan benang halus dan digantung vertikal. Cermin datar diletakkan pada benang tersebut dan dapat memantulkan sinar pada suatu skala. Bola-bola kecil A dan B masing-masing didekatkan pada bola agak besar yang terbuat dari timah hitam yang masing-masing bermassa m' . Jarak antara bola kecil dan bola besar (dua pasang) diusahakan sama. Gaya gravitasi yang timbul antara m dan m' , baik di A maupun di B menghasilkan kopel gaya yang memutar benang. Akibatnya, cermin berputar sehingga menyebabkan sinar pada skala bergeser.

Berdasarkan pengamatan dan pengukuran gaya tarik antara dua massa bola kecil dan massa bola besar secara saksama, Cavendish memperoleh nilai $G = 6,670 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Contoh 2.7

Tentukan besar gaya gravitasi antara dua benda bermassa 8 kg dan 12 kg yang terpisah pada jarak 25 cm.

Jawab:

Diketahui:

$$m_1 = 8 \text{ kg}$$

$$m_2 = 12 \text{ kg}$$

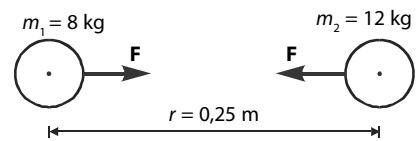
$$r = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$$

$$G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

Besar gaya gravitasi diperoleh dengan persamaan

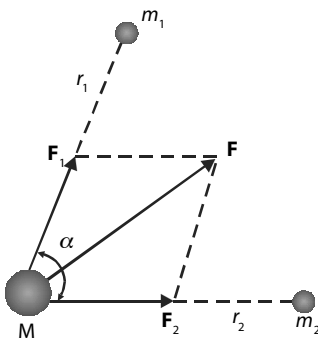
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$= (6,7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2) \frac{(8 \text{ kg})(12 \text{ kg})}{(0,25 \text{ m})^2} = 1 \times 10^{-7} \text{ N}$$



Tantangan untuk Anda

Berapakah massa dua benda pada jarak 1 meter agar memiliki gaya gravitasi sebesar 1 N?



Gambar 2.13
Resultan gaya gravitasi.

Perhatikan **Gambar 2.13**. Pada sebuah benda bermassa M bekerja gaya gravitasi F_1 dan F_2 . Besar resultan gaya gravitasi F_1 dan F_2 memenuhi persamaan berikut ini.

$$\text{Besar gaya gravitasi dari } m_1 \text{ adalah } F_1 = G \frac{M m_1}{r_1^2}$$

$$\text{Besar gaya gravitasi dari } m_2 \text{ adalah } F_2 = G \frac{M m_2}{r_2^2}$$

Besar resultan gaya gravitasi F_1 dan F_2 adalah

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \alpha} \quad (2-17)$$

Seperti telah dibahas pada bagian awal subbab ini, dengan menggunakan Hukum Gravitasi Universal Newton ini, Anda dapat menghitung massa planet-planet dan massa Matahari.

a. Menghitung Massa Bumi

Anda pasti telah mengetahui bahwa setiap benda di permukaan Bumi yang bermassa m , akan mendapat percepatan gravitasi sehingga berat benda tersebut yang juga dipengaruhi gaya tarik Bumi dan memenuhi persamaan

Ingatlah

Gaya gravitasi merupakan besaran vektor.



Isaac Newton
(1642–1777)



Sumber: Fisika untuk Sains dan Teknik, 1998

Isaac Newton lahir di Inggris tahun 1642. Ia kuliah di Universitas Cambridge selama 5 tahun. Selama menjadi mahasiswa, ia tidak terlalu menonjol dalam bidang akademis. Pada waktu wabah pes menyerang Inggris, ia mengasingkan diri di pedesaan. Di tempat itulah, legenda tentang apel jatuh itu terjadi. Ia memperhatikan dan terus memikirkan mengapa apel jatuh ke bawah, gaya itulah yang kemudian disebut gaya gravitasi. Selain gaya gravitasi, ia juga menemukan prinsip-prinsip dasar kalkulus.

$$w = mg \quad (2-18)$$

Jika massa sebuah benda m dan massa Bumi M , sedangkan jarak benda terhadap pusat Bumi adalah r (berarti benda berada di permukaan Bumi), berat benda akan memenuhi persamaan berikut.

$$w = G \frac{mM}{r^2} \quad (2-19)$$

Dengan melakukan substitusi dari besar **Persamaan (2-18)** ke **Persamaan (2-19)**, akan dihasilkan:

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

Jika jari-jari Bumi sama dengan 6.382,5 km dan besar gaya gravitasi bumi $9,8 \text{ m/s}^2$, massa Bumi dinyatakan dengan

$$M = \frac{r^2 g}{G} = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg} = 6 \times 10^{24} \text{ kg} \quad (2-20)$$

b. Menghitung Massa Matahari

Selain menghitung massa Bumi, massa Matahari pun dapat dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan gerak saat Bumi mengelilingi Matahari. Keseimbangan gerak Bumi pada orbitnya disebabkan oleh dua gaya yang bekerja pada Bumi, yaitu besar gaya tarik Matahari F dan besar gaya sentripetal Bumi F_{sp} .

Besar gaya tarik Matahari terhadap Bumi adalah

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (2-21)$$

Dengan menganggap bahwa lintasan gerak Bumi berupa lingkaran, berlaku persamaan gerak melingkar, yaitu

$$F_s = m \frac{v^2}{r} \quad (2-22)$$

Persamaan (2-21) disubstitusikan ke **Persamaan (2-22)**, menghasilkan

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

$$M = \frac{v^2 r}{G} \quad (2-23)$$

Bumi mengelilingi Matahari dalam satu periode (T) menempuh lintasan satu putaran penuh ($2\pi r$). Jadi, kelajuan perputaran Bumi adalah

$$v = \frac{\text{jarak tempuh}}{\text{waktu tempuh}} = \frac{2\pi r}{T} \quad (2-24)$$

Jika Anda substitusikan **Persamaan (2-24)** ke **Persamaan (2-23)**, hasilnya adalah

$$M = \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^2 \frac{r}{G} = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \quad (2-25)$$

Keterangan:

M = massa Matahari (kg)

r = jarak Bumi dari Matahari (m)

T = periode Bumi (s)

$G = 6,67 \times 10^{-10} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Massa Matahari dapat dihitung berdasarkan waktu edar Bumi selama 1 tahun. Jarak antara Bumi dan Matahari adalah $1,5 \times 10^{11}$ m sehingga massa Matahari adalah

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

$$= \frac{4(3,14)^2 (1,5 \times 10^{11} \text{ m})^3}{(6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2)(3,15 \times 10^5 \text{ s})^2}$$

$$M = 2,01 \times 10^{30} \text{ kg}$$

2. Kuat Medan Gravitasi

Semua benda di sekitar permukaan Bumi akan dipengaruhi oleh medan gravitasi Bumi sehingga memiliki gaya berat yang besarnya sebanding dengan percepatan gravitasi di tempat tersebut. Percepatan gravitasi Bumi di suatu tempat akan semakin kecil jika jarak antara pusat Bumi ke tempat tersebut semakin jauh. Artinya, semakin jauh letak sebuah benda dari pusat Bumi, semakin kecil gaya gravitasi Bumi yang dialami oleh benda tersebut. **Tabel 2.1** menunjukkan percepatan gravitasi di beberapa tempat.

Menurut mekanika Newton, gaya berat (gaya gravitasi) sebuah benda memenuhi persamaan $w = mg$, dengan g disebut percepatan gravitasi yang juga merupakan gaya per satuan massa yang dilakukan Bumi terhadap setiap benda dan disebut medan gravitasi Bumi.

Jika massa Bumi M dan massa sebuah benda yang berada di permukaan Bumi m , benda bermassa m tersebut akan mendapatkan gaya gravitasi yang besarnya

$$w = F = G \frac{Mm}{r^2}$$

sehingga akan diperoleh

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (2-26)$$

Keterangan:

g = kuat medan gravitasi (m/s^2)

G = konstanta gravitasi universal (Nm^2/kg^2)

r = jarak benda terhadap pusat Bumi (m)

Persamaan (2-26) tersebut adalah persamaan yang menyatakan besar percepatan gravitasi Bumi yang dialami oleh suatu benda yang berjarak r dari pusat Bumi dan mendapat kuat medan gravitasi g .

G dan M merupakan konstanta dan besaran g berbanding terbalik dengan jarak suatu benda terhadap pusat Bumi. Jadi, semakin jauh letak suatu benda (r), semakin kecil percepatan gravitasi yang dialami suatu benda.

Contoh 2.8

Dua benda A dan B masing-masing bermassa 4 kg dan 9 kg diletakkan terpisah pada jarak 50 cm. Di manakah titik P harus ditempatkan agar kuat medan gravitasi di tempat tersebut sama dengan nol?

Jawab:

Diketahui:

$m_A = 4 \text{ kg}$

$m_B = 9 \text{ kg}$

$R = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$

Tabel 2.1

Nilai Percepatan Gravitasi di Berbagai Tempat

Tempat	Percepatan Gravitasi (m/s^2)
Kutub Utara	9,832
Greenland	9,825
Stockholm	9,818
Brussels	9,811
New York	9,803
Denver	9,796
San Francisco	9,800
Khatulistiwa	9,780

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

Tabel 2.2

Kebergantungan Nilai Percepatan Gravitasi g dengan Ketinggian

Ketinggian (km)	g (m/s^2)
0	9,83
5	9,81
10	9,80
50	9,68
100	9,53
500	8,45
1.000	7,34
5.000	3,09
10.000	1,49

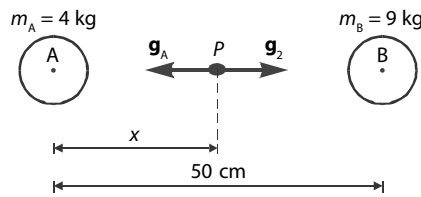
Sumber: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 2000

Misalnya letak titik P dari benda A adalah x. Agar kuat medan gravitasi di titik P sama dengan nol maka

$$g_A = g_B$$

$$G \frac{m_A}{R_A^2} = G \frac{m_B}{R_B^2}$$

$$\frac{m_A}{x^2} = \frac{m_B}{(0,5-x)^2}$$



$$\frac{4}{x^2} = \frac{9}{(0,5-x)^2} \Rightarrow \left(\frac{2}{x}\right)^2 = \left(\frac{3}{0,5-x}\right)^2 \Rightarrow \frac{2}{x} = \frac{3}{0,5-x}$$

$$2(0,5-x) = 3x$$

$$1 - 2x = 3x$$

$$1 = 5x \Rightarrow x = \frac{1}{5} \text{ m}$$

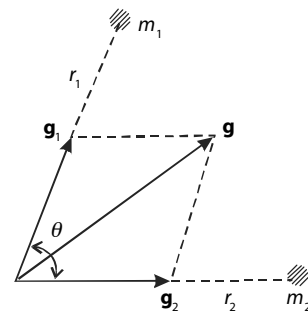
Jadi, titik P harus ditempatkan pada jarak $\frac{1}{5}$ m dari benda A.

Seperti halnya gaya gravitasi, percepatan gravitasi juga merupakan besaran vektor. Jadi, besar resultan percepatan gravitasi yang bekerja pada sebuah titik akibat medan gravitasi yang dihasilkan oleh dua buah benda bermassa m_1 dan m_2 , harus dihitung pula secara vektor. Perhatikan Gambar 2.14. Besar resultan kedua percepatan gravitasi tersebut adalah

$$g = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + 2g_1g_2 \cos \theta} \quad (2-27)$$

Keterangan:

$$g_1 = G \frac{m_1}{r_1^2} \quad \text{dan} \quad g_2 = G \frac{m_2}{r_2^2}$$



Gambar 2.14
Resultan percepatan gravitasi

Contoh 2.9

Dua buah benda bermassa 5 kg dan 15 kg. Terdapat sebuah titik O yang berjarak sama dari benda 1 dan benda 2, yaitu 5 m yang membentuk sudut 60° seperti pada gambar. Jika konstanta gravitasi $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$, tentukan kuat medan gravitasi di titik O.

Jawab:

Diketahui:

$$r_1 = r_2 = 5 \text{ m}$$

$$m_1 = 5 \text{ kg}$$

$$m_2 = 15 \text{ kg}$$

$$g_1 = G \frac{m_1}{r_1^2} = G \frac{5}{(5)^2} = \frac{1}{5} G \text{ kg/m}^2$$

$$g_2 = G \frac{m_2}{r_2^2} = G \frac{15}{(5)^2} = \frac{3}{5} G \text{ kg/m}^2$$

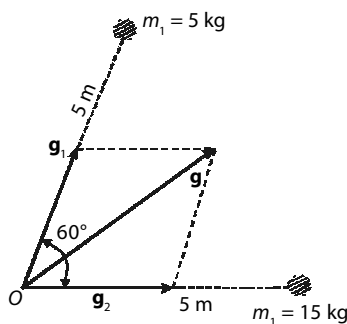
Kuat medan gravitasi diperoleh dari persamaan

$$g = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + 2g_1g_2 \cos \theta}$$

$$g = \sqrt{\left(\frac{1}{5}G\right)^2 + \left(\frac{3}{5}G\right)^2 + 2\left(\frac{1}{5}G\right)\left(\frac{3}{5}G\right)\cos 60^\circ} = \sqrt{\left(\frac{1}{25}G^2 + \frac{9}{25}G^2 + \frac{3}{25}G^2\right)}$$

$$= G\sqrt{\frac{13}{25}} = (6,7 \times 10^{-11})\left(\frac{1}{5}\sqrt{13}\right) = 4,83 \times 10^{-11} \text{ N/kg}$$

Jadi, kuat medan gravitasi $4,83 \times 10^{-11} \text{ N/kg}$.



Pembahasan Soal

Perbandingan antara jari-jari sebuah planet (R_p) dan jari-jari Bumi (R_b) adalah 2 : 1, dan perbandingan massanya 10 : 1. Jika berat Butet di Bumi 100 N, di planet tersebut beratnya menjadi

- 100 N
- 200 N
- 250 N
- 400 N
- 500 N

Soal UMPN Tahun 1990

Pembahasan:

$$\text{Percepatan gravitasi} \Rightarrow g = \frac{M}{R^2}$$

$$\frac{g_p}{g_b} = \left(\frac{R_b}{R_p}\right)^2 \left(\frac{M_p}{M_b}\right)$$

$$= \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{10}{1}\right) = 2,5$$

$$g_p = 2,5 g_b$$

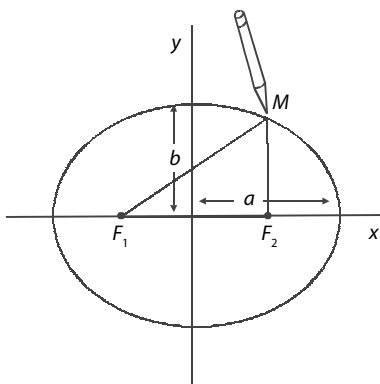
maka $w_p = 2,5 w_b$
 $w = 2,5 (100 \text{ N})$
 $= 250 \text{ N}$

Jawaban: c



Tantangan untuk Anda

Banyak penelitian menunjukkan bahwa ada beberapa tempat yang rendah, tetapi percepatan gravitasinya lebih kecil daripada tempat yang lebih tinggi. Menurut Anda, faktor-faktor apa yang menyebabkan hal tersebut?



Gambar 2.15

Dua titik fokus pada elips.

3. Hukum-Hukum Kepler

Keberadaan gaya gravitasi sangat terasa pengaruhnya dalam kehidupan manusia. Salah satu hal menarik yang merupakan efek dari gaya gravitasi adalah keteraturan gerak planet dalam berevolusi terhadap Matahari. Anda masih ingat bukan tentang istilah revolusi?

Sejak zaman dahulu, manusia sudah tertarik untuk mengamati dan mempelajari gerak planet-planet. Pada tahun 140, **Ptolomeus** memperkenalkan sebuah model Alam Semesta, yaitu Bumi sebagai pusat Alam Semesta. Adapun planet-planet, bintang, serta Matahari bergerak mengelilingi Bumi. Teori tersebut dinamakan teori geosentris.

Pada tahun 1543, **Copernicus** memperkenalkan sebuah model alam semesta baru yang kontroversial, yaitu **heliosentris**. Model tersebut menjadi kontroversial karena yang menjadi pusat adalah Matahari sehingga Bumi dan planet-planet lain bergerak mengelilingi Matahari.

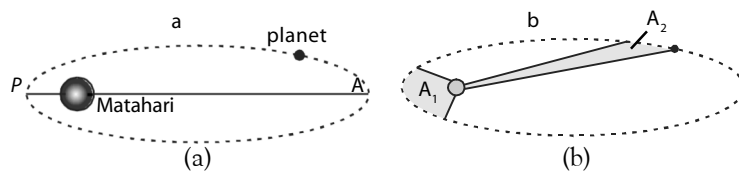
Setelah era Copernicus, muncul seorang ahli astronomi, **Tycho Brahe**, yang berhasil membuat model pergerakan planet-planet dengan lebih detil. Kemudian, model pergerakan planet-planet yang paling fenomenal adalah model yang dikemukakan oleh **Johannes Kepler**. Kepler berhasil menemukan keteraturan gerak planet-planet yang ia formulasikan dalam Hukum I Kepler, Hukum II Kepler, dan Hukum III Kepler.

Hukum I Kepler menyatakan bahwa semua planet bergerak dalam orbit elips dengan Matahari di salah satu titik fokusnya. Anda tentu ingat elips memiliki 2 titik fokus. Titik-titik fokus elips berfungsi sebagai acuan untuk menggambar elips. Perhatikan **Gambar 2.15**. Pada gambar tersebut ditunjukkan juga bahwa elips memiliki sumbu semimayor (jari-jari yang lebih panjang) dan sumbu semiminor (jari-jari yang lebih pendek). Jika bidang elips dianalogikan sebagai lintasan planet-planet, salah satu fokus (F_1 atau F_2) adalah kedudukan Matahari. Supaya Anda dapat memahaminya dengan lebih jelas, perhatikan **Gambar 2.16 (a)** berikut. Implikasi dari bentuk elips ini adalah jarak antara planet dan Matahari di sepanjang lintasan tidak sama. Ada satu titik antara jarak planet dan Matahari paling jauh. Jarak ini disebut *aphelion*. Ada pula satu titik di mana jarak antara planet dan Matahari paling dekat. Jarak ini disebut *perihelion*.

Hukum II Kepler menyatakan bahwa garis yang menghubungkan antara planet dan Matahari akan menyapu luas daerah yang sama pada waktu yang sama. Untuk mempermudah Anda memahami konsep ini, perhatikan **Gambar 2.16 (b)** berikut.

Gambar 2.16

- (a) Lintasan planet yang eliptis dengan Matahari di salah satu titik fokusnya. Titik P , dinamakan perihelion, dan titik A dinamakan aphelion.
- (b) Luas daerah yang ditempuh dalam waktu yang sama adalah sama.



Menurut Kepler, luas daerah A_1 dan A_2 pada gambar tersebut adalah sama. Dengan demikian, kecepatan orbit planet lebih besar pada saat jarak antara planet dan Matahari dekat. Ketika jarak antara planet dan Matahari jauh, kecepatan orbit planet akan melambat. Kesimpulan tersebut dapat juga dibuktikan secara matematis, yaitu dengan menggunakan konsep Hukum Kekekalan Momentum Sudut. Pembahasan dan penurunan rumusnya dapat Anda pelajari pada Bab 5.

Hukum III Kepler menyatakan bahwa kuadrat periode setiap planet sebanding dengan pangkat tiga jarak planet tersebut dari Matahari. Bentuk matematis dari Hukum III Kepler ini adalah

$$\frac{T^2}{r^3} = k \quad (2-28)$$

Keterangan:

T = periode

r = jarak antara planet dan Matahari

k = konstanta

Contoh 2.10

Jarak rata-rata planet Yupiter dan Matahari adalah 5,2 sa. Berapakah periode planet Yupiter tersebut?

Jawab:

Diketahui:

$$T_{\text{Bumi}} = 1 \text{ tahun}$$

$$r_{\text{Bumi}} = 1 \text{ sa}$$

$$r_{\text{Yupiter}} = 5,2 \text{ sa}$$

Ditanyakan: T_{Yupiter}

$$\frac{T_{\text{Yupiter}}^2}{r_{\text{Yupiter}}^3} = \frac{T_{\text{Bumi}}^2}{r_{\text{Bumi}}^3}$$

$$T_{\text{Yupiter}}^2 = \frac{r_{\text{Yupiter}}^3}{r_{\text{Bumi}}^3} T_{\text{Bumi}}^2 = \frac{(5,2 \text{ sa})^3}{(1 \text{ sa})^3} (1 \text{ tahun})^2 = 140,608$$

maka

$$T_{\text{Yupiter}} = \sqrt{140,608} = 11,9 \text{ tahun.}$$

Tahukah Anda berapa nilai konstanta k pada Hukum III Kepler tersebut? Pada **Contoh 2.12**, Anda dapat menggunakan persamaan Hukum III Kepler tanpa memerlukan nilai konstanta k . Akan tetapi, untuk beberapa kasus (tanpa ada data pembandingan), nilai konstanta k akan sangat membantu (Dalam satuan astronomi (sa), $k = 1$). Anda tentu ingin mengetahui nilai dari konstanta k tersebut. Oleh karena itu, ikutilah langkah-langkah berikut ini.

Pada gerak planet yang mengelilingi Matahari, terdapat gaya sentripetal yang arahnya menuju Matahari (sebagai pusat dari gerak melingkar). Gaya sentripetal tersebut tidak lain adalah gaya gravitasi. Pada Bab 1, Anda telah belajar tentang gerak melingkar. Besar percepatan sentripetal pada gerak melingkar dapat dituliskan sebagai berikut.

$$a_s = \omega^2 r$$

$$\text{dengan } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

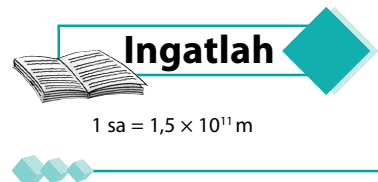
sehingga

$$a_s = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} r$$

Sesuai dengan Hukum II Newton, besar gaya sentripetalnya adalah

$$F_s = m a_s$$

$$F_s = \frac{4m\pi^2 r}{T^2} \quad (*)$$



Tugas Anda 2.3

Hitunglah nilai konstanta k . Dengan menggunakan nilai k yang sudah Anda dapatkan, hitung kembali berapa periode planet Yupiter jika jaraknya terhadap Matahari 5,2 sa.

Berdasarkan nilai T^2 pada **Persamaan (2–28)**, persamaan (*) dapat dituliskan menjadi

$$F_s = \frac{4m\pi^2}{kr^2} \quad (**)$$

Seperti telah diketahui pada pembahasan sebelumnya, gaya sentripetal setara dengan gaya gravitasi sehingga

$$\begin{aligned} F_{\text{gravitasi}} &= F_{\text{sentripetal}} \\ G \frac{Mm}{r^2} &= \frac{4m\pi^2}{kr^2} \\ \boxed{k} &= \frac{4\pi^2}{GM} \end{aligned} \quad (2-29)$$

Keterangan:

k = konstanta pada Hukum III Kepler

G = konstanta gravitasi universal (Nm^2/kg^2)

M = massa Matahari (kg)

Sekarang, Anda tentu sudah dapat menghitung nilai konstanta tersebut. Ternyata, tidak sulit untuk menurunkan persamaan tersebut.

4. Kelajuan Orbit Satelit

Ada dua macam satelit yang dikenal, yaitu satelit alami dan satelit buatan. Satelit alami, misalnya Bulan, sedangkan satelit buatan, misalnya satelit *Explorer*, *Nimbus*, dan *Midas*. Satelit buatan yang pertama berhasil mengorbit Bumi adalah satelit *Sputnik I*, diluncurkan oleh Uni Sovyet pada 4 Oktober 1957. Satelit ini mengelilingi Bumi dalam waktu 1,5 jam dengan kelajuan 2.880 km/jam.

Indonesia memiliki satelit komunikasi pertama bernama *Palapa*. Satelit tersebut digunakan untuk memberi pelayanan komunikasi, radio, dan televisi kepada sebagian besar penduduk Indonesia. Bahkan, beberapa negara tetangga menyewanya untuk keperluan yang sama.

Sumber energi untuk mengoperasikan satelit adalah baterai sel Matahari, yaitu sel silikon yang mengubah sinar Matahari menjadi energi listrik. Sumber energi lain yang digunakan adalah generator yang langsung menghasilkan energi listrik dari tenaga atom sehingga satelit dapat bergerak pada orbitnya mengelilingi Bumi dengan kelajuan tetap.

Gaya gravitasi Bumi berfungsi sebagai gaya sentripetal sehingga satelit tetap berada pada orbitnya untuk mengelilingi Bumi. Jika massa satelit m bergerak dengan kelajuan v dalam orbit lingkaran berjari-jari r maka akan diperoleh persamaan berikut ini.

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

sehingga kelajuan satelit agar tetap berada pada orbitnya adalah

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{GM}{r}}} \quad (2-30)$$

Keterangan:

M = massa Bumi (kg)

r = jari-jari orbit satelit (m)

G = konstanta gravitasi universal (Nm^2/kg^2)



Tantangan untuk Anda

Anda telah belajar tentang hubungan gaya gravitasi dan massa sebuah planet. Sekarang, hitunglah berapa nilai percepatan gravitasi (g) pada setiap planet di dalam tata surya ini. Kemudian, apakah Anda dapat menduga hubungan antara nilai percepatan gravitasi dan jari-jari planet-planet tersebut?

Tugas Anda 2.4

Diskusikan bersama teman sekelas Anda. Jika Anda menimbang berat badan, sebenarnya angka yang ditunjukkan oleh timbangan adalah massa badan atau gaya berat badan?

Contoh 2.11

Pada kelajuan berapakah satelit buatan harus mengorbit Bumi pada ketinggian $\frac{1}{2} R$ dari permukaan Bumi, jika diketahui massa Bumi $5,97 \times 10^{24}$ kg dan jari-jarinya $6,37 \times 10^6$ m?

Jawab:

Diketahui:

Jarak satelit dari permukaan Bumi $= \frac{1}{2} R$. Dengan demikian, jarak satelit ke pusat

Bumi adalah $r = 1\frac{1}{2} R$.

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

$$M = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$$

dengan memasukkan nilai G , M , dan R maka

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{GM}{\frac{3}{2}R}}$$
$$= \sqrt{(6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2) \left(\frac{5,97 \times 10^{24} \text{ kg}}{\frac{3}{2}(6,37 \times 10^6 \text{ m})} \right)}$$

$$= 6.455,57 \text{ m/s, dibulatkan menjadi } 6.456 \text{ m/s}$$

Jadi, satelit harus mengorbit dengan kecepatan 6.456 m/s.

5. Periode Satelit pada Orbitnya (Materi Pengayaan)

Apakah Anda masih ingat Hukum III Kepler? Kepler menyatakan bahwa kuadrat periode revolusi planet terhadap Matahari sebanding dengan pangkat tiga jarak planet tersebut dari Matahari. Konsep tersebut dapat diterapkan juga untuk satelit. Jadi, Anda dapat menentukan periode sebuah satelit dengan persamaan berikut.

$$\frac{T^2}{r^3} = k$$
$$T^2 = kr^3 \quad (2-31)$$

Oleh karena $k = \frac{4\pi^3}{GM}$ maka

$$T^2 = \frac{4\pi^3}{GM} r^3 \quad (2-32)$$

Keterangan:

T = periode orbit satelit (s)

G = konstanta gravitasi (Nm^2/kg^2)

M = massa Bumi (kg)

r = jarak satelit ke pusat Bumi (m)

Contoh 2.12

Periode Merkurius mengelilingi Matahari adalah 88 hari, sedangkan periode Bumi mengelilingi Matahari adalah 365 hari. Jika jarak Bumi ke Matahari adalah $1,5 \times 10^{11}$ m, tentukanlah jarak Merkurius ke Matahari.

Jawab:

Diketahui: $T_B = 365$ hari; $T_M = 88$ hari; $r_{BM} = 1,5 \times 10^{11}$ m



Tantangan untuk Anda

Geosynchronous satellite adalah istilah untuk satelit Bumi yang mengorbit pada daerah yang sama di ekuator Bumi. Dengan menggunakan pemahaman Anda, dapatkah Anda menduga bagaimana caranya satelit tersebut selalu mengorbit di tempat yang sama? Mengapa orbitnya harus berada di ekuator?



Kata Kunci

- kelajuan orbit
- konstanta gravitasi universal
- percepatan gravitasi
- periode orbit

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

$$T^2 \sim r^3$$

$$\frac{T_B^2}{T_M^2} = \frac{r_{BM}^3}{r_{MM}^3}$$

$$r_{MM} = \sqrt[3]{\frac{T_M^2}{T_B^2} r_{BM}^3} = r_{BM} \sqrt[3]{\frac{T_M^2}{T_B^2}} = \sqrt[3]{\frac{88^2}{365^2}} r_{BM} = 0,39 r_{BM}$$

$$= 0,39 (1,5 \times 10^{11} \text{ m}) = 5,8 \times 10^7 \text{ km} = 58 \text{ juta km.}$$

Jadi, jarak Merkurius ke Matahari adalah 58 juta km.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Dua buah bola masing-masing memiliki massa 1 kg dan 4 kg terpisah pada jarak 3 m. Tepat di antara dua bola tersebut terdapat sebuah bola ketiga yang bermassa 2 kg. Tentukan:
 - resultan gaya gravitasi yang bekerja pada bola ketiga;
 - letak atau posisi bola ketiga agar resultan gaya gravitasinya nol.
- Satelit dari planet Bumi memiliki periode 180 hari. Massa Bumi 6×10^{24} kg. Tentukanlah jari-jari orbit satelit tersebut.
- Percepatan gravitasi Bumi di permukaan Bumi adalah $9,8 \text{ m/s}^2$. Jika jari-jari Bumi $6,37 \times 10^6$ m, hitung massa jenis Bumi.
- Jari-jari planet Yupiter 11 kali jari-jari Bumi. Jika berat badan Made di Bumi 800 N, berapakah berat badannya di Yupiter?
- Sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian h meter di atas permukaan Bumi. Benda mencapai tanah dalam waktu 10 detik. Jika benda yang sama dijatuhkan pada ketinggian h di atas permukaan Bulan, hitung berapa waktu yang dibutuhkan untuk mencapai permukaan Bulan. (massa bulan $\frac{1}{81}$ massa Bumi dan jari-jari Bulan = 0,27 jari-jari Bumi)
- Seorang anak bermassa 40 kg berada di atas permukaan Bumi. Hitunglah massa anak itu pada ketinggian 10.000 m di atas permukaan Bumi. (Diketahui percepatan gravitasi Bumi = $9,8 \text{ m/s}^2$ dan jari-jari Bumi 6.370 km)
- Massa sebuah planet 5 kali massa Bumi, sedangkan jari-jarinya 2 kali jari-jari Bumi. Jika berat Sri di permukaan Bumi adalah 400 N, berapakah berat Sri di permukaan planet tersebut?
- Pada titik A (0, 0) dan B (4, 0) diletakkan titik massa sebesar 9 kg dan 16 kg. Sebuah benda C diletakkan di antara A dan B. Di manakah letak benda C ($m = 5$ kg) agar gaya tarik di C nol? (Satuan sistem koordinat dalam meter).
- Pada titik sudut segitiga samasisi dengan sisi 10 cm, ditempatkan benda dengan massa 2 kg, 5 kg, dan 3 kg. Tentukan gaya tarik gravitasi yang bekerja pada benda yang bermassa 3 kg.
- Tentukan periode sebuah satelit Bumi yang radius orbitnya sepertiga jarak antara Bulan dan Bumi. Nyatakan jawabannya dalam hari. (Rata-rata jarak Bulan ke Bumi adalah $3,84 \times 10^8$ m).

C. Elastisitas dan Gaya Pegas

Di SMP, Anda telah mempelajari sifat-sifat benda, walaupun dibatasi hanya pada wujudnya. Berdasarkan wujudnya, benda dibagi menjadi tiga macam, yaitu padat, cair, dan gas.

Benda padat adalah benda yang memiliki bentuk volume tetap, serta memiliki sifat elastis. *Elastisitas* adalah kemampuan benda untuk kembali ke bentuk semula ketika gaya yang bekerja pada benda tersebut diiadakan. Salah satu benda yang memiliki sifat elastis yang cukup tinggi adalah karet.

Selain memiliki sifat elastis, benda padat juga memiliki sifat plastis, yaitu ketika gaya yang bekerja pada benda ditiadakan maka benda tidak dapat kembali ke bentuk semula. Sifat plastis timbul jika gaya yang diberikan melebihi batas elastisitas benda. Beberapa contoh benda yang memiliki sifat plastis yang cukup besar, antara lain tanah lempung dan plastisin.

Kedua sifat elastis dan plastis tersebut dimiliki oleh setiap benda padat. Akan tetapi, kadar kedua sifat tersebut untuk setiap benda berbeda-beda. Karet memiliki sifat plastis yang sangat rendah dan sifat elastis yang sangat tinggi. Oleh karena itu, karet sangat cocok digunakan sebagai bahan pembuat ban kendaraan.

1. Tegangan dan Regangan

Untuk lebih memahami elastisitas suatu benda, perhatikan **Gambar 2.17 (a)**. Pada gambar tersebut terlihat seutas karet yang memiliki panjang mula-mula ℓ_0 . Karet tersebut ditarik dengan gaya sebesar F_1 sehingga karet mengalami pertambahan panjang sebesar $\Delta\ell_1$. Ketika tarikannya dilepas, karet kembali ke panjang semula. Ini berarti, karet masih berada dalam daerah elastisitasnya.

Kemudian, besar gaya tarikan pada karet diperbesar menjadi F_2 dan karet mengalami pertambahan panjang sebesar $\Delta\ell_2$. Ketika gaya tarikan dilepas, ternyata karet kembali ke panjang semula. Ini berarti, karet tersebut berada dalam daerah elastis. Setiap benda memiliki batas elastisitas tertentu, jika gaya yang diberikan pada benda melewati batas elastisitasnya, benda tersebut akan mengalami perubahan bentuk (deformasi). Jika besar gaya tarikan pada karet ini diperbesar lagi menjadi F_3 maka karet akan putus. Ini berarti, gaya tarikan pada karet telah mencapai titik putus. Untuk lebih jelasnya, silahkan Anda ulangi lagi membaca ilustrasi ini sambil melihat **Gambar 2.17(b)**.

Dalam pembahasan mengenai elastisitas, Anda akan menemukan pengertian *stress* (tegangan) dan *strain* (regangan). Gaya yang bekerja per satuan luas penampang disebut tegangan. Secara matematis, tegangan dapat ditulis sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-33)$$

Keterangan:

σ = tegangan atau stress (N/m^2)

F = besar gaya tarik (N)

A = luas penampang (m^2)

Perbandingan antara pertambahan panjang dan panjang mula-mula disebut *strain* atau regangan. Secara matematis, dapat ditulis sebagai berikut.

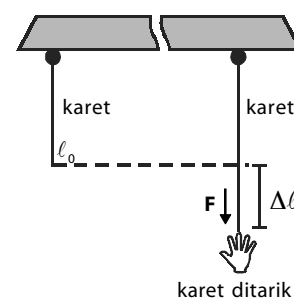
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad (2-34)$$

Keterangan:

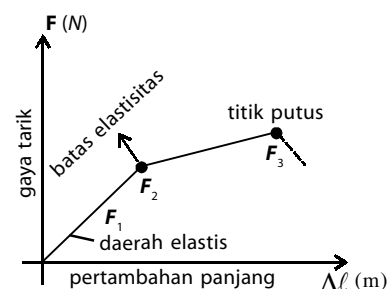
ε = regangan/*strain*

$\Delta\ell$ = pertambahan panjang (m)

ℓ_0 = panjang awal (m)



(a)



(b)

Gambar 2.17

(a) Besar gaya tarik F menyebabkan karet bertambah panjang.

(b) Grafik $F - \Delta\ell$ seutas karet yang ditarik dengan besar gaya F .

2. Modulus Elastisitas

Gantungkanlah sebuah karet ban sepanjang 60 cm dan sepotong kawat dengan panjang yang sama. Kemudian, berilah beban bermassa 200 g pada setiap benda tersebut. Apa yang dapat Anda amati dari aktivitas tersebut? Pertambahan panjang yang dialami karet ban dan kawat ternyata berbeda. Perbedaan tersebut disebabkan oleh perbedaan modulus elastisitas atau Modulus Young yang dimiliki kedua benda tersebut. Secara matematis, modulus elastisitas adalah perbandingan antara tegangan dan regangan yang dimiliki benda.

$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-35)$$

Dengan melakukan substitusi **Persamaan (2-33)** dan **Persamaan (2-34)** ke **Persamaan (2-35)** maka didapatkan persamaan:

$$Y = \frac{F \ell_o}{A \Delta \ell} \quad (2-36)$$

Keterangan: Y = modulus elastisitas atau modulus Young (N/m^2).

3. Hukum Hooke

Jika sebuah pegas diberi gangguan sehingga pegas merenggang (berarti pegas ditarik) atau merapat (berarti pegas ditekan), pada pegas akan bekerja gaya pemulih yang arahnya selalu menuju titik asal. Dengan kata lain, besar gaya pemulih pada pegas ini sebanding dengan gangguan atau simpangan yang diberikan pada pegas. Pernyataan tersebut dikenal dengan Hukum Hooke. Secara matematis, Hukum Hooke ditulis sebagai berikut.

$$F = k \Delta \ell \text{ atau } F = k \Delta x \quad (2-37)$$

Keterangan:

F = Besar gaya pemulih pegas (N)

k = Konstanta pegas (N/m)

$\Delta \ell = \Delta x$ = simpangan pada pegas (m)

Untuk lebih memahami besar konstanta elastisitas pegas k , lakukanlah kegiatan berikut ini.



Aktivitas Fisika 2.2

Hukum Hooke

Tujuan Percobaan

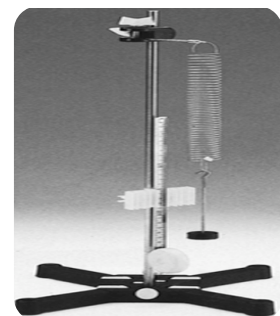
Menentukan konstanta elastisitas pegas

Alat-Alat Percobaan

1. Pegas
2. Statif
3. Penggaris
4. Ember kecil
5. Koin kecil bermassa 50 g sebanyak 10 buah
6. Neraca Ohaus

Langkah-Langkah Percobaan

1. Susunlah batang statif dan pegas seperti terlihat pada gambar.
2. Ukurlah panjang mula-mula pegas tersebut.
3. Timbanglah berat ember dengan neraca Ohaus.
4. Gantungkan ember kecil dan sebuah koin bermassa 50 g.
5. Catatlah panjang pegas tersebut pada tabel data pengamatan.
6. Ulangi langkah pada poin ke-3 dengan 2 keping koin, 3 keping koin, dan seterusnya sampai 10 keping koin.



7. Ulangi langkah pada poin ke-4 untuk setiap penambahan koin.
8. Dari data tersebut, buatlah grafik plot dan grafik garis lurus $F - \Delta x$.
9. Hitunglah nilai konstanta pegas k dari grafik tersebut.

Contoh 2.13

Seutas kawat panjangnya 50 cm dan luas penampangnya 2 cm². Sebuah gaya 50 N bekerja pada kawat tersebut sehingga kawat bertambah panjang menjadi 50,8 cm. Hitunglah:

- a. regangan (*strain*) kawat;
- b. tegangan (*stress*) kawat; dan
- c. modulus elastisitas kawat.

Jawab:

Diketahui:

$$\ell = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$$

$$\Delta \ell = 0,8 \text{ cm} = 8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$F = 50 \text{ N}$$

$$A = 2 \text{ cm}^2 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

- a. Regangan:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} = \frac{8 \times 10^{-3} \text{ m}}{5 \times 10^{-1} \text{ m}} = 1,6 \times 10^{-2}$$

- b. Tegangan:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{50 \text{ N}}{2 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 2,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

- c. Modulus elastisitas:

$$Y = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{2,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{1,6 \times 10^{-2}} = 1,6 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

Jadi, besar regangan, tegangan, dan modulus elastisitas batang tersebut berturut-turut adalah $1,6 \times 10^{-2}$; $2,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; dan $1,6 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

4. Susunan Beberapa Pegas

Tahukah Anda beberapa penggunaan pegas dalam kehidupan sehari-hari? Alat-alat yang Anda gunakan, mulai dari alat sederhana sampai alat yang menggunakan teknologi modern banyak menggunakan pegas. Jika Anda menggunakan bolpoin mekanik, Anda akan menemukan pegas di dalamnya. Pegas dalam bolpoin mekanik berfungsi untuk mengatur keluar masuknya mata bolpoin. Dalam bidang otomotif, pegas pun banyak digunakan. Anda akan menemukan pegas pada sepeda motor ataupun mobil. Pegas pada sepeda motor dan mobil dikenal dengan nama *shockbreaker*. Tahukah Anda fungsi *shockbreaker* pada sepeda motor atau mobil? Perhatikanlah **Gambar 2.18**.



(a)

(b)

Sumber: Dokumentasi Penerbit

Gambar 2.18

- (a) Sepeda motor yang menggunakan *monoshockbreaker*
- (b) Sepeda motor yang menggunakan *double shockbreaker*

Shockbreaker pada sepeda motor ada yang menggunakan sistem *monoshockbreaker* dan *double shockbreaker*. Menurut Anda, sistem manakah yang dapat memberikan kenyamanan bagi pengendara sepeda motor, sistem *monoshockbreaker* atau *double shockbreaker*? Adakah hubungannya dengan gaya yang bekerja pada setiap *shockbreaker* tersebut?

Sepeda motor yang menggunakan sistem *monoshockbreaker* dapat dianalogikan dengan sistem satu pegas dan satu beban, sedangkan sistem *double shockbreaker* dapat dianalogikan dengan sistem dua pegas yang disusun secara paralel dengan satu beban. Bagaimanakah perhitungan gaya dan konstanta pegas pada kedua sistem pegas tersebut? Berikut ini akan dibahas tentang sistem pegas yang disusun secara seri, paralel, dan seri-paralel.

a. Pegas Disusun secara Seri

Perhatikan **Gambar 2.19**. Dua buah pegas disusun secara seri dan setiap pegas memiliki konstanta pegas k_1 dan k_2 . Jika pada ujung pegas yang disusun seri tersebut diberi gaya F , kedua pegas tersebut akan menerima gaya yang sama, yaitu F . Dari pegas 1 dan pegas 2, akan diperoleh persamaan

$$F = k_1 \Delta x_1 = k_2 \Delta x_2$$

Pertambahan panjang pegas total Δx sama dengan $\Delta x_1 + \Delta x_2$ sehingga pada pegas yang disusun seri berlaku:

$$\frac{F}{k_s} = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

$$\frac{F}{k_s} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2}$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

$$k_s = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (2-38)$$

Keterangan: k_s adalah konstanta pegas untuk pegas yang disusun seri.

b. Pegas Disusun secara Paralel

Dua buah pegas disusun secara paralel seperti pada **Gambar 2.20**, setiap pegas memiliki konstanta k_1 dan k_2 . Jika pada ujung pegas yang tersusun secara paralel tersebut diberikan gaya F , besar gaya F dibagi menjadi dua pada kedua pegas tersebut, misalnya F_1 dan F_2 .

$$F_1 = k_1 \Delta x_1 = k_1 \Delta x$$

$$F_2 = k_2 \Delta x_2 = k_2 \Delta x$$

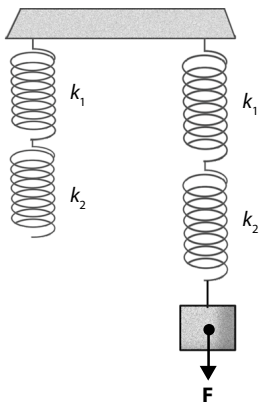
Pada pegas yang disusun paralel berlaku:

$$F = F_1 + F_2$$

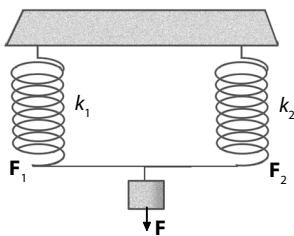
$$k_p \Delta x_p = k_1 \Delta x + k_2 \Delta x_2$$

Pertambahan panjang pegas total sama dengan pertambahan panjang setiap pegas, atau $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_p$ sehingga persamaan konstanta pegas paralel menjadi

$$k_p = k_1 + k_2 \quad (2-39)$$



Gambar 2.19
Pegas disusun seri.



Gambar 2.20
Pegas disusun paralel.

Dengan demikian, pada sepeda motor yang menggunakan sistem *double shockbreaker* terjadi pembagian gaya oleh kedua *shockbreaker*, sedangkan pada sistem *monoshockbreaker* gaya hanya bekerja pada satu *shockbreaker*.



Tantangan untuk Anda

Sepeda motor keluaran terbaru banyak yang menggunakan sistem *monoshockbreaker*. Menurut Anda, apakah hal tersebut ada hubungannya dengan tingkat kenyamanan sepeda motor tersebut? Selain itu, apakah permukaan jalan yang dilalui oleh sepeda motor akan memengaruhi gaya yang bekerja pada pegas (*shockbreaker*) sepeda motor?

Contoh 2.14

Tiga buah pegas disusun seri, setiap pegas memiliki konstanta pegas sebesar 1.200 N/m, 600 N/m, dan 400 N/m. Ketiga pegas tersebut diberi gaya sebesar 40 N. Berapakah k total pegas-pegas tersebut?

Jawab:

Diketahui:

$$k_1 = 1.200 \text{ N/m}; \quad k_2 = 600 \text{ N/m}; \quad k_3 = 400 \text{ N/m}.$$

$$\frac{1}{k_{\text{total}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} = \frac{1}{1.200} + \frac{1}{600} + \frac{1}{400} = \frac{1+2+3}{1.200}$$

$$k_{\text{total}} = 200 \text{ N/m}.$$

Jadi, besar k total pegas tersebut adalah 200 N/m.

Contoh 2.15

Dua buah pegas disusun secara paralel, setiap pegas memiliki konstanta pegas 200 N/m. Jika pada susunan paralel pegas tersebut diberi gaya berat 20 N, hitunglah pertambahan panjang pegas.

Jawab:

Diketahui: $F = 20 \text{ N}$

$$k_1 = 200 \text{ N/m}$$

$$k_2 = 300 \text{ N/m}$$

$$k_3 = 20 \text{ N/m}$$

$$k_{\text{total}} = k_1 + k_2 = 200 \text{ N/m} + 300 \text{ N/m} = 500 \text{ N/m}$$

$$F = k_{\text{total}} \Delta x$$

$$20 \text{ N} = 500 \text{ N/m} (\Delta x)$$

$$\Delta x = 0,04 \text{ m} = 4 \text{ cm}$$

Jadi, pertambahan panjang pegas tersebut sebesar 4 cm.

c. Pegas Disusun secara Paralel-Seri

Tiga buah pegas disusun secara paralel-seri seperti pada **Gambar 2.21**, setiap pegas memiliki konstanta pegas k_1 , k_2 , dan k_3 . Pada ujung pegas yang tersusun secara paralel-seri tersebut diberikan gaya sebesar F .

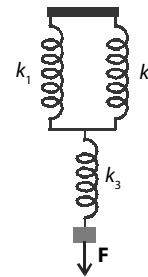
Dengan menggunakan rumusan konstanta pegas pada susunan seri dan susunan paralel, konstanta pegas total dapat ditentukan. Caranya dengan menyederhanakan susunan pegas pada **Gambar 2.21**.

Pertama, konstanta pegas k_1 dan k_2 dianggap menjadi pegas susunan paralel tanpa gangguan dari pegas ke-3. Oleh karena itu, persamaan konstanta pegas k_1 dan k_2 menjadi

$$k_p = k_1 + k_2$$

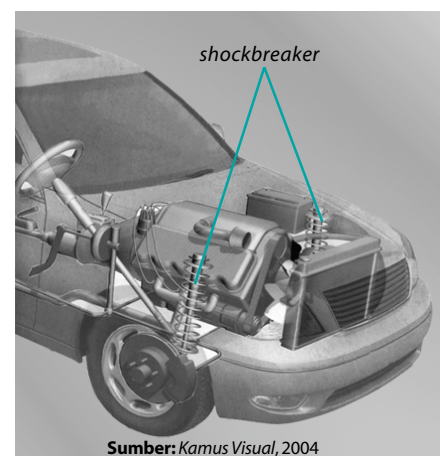
Kemudian, nilai konstanta pegas tersebut digabungkan secara seri dengan pegas ke-3 sehingga

$$\frac{1}{k_{\text{seri}}} = \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_3} \quad \text{atau} \quad k_{\text{seri}} = \frac{k_p k_3}{k_p + k_3} \quad (2-40)$$



Gambar 2.21

Susunan pegas secara paralel-seri.



Sumber: Kamus Visual, 2004

Gambar 2.22

Sistem pegas yang digunakan pada *shockbreaker* mobil. Dapatkah Anda memperhitungkan gaya yang bekerja pada setiap *shockbreaker*?

Tugas Anda 2.6

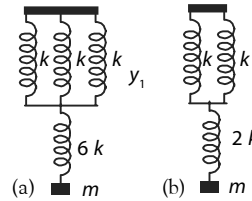
Jika *shockbreaker* motor mulai terasa tidak nyaman, *shockbreaker* tersebut dapat direparasi di bengkel. Diskusikanlah bersama teman Anda menurut tinjauan Fisika, apa yang dilakukan teknisi bengkel untuk mereparasi *shockbreaker* tersebut?

Kata Kunci

- gaya pulih
- konstanta pegas
- regangan
- susunan paralel
- susunan seri
- tegangan

Contoh 2.16

Tentukan nilai perbandingan periode susunan pegas pada **Gambar (a)** dan **Gambar (b)** jika massa bebannya sama, yaitu m .



Jawab:

Susunan pegas pada **Gambar (a)** terdiri atas tiga buah pegas yang disusun paralel, $k_p = k + k + k = 3k$. Jadi, $k_p = 3k$.

Susunan seri dengan pegas $6k$ maka $k_s = \frac{k_p(6k)}{k_p + 6k} = \frac{(3k)(6k)}{3k + 6k} = 2k$ atau $k_s = 2k$.

Susunan pegas pada **Gambar (b)**, merupakan pegas yang disusun secara paralel atau $k_p = k + k = 2k$. Jadi, $k_p = 2k$.

Susunan seri dengan pegas $2k$ adalah $k_s = \frac{(k_p)(2k)}{k_p + 2k} = \frac{(2k)(2k)}{2k + 2k} = 1k$ atau $k_s = k$.

Perbandingan periode susunan pegas pada **Gambar (a)** dan susunan pegas pada **Gambar (b)** adalah

$$T_a : T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_a}} : 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_b}}$$

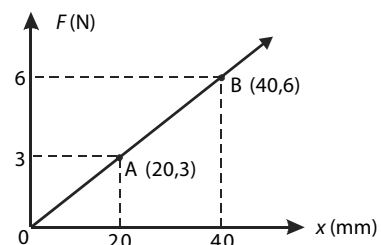
$$T_a : T_b = \sqrt{\frac{1}{k_a}} : \sqrt{\frac{1}{k_b}} = \sqrt{\frac{1}{2k}} : \sqrt{\frac{1}{k}}$$

Jadi, $T_a : T_b = 1 : \sqrt{2}$

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah balok besi bermassa 10 kg digantungkan pada sebuah kawat logam berdiameter 0,2 cm dan panjang 50 cm. Akibatnya, kawat logam tersebut memanjang sejauh 0,02 cm. Hitunglah tegangan, regangan, dan modulus elastisitas kawat tersebut.
2. Diketahui modulus Young timah $1,6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$. Hitunglah berat beban maksimum yang boleh digantungkan pada seutas kawat timah yang berdiameter 10 mm, jika regangan yang terjadi tidak boleh lebih dari 0,001.
3. Perhatikanlah grafik hasil eksperimen berikut. Grafik tersebut menunjukkan gaya yang diberikan pada sebuah pegas dalam satuan N (pada sumbu- y) sebanding dengan pertambahan panjangnya dalam satuan mm (pada sumbu- x) sehingga menghasilkan sebuah persamaan garis lurus. Jika pada garis tersebut terdapat titik A (20, 3) dan titik B (40, 6), tentukan besar konstanta gaya pegas tersebut.



4. Sebuah benda bermassa 0,5 kg digantungkan pada sebuah pegas sehingga pegas tersebut bertambah panjang 5 cm. Hitunglah konstanta pegas tersebut. ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
5. Diketahui modulus elastisitas besi adalah $2,1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Jika sebuah balok besi dengan luas penampang 4 cm^2 dan panjang 100 cm ditarik dengan gaya sebesar 10 N, tentukan pertambahan panjang kawat dan tetapan gaya kawat tersebut.
6. Tiga buah pegas identik disusun secara paralel. Jika konstanta setiap pegas $k = 100 \text{ N/m}$, hitunglah pertambahan panjang total sistem pegas setelah diberi beban yang beratnya 30 N.

7. Jika sebuah benda bermassa 1,25 kg ditimbang dengan neraca pegas, pegas akan menyimpang 5 cm. Tentukan besar konstanta pegas dari neraca pegas tersebut. (diketahui $g = 10 \text{ m/s}^2$)
8. Sebuah pegas memiliki konstanta pegas sebesar $k = 400 \text{ N/m}$. Saat beban bermassa 10 kg digantungkan pada ujung pegas, ternyata panjang pegas menjadi 85 cm. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah panjang pegas mula-mula?
9. Sebuah pegas panjangnya 42 cm jika dibebani benda seberat 40 N, dan panjangnya 44 cm jika dibebani benda seberat 80 N. Hitunglah konstanta pegas tersebut.
10. Terdapat 5 buah pegas identik dengan konstanta setiap pegas adalah $k = 50 \text{ N/m}$. Tentukan pertambahan panjang total sistem pegas setelah diberi beban 0,25 kg, jika setiap pegas disusun secara:
 - a. seri dan
 - b. paralel dengan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

D. Gerak Harmonik Sederhana

Sebuah benda dikatakan bergerak harmonik jika benda tersebut melakukan gerak secara bolak-balik di sekitar titik kesetimbangan, misalnya ayunan sederhana yang banyak dijumpai di arena bermain Taman Kanak-Kanak. Gerak bolak-balik sebuah ayunan terus berlangsung jika diberi gaya dorong secara berkelanjutan untuk melawan gaya gesek. Gerak bolak-balik pada ayunan disebut juga gerak harmonik sederhana. Ayunan akan berhenti di titik kesetimbangan. Jika gerakan bolak-balik tersebut berlangsung dalam selang waktu yang sama, gerak tersebut dinamakan gerak periodik. Dalam bab ini, Anda akan membahas gerak harmonik sederhana dengan mengabaikan adanya gesekan yang terjadi.

Contoh gerak harmonik sederhana dapat Anda lihat pada ayunan bandul sederhana atau getaran pada pegas. Baik getaran pegas atau gerakan bolak-balik pada bandul sederhana, arahnya selalu menuju titik kesetimbangan.

1. Simpangan Gerak Harmonik Sederhana

Perhatikan **Gambar 2.23**. Sebuah titik bergerak melingkar beraturan. Jika waktu yang diperlukan untuk berpindah dari posisi P_0 ke posisi P adalah t , besar sudut yang ditempuh titik itu adalah $\theta = \omega t = 2\pi f t = \left(\frac{2\pi}{T}\right) t$.

Proyeksi titik P terhadap sumbu- y adalah P_y dan proyeksi titik P terhadap sumbu- x adalah P_x , sedangkan OP adalah jari-jari lingkaran R . Jika Anda perhatikan proyeksi titik P pada sumbu- y , proyeksi tersebut memiliki simpangan maksimum A yang disebut amplitudo. Besar proyeksi di titik P pada sumbu- y dapat ditulis

$$Y = A \sin \omega t = A \sin 2\pi f t \quad (2-41)$$

Jika titik awal bergerak mulai dari θ_0 , **Persamaan (2-41)** dapat ditulis

$$Y = A \sin (\omega t + \theta_0) = A \sin (2\pi f t + \theta_0) \quad (2-42)$$

Keterangan:

Y = simpangan (m)

f = frekuensi (Hz)

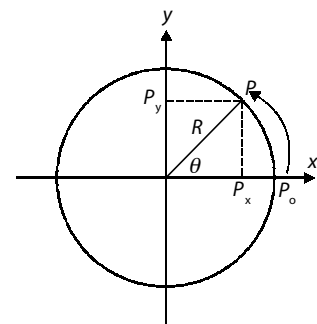
A = amplitudo (m)

θ_0 = sudut awal (rad)

t = waktu (sekon)

ω = frekuensi sudut (rad/s)

Besar sudut yang ditempuh sebuah titik dalam fungsi sinus disebut *sudut fase*. Besar sudut fase adalah $\theta = \omega t + \theta_0 = \frac{2\pi t}{T} + \theta_0$. Jika $\theta = 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi}\right) = 2\pi\varphi$ di mana φ adalah fase getaran, persamaan fase getarannya



Gambar 2.23

Sebuah titik bergerak dari posisi P_0 ke posisi P .



Informasi untuk Anda

Suatu ketika ayunan sebuah lampu yang tergantung tali panjang pada sebuah bangunan di Pisa diamati oleh Galileo. Hal tersebut memberikan inspirasi kepadanya bahwa periode sebuah bandul tidak bergantung pada amplitudonya.

Information for You

One time Galileo saw a lamp swung over time. It was hang by a long rope and tight to an old building in Pisa. That phenomenon became something that has inspired him for a thought that pendulum's period was not depend on its amplitud.



Tokoh

Willems Gravesande (1688–1742)



Sumber: research.leidenuniv.nl

Ilmuwan Belanda, **Willems Gravesande** (1688–1742) membuat beberapa perkakas untuk melakukan percobaan merangkai gerak. Ia juga membuat peralatan untuk mengamati mengapa pegas yang ditekan dapat menggerakkan benda-benda lain, begitu tekanannya dilepaskan. Terungkap bahwa energi potensial tersimpan di dalam benda, seperti pegas yang menjadi energi gerak, kemudian menyebabkan benda bergerak.

$$\varphi = \frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi} \quad (2-43)$$

Sebuah titik yang bergerak harmonik sederhana berpindah dari t_1 memiliki fase $\varphi_1 = \frac{t_1}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi}$ dan pada saat t_2 memiliki fase $\varphi_2 = \frac{t_2}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi}$, maka beda fase t_2 dan t_1 untuk $t_2 > t_1$ adalah

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{t_2 - t_1}{T} \quad (2-44)$$

Pada gerak harmonik sederhana, beda fase dinyatakan oleh angka dari nol sampai dengan satu. Beda fase untuk bilangan bulat tidak perlu disertakan, misalnya $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$, $3\frac{1}{2}$; dan seterusnya, cukup ditulis beda fasenya adalah $\frac{1}{2}$ saja. Posisi benda (titik) dikatakan sefase jika beda fasenya nol (0), dan berlawanan fase jika beda fasenya setengah ($\frac{1}{2}$). Secara matematis, dapat ditulis sebagai berikut.

Sefase: $\Delta\varphi = 0, 1, 2, 3, \dots$
atau $\Delta\varphi = n \quad (2-45)$

Berlawanan fase: $\Delta\varphi = \frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}, \dots$

atau $\Delta\varphi = n + \frac{1}{2} \quad (2-46)$

Keterangan: n adalah bilangan cacah 0, 1, 2, 3, dan seterusnya.

2. Kecepatan Gerak Harmonik

Kecepatan gerak harmonik sederhana merupakan turunan pertama dari persamaan posisi terhadap waktu. Benda pada awalnya bergerak $\theta_0 = 0$ maka nilai kecepatannya adalah $v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} (A \sin \omega t)$.

$$v_y = \omega A \cos \omega t \quad (2-47)$$

Nilai v_y akan mencapai maksimum jika nilai $\cos \omega t = 1$ sehingga nilai maksimum dari $v_y = \omega A$. Jadi, kecepatan maksimum memenuhi persamaan berikut.

$$v_m = \omega A \quad (2-48)$$

Dari Persamaan (2-47) dan (2-48) akan diperoleh:

$$v_y = v_m \cos \omega t \quad (2-49)$$

Kecepatan di sembarang posisi sebuah titik yang bergerak harmonik adalah $Y = A \sin \omega t$; $Y^2 = A^2 \sin^2 \omega t$; $Y^2 = A^2 (1 - \cos^2 \omega t)$. Dengan melakukan substitusi dari Persamaan (2-48) dan (2-49) ke dalam persamaan $Y^2 = A^2 (1 - \cos^2 \omega t)$, diperoleh

$$v_y = \omega \sqrt{A^2 - Y^2} \quad (2-50)$$

Keterangan:

- v_y = kecepatan terhadap sumbu-y (m/s)
- A = amplitudo (m)
- ω = frekuensi sudut (rad/s)
- Y = simpangan (m)

3. Percepatan Gerak Harmonik Sederhana

Seperti penjelasan percepatan pada gerak lurus sebelumnya, diketahui bahwa percepatan sesaat gerak harmonik sederhana suatu getaran juga merupakan turunan pertama dari persamaan kecepatan getaran, dan ditulis sebagai $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d}{dt} (\omega A \cos \omega t)$.

$$a_y = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 Y \quad (2-51)$$

Dari **Persamaan (2-51)**, simpangan Y bertanda negatif (-), artinya kecepatan arah a_y menuju sumbu Y positif. Sebaliknya, pada saat simpangan Y ke sumbu positif, arah percepatan a_y menuju ke sumbu Y negatif. Untuk lebih jelasnya, perhatikan **Gambar 2.24**.

Menurut Hukum II Newton, arah percepatan a_y sama dengan arah gaya pemulih (gaya yang selalu menuju titik keseimbangan). Sama halnya dengan kecepatan maksimum, nilai percepatan a_y akan maksimum jika $\sin \omega t = 1$ atau $\omega t = \frac{\pi}{2}$ rad. Jadi, persamaan percepatan maksimum gerak harmonik adalah

$$a_m = \omega^2 A \quad (2-52)$$

Keterangan:

a_m = percepatan maksimum (m/s^2)

ω = frekuensi sudut (rad/s)

A = amplitudo (m)

Pada **Gambar 2.25** terlihat tiga buah grafik, yaitu grafik simpangan y terhadap waktu t , grafik kecepatan v_y terhadap waktu t , dan grafik percepatan a_y terhadap waktu t . Pada saat $t = 0$, grafik simpangan y menunjukkan harga minimum ($y = 0$ di titik setimbang). Grafik kecepatan v_y menunjukkan harga maksimum ($v_m = \omega A$), dan grafik percepatan a_y menunjukkan harga minimum. Sebaliknya, pada saat nilai simpangan mencapai maksimum ($Y = A$), nilai kecepatan minimum ($v_y = 0$), dan nilai percepatan akan maksimum ($a_{\text{maks}} = \omega^2 A$).

Contoh 2.17

Sebuah benda melakukan gerak harmonik sederhana sepanjang sumbu- y . Persamaan simpangannya dinyatakan sebagai $Y = 2 \sin \left(\pi t + \frac{1}{6} \pi \right)$ dengan Y dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan:

- amplitudo, frekuensi, dan periode geraknya
- persamaan percepatan dan kecepatan
- simpangan, kecepatan, dan percepatan pada saat $t = 2$ sekon
- kecepatan maksimum dan percepatan maksimum

Jawab:

- Persamaan simpangan gerak harmonik sederhana, yaitu $Y = A \sin (\omega t + \theta_0)$.

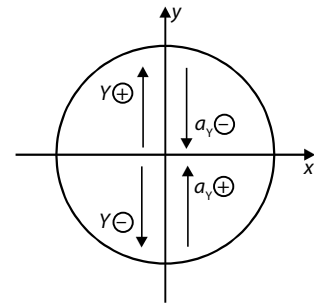
Bandingkan dengan persamaan simpangan $Y = 2 \sin \left(\pi t + \frac{1}{6} \pi \right)$, diperoleh $A = 2$ m dan $\omega = \pi$ rad/s, maka

$$2\pi f = \pi \text{ atau } f = \frac{1}{2} \text{ Hz} = 0,5 \text{ Hz dan } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ sekon}$$

- Persamaan kecepatan v_y dan persamaan percepatan a_y akan diperoleh

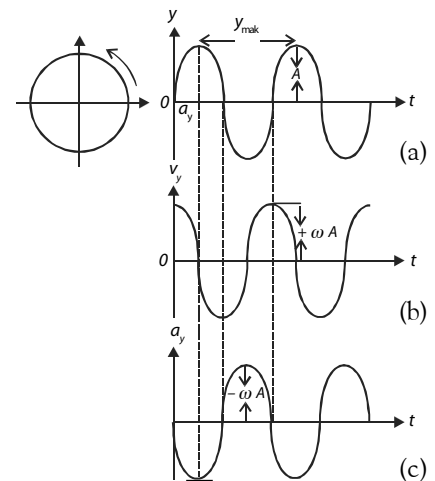
$$v_y = \frac{dY}{dt} = \frac{d}{dt} \left[2 \sin \left(\pi t + \frac{\pi}{6} \right) \right] = 2\pi \cos \left(\pi t + \frac{\pi}{6} \right) \text{ m/s}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d}{dt} \left[2\pi \cos \left(\pi t + \frac{\pi}{6} \right) \right] = -2\pi^2 \sin \left(\pi t + \frac{\pi}{6} \right) \text{ m/s}^2$$



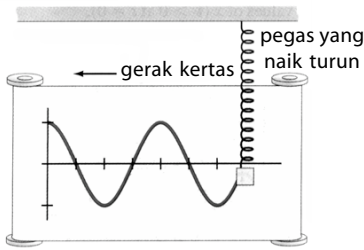
Gambar 2.24

Arah simpangan Y dan percepatan a_y pada gerak harmonik sederhana selalu berlawanan.



Gambar 2.25

Grafik gerak harmonik sederhana: (a) simpangan terhadap waktu, (b) kecepatan terhadap waktu, dan (c) percepatan terhadap waktu.



Gambar 2.26

Percobaan untuk menghasilkan grafik simpangan terhadap waktu.

c. Pada saat $t = 2$ sekon maka

$$Y = 2 \sin\left(2\pi + \frac{\pi}{6}\right) = 2 \sin 390^\circ = 1 \text{ m}$$

$$v_y = 2\pi \cos\left(2\pi + \frac{\pi}{6}\right) = 2\pi \cos 390^\circ = 5,44 \text{ m/s}$$

$$a_y = -2\pi^2 \sin\left(2\pi + \frac{\pi}{6}\right) = 19,72 \sin 390^\circ = 9,86 \text{ m/s}^2$$

d. Dari persamaan simpangan pada butir (a), diperoleh

$$v_m = \omega A = 2\pi f A = 6,28 \text{ m/s.}$$

$$a_m = \omega^2 A = 4\pi^2 f^2 A = 19,72 \text{ m/s}^2.$$

4. Periode dan Frekuensi pada Gerak Harmonik

Besar simpangan gerak harmonik sederhana pada pegas dan bandul, dapat ditentukan dengan mengamati gerak bolak-balik pada getaran pegas dan ayunan sederhana. Anda akan memperoleh periode getaran (T) dan frekuensi (f). Periode getaran adalah waktu yang diperlukan beban untuk melakukan satu kali gerak bolak-balik (getaran). Frekuensi getaran adalah banyaknya gerak bolak-balik yang dapat dilakukan dalam waktu satu sekon.

Periode yang dilakukan oleh sebuah benda pada **Gambar 2.27** adalah waktu yang dibutuhkan benda untuk bergerak dari $A-O-B-O-A$. Pada **Gambar 2.27 (a)**, beban ditarik sehingga pegas memanjang sampai ke titik A . Pada ayunan beban (**Gambar 2.27 (b)**), gerak benda menyimpang hingga titik A . Ketika dilepas, beban bergerak menuju titik kesetimbangan dan melewatinya sampai di titik B .

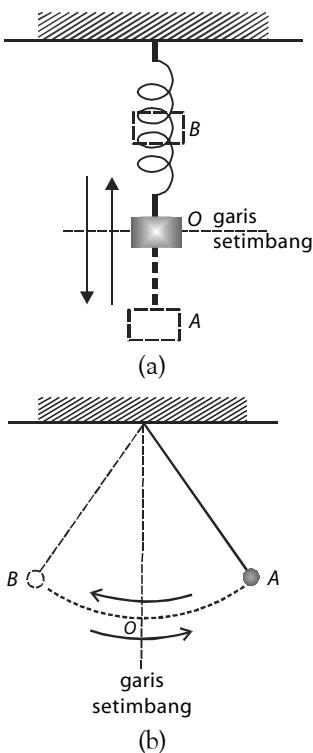
Kemudian, beban bergerak kembali ke titik semula, yaitu titik A setelah melewati titik kesetimbangan untuk kedua kalinya di titik O . Jadi, berdasarkan pengamatan, waktu yang dibutuhkan beban untuk melakukan satu kali getaran pada pegas atau satu kali ayunan pada bandul disebut *periode* (T), sedangkan frekuensi berbanding terbalik dengan periode. Secara matematis, ditulis

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{atau} \quad f = \frac{1}{T} \quad (2-53)$$

Keterangan:

T = periode (sekon)

f = frekuensi (hertz = Hz)



Gambar 2.27

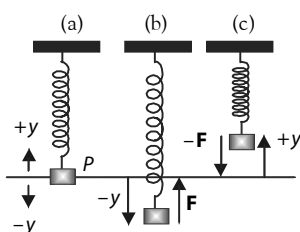
Periode dan frekuensi pada (a) pegas, (b) bandul, dapat ditentukan dari besar simpangannya.

5. Gaya Pemulih pada Pegas dan Bandul

Dalam gerak harmonik sederhana, bekerja resultan gaya yang arahnya selalu menuju titik kesetimbangan, gaya ini disebut *gaya pemulih*, besarnya berbanding lurus dengan posisi benda terhadap titik kesetimbangan.

Perhatikan **Gambar 2.28**. Pegas dalam tiga kedudukan, mula-mula benda pada posisi setimbang di P , kemudian ditarik ke bawah sejauh $-y$, lalu benda dilepaskan. Bersamaan dengan saat pegas ditarik, bekerja sebuah gaya F vertikal ke atas bertanda positif dan benda melewati titik kesetimbangan hingga mencapai titik tertinggi $+y$, pada posisi tersebut benda berhenti sesaat ($v = 0$). Pada posisi ini pula, pada benda bekerja gaya pemulih F vertikal ke bawah menuju titik kesetimbangan. Untuk kedua kalinya, benda akan menuju titik terendah lagi.

Pada saat posisi terendah, kecepatan benda kembali bernilai minimum ($v = 0$). Demikian seterusnya, gerak harmonik pada pegas berlangsung secara berulang-ulang. Jadi, gerak harmonik pada pegas adalah



Gambar 2.28

Arah gaya pemulih pada pegas selalu berlawanan tanda dengan simpangan.

gerak yang berulang akibat gaya pemulih yang arahnya selalu menuju titik kesetimbangan. Besar gaya pemulih sebanding dengan jarak benda ke titik setimbang y . Secara matematis, gaya pemulih pada pegas ditulis

$$F = ky \text{ (notasi skalar)}$$

$$F = -k \cdot y \text{ (notasi vektor)} \quad (2-54)$$

Gaya pemulih selalu berlawanan arah dengan arah simpangan. Ketika arah benda ke bawah, gaya pemulih ke atas. Demikian juga saat benda bergerak ke atas, arah gaya pemulih adalah vertikal ke bawah.

Sebuah bandul bermassa m dihubungkan dengan seutas tali yang panjangnya l seperti tampak pada **Gambar 2.29**. Bandul ditarik sejauh s sehingga membentuk sudut θ . Pada bandul bekerja dua gaya, yaitu gaya tegangan tali T dan gaya berat bandul (mg) yang arahnya vertikal ke bawah. Komponen gaya berat (mg) yang bekerja pada bandul adalah $mg \cos \theta$. Gaya ini selalu seimbang terhadap gaya tegang tali T sehingga bandul bergerak tetap pada lintasannya. Komponen gaya lainnya adalah $mg \sin \theta$. Gaya tersebut selalu menuju titik kesetimbangan ayunan dan tegak lurus terhadap tegangan tali. Gaya yang arahnya selalu menuju titik kesetimbangan adalah gaya pemulih. Besar gaya pemulih pada ayunan sederhana dapat dinyatakan dengan persamaan

$$F = -m g \sin \theta \quad (2-55)$$

Keterangan:

F = besar gaya pemulih (N)

g = besar percepatan gravitasi (m/s^2)

m = massa benda (kg)

θ = sudut simpangan

a. Periode Gerak Harmonik pada Pegas

Periode getaran pada pegas dapat ditentukan dengan menggunakan Hukum II Newton, yaitu $F = ma_y$ dengan nilai percepatan gerak benda $a_y = -\omega^2 y$. Gaya pemulih pada pegas adalah $F = -k \cdot y$ sehingga jika dieliminasi antara persamaan Hukum II Newton dan persamaan gaya pemulih, diperoleh

$$k \cdot y = m a_y \Rightarrow k y = m (-\omega^2 y)$$

$$k = m \omega^2 \Rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Oleh karena kecepatan sudut $\omega = \frac{2\pi}{T}$ maka

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2-56)$$

Frekuensi pegas berbanding terbalik dengan periode pegas sehingga besar frekuensi pegas dinyatakan dengan persamaan

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-57)$$

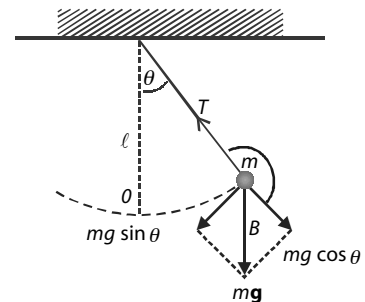
Keterangan:

f = frekuensi getaran pegas (Hz)

m = massa beban (kg)

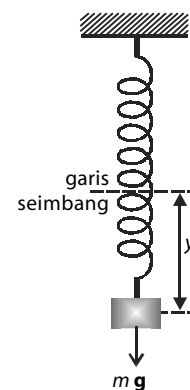
T = periode (sekon)

k = tetapan pegas (N/m)



Gambar 2.29

Gaya pemulih pada ayunan selalu menuju titik kesetimbangan.



Gambar 2.30

Sebuah pegas ditarik hingga merenggang sejauh y .

b. Periode Ayunan Bandul Sederhana

Ayunan bandul sederhana memiliki besar gaya pemulih $F = -mg \sin \theta$.

Jika sudut θ mendekati nol, nilai $\sin \theta = \frac{y}{\ell}$ mendekati $\frac{y}{\ell}$. Dari Hukum II Newton, besar $F = m a_y$ sehingga akan diperoleh periode ayunan bandul sederhana sebagai berikut.

$$F = -m g \sin \theta$$

$$m a_y = -m g \frac{y}{\ell}$$

Oleh karena $a_y = -\omega^2 y$ maka $-\omega^2 y = -g \frac{y}{\ell} \Rightarrow \omega^2 = \frac{g}{\ell}$ atau $\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$.

Dengan $\omega = \frac{2\pi}{T}$, didapat $\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$ sehingga

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad (2-58)$$

Keterangan:

T = periode gerak bandul (s)

g = besar percepatan gravitasi (m/s^2)

ℓ = panjang tali (m)

Untuk lebih memahami periode pada bandul sederhana, lakukanlah aktivitas berikut.

Ingatlah

Gerak harmonik sederhana pada ayunan bandul akan terjadi jika besar sudut simpangan ayunan kurang dari atau sama dengan 15° karena pada sudut-sudut tersebut nilai $\sin \theta = \tan \theta$.

Aktivitas Fisika 2.3

Gerak Harmonik Sederhana

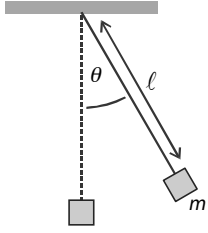
Tujuan Percobaan
Mengamati pengaruh panjang tali dan massa bandul terhadap periode getaran atau frekuensi getar pada gerak harmonik sederhana.

Alat-Alat Percobaan

1. Tiga buah anak timbangan, masing-masing 50 g, 100 g, dan 200 g
2. Benang secukupnya

Langkah-Langkah Percobaan

1. Rangkai alat seperti pada gambar di samping. Panjang tali yang digunakan $\ell = 50$ cm dan massa anak timbangannya $m = 50$ g.
2. Berikan sudut simpangan pada anak timbangan sebesar $\theta = 15^\circ$ atau kurang, lalu lepaskan. Hitung periode dan frekuensinya untuk getaran selama 10 sekon.
3. Lakukan langkah 1 sampai 2 untuk massa anak timbangan 100 g dan 200 g.
4. Dari langkah 1–3, kesimpulan apa yang Anda peroleh tentang pengaruh massa bandul terhadap perioda atau frekuensi getar pada gerak harmonik sederhana?
5. Lakukan langkah 1–3 dengan massa bandul tetap $m = 100$ g dan panjang tali ℓ bervariasi, yaitu 50 cm, 75 cm, dan 100 cm.
6. Dari langkah 5, kesimpulan apa yang Anda peroleh tentang pengaruh panjang tali terhadap perioda atau frekuensi getar pada gerak harmonik sederhana?
7. Diskusikan bersama guru dan teman Anda, mengapa sudut simpangan yang digunakan pada gerak harmonik sederhana harus $\leq 15^\circ$?



Contoh 2.18

Jika periode ayunan bandul sederhana yang panjangnya 160 cm adalah 2,55 sekon, tentukan besar percepatan gravitasi di lokasi ayunan tersebut.

Jawab:

Diketahui:

panjang tali (ℓ) = 160 cm = 1,6 m.

periode (T) = 2,55 sekon

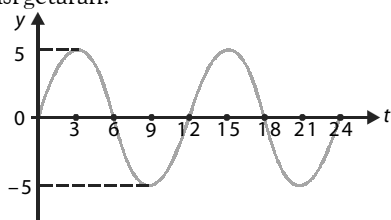
Percepatan gravitasi diperoleh dengan **Persamaan (2-46)**:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \Rightarrow g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2} = \frac{4(3,14)^2 (1,6 \text{ m})}{(2,55 \text{ s})^2} = 9,7 \text{ m/s}^2$$

Jadi, percepatan gravitasi di tempat tersebut adalah 9,7 m/s².

Contoh 2.19

- Dari grafik simpangan terhadap waktu seperti tampak pada gambar, tentukan:
 - amplitudo;
 - periode; dan
 - frekuensi getaran.



Jawab:

- Amplitudo adalah simpangan maksimum dari garis mendatar, yaitu $A = 5$ m.
 - Periode (T) adalah selang waktu yang diperlukan untuk membentuk tiga titik potong berurutan pada sumbu- t dengan $t = 12$ sekon.
 - Frekuensi (f) getaran:

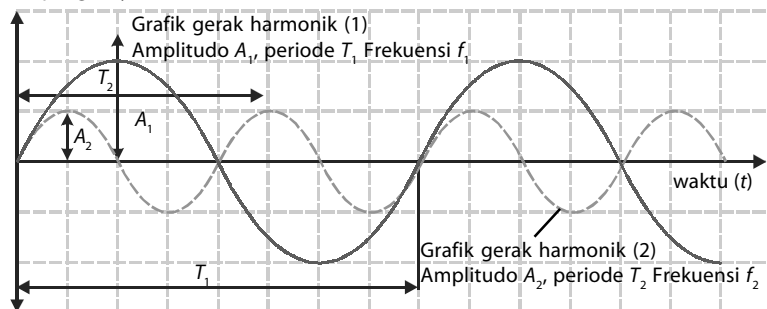
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{12} \text{ Hz}$$
- Pada sumbu- y dan sumbu- t yang sama, lukislah dua grafik $y-t$ gerak harmonik, dengan periode getaran (2) setengah periode getaran (1), dan amplitudo getaran (2) setengah amplitudo getaran (1).

Jawab:

Jika untuk grafik $y-t$ gerak harmonik (1) diambil amplitudo A_1 , periode T_1 , dan frekuensi f_1 , maka untuk grafik $y-t$ gerak harmonik (2) berlaku:

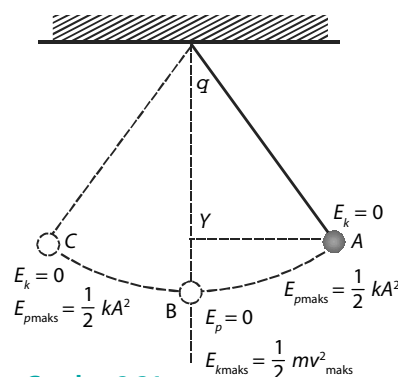
amplitudo $A_2 = \frac{1}{2} A_1$; periode $T_2 = \frac{1}{2} T_1$; dan frekuensi $f_2 = 2 f_1$.

Grafik gerak $y-t$ gerak harmonik (1) dinyatakan oleh garis utuh dan grafik $y-t$ gerak harmonik (2) dinyatakan oleh garis putus-putus seperti pada gambar berikut.



5. Energi pada Gerak Harmonik Sederhana

Gerak harmonik sederhana dari sebuah ayunan bandul diperlihatkan pada **Gambar 2.31**. Pada keadaan awal, posisi benda di simpangan terjauh, yaitu di titik A. Pada posisi tersebut, besar energi potensial bandul maksimum, sebaliknya besar energi kinetik bandul minimum. Ketika



Gambar 2.31

Perubahan energi terjadi saat bandul bergerak dari A menuju B yaitu energi potensial ke energi kinetik dan sebaliknya dari B ke C.

bandul dilepas menuju titik kesetimbangan di B, besar energi potensial berangsur menurun, sedangkan besar energi kinetiknya bertambah hingga mencapai maksimum di titik B. Bandul terus bergerak menuju titik C.

Pada gerakan bandul dari titik B ke titik C akan mengalami penurunan besar energi kinetik dan penambahan besar energi potensial. Di titik C, besar energi potensial bandul kembali maksimum, sedangkan besar energi kinetiknya kembali nol. Jadi, selama gerakan harmonik sederhana pada ayunan bandul berlangsung, akan selalu terjadi perubahan energi potensial menjadi energi kinetik, atau sebaliknya. Jika tidak ada gaya gesek, berlaku hukum kekekalan energi mekanik sehingga besar energi total pada gerakan harmonik di setiap lintasan selalu tetap. Secara matematis, besar energi kinetik benda pada gerak harmonik memenuhi persamaan

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow E_k = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

atau
$$E_k = \frac{1}{2} k A^2 \cos^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \text{ dengan } k = m \omega^2 \quad (2-59)$$

Energi potensial gerak harmonik di setiap simpangan adalah:

$$E_p = \frac{1}{2} k Y^2 = \frac{1}{2} k A^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$E_p = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2-60)$$

Energi total atau energi mekanik yang merupakan penjumlahan energi potensial dan energi kinetik dapat ditulis sebagai berikut.

$$E_m = E_p + E_k = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

dari sifat trigonometri, $\sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + \cos^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = 1$, maka

$$E_m = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} k A^2 \quad (2-61)$$

atau

$$E_m = 4 \pi^2 f^2 A^2 m \quad (2-62)$$

Energi mekanik pada gerak harmonik sederhana besarnya tidak bergantung pada simpangan gerak, dan nilainya selalu tetap di setiap titik lintasan. Dengan demikian energi mekanik dalam gerak harmonik selalu tetap.

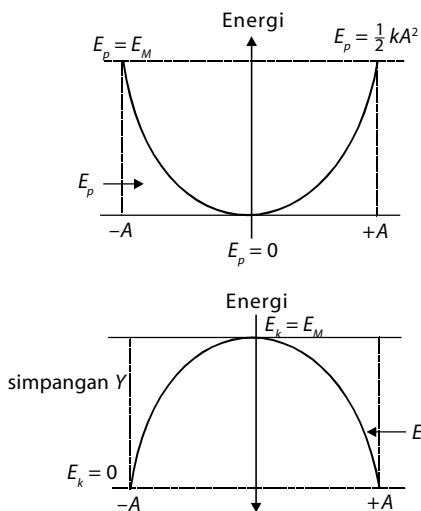
Energi potensial gerak harmonik memenuhi persamaan $E_p = \frac{1}{2} k Y^2$. Persamaan tersebut merupakan fungsi kuadrat terhadap Y. Grafik energi potensial terhadap simpangan berbentuk parabola melalui titik pusat (0, 0). Demikian pula dengan energi kinetik. Perhatikan **Gambar 2.32**. Energi kinetik diperoleh dari **Persamaan (2-60)**, yaitu

$$E_k = E_m - E_p = \frac{1}{2} k A^2 - \frac{1}{2} k Y^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} k (A^2 - Y^2) \quad (2-63)$$

Berdasarkan **Persamaan (2-63)**, dapat ditulis

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} k (A^2 - Y^2)$$



Gambar 2.32

Grafik energi potensial dan energi kinetik terhadap simpangan pada gerak harmonik sederhana.

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - Y^2)} \quad (2-64)$$

Jika posisi benda di titik setimbang $Y = 0$, kecepatan gerak harmonik mencapai maksimum sehingga **Persamaan (2-64)** menjadi

$$v_{\text{maks}} = A\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-65)$$

Keterangan:

v_{maks} = kecepatan maksimum (m/s)

A = amplitudo (m)

k = konstanta pegas (N/m)

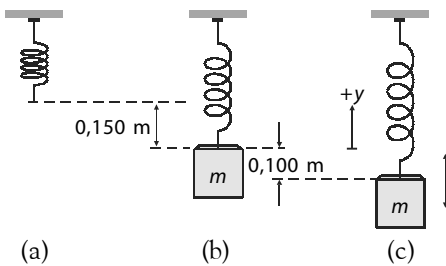
m = massa benda (kg)

Kata Kunci

- amplitudo
- fase
- frekuensi getar
- gaya pemulih
- periode getar
- simpangan

Contoh 2.20

Sebuah pegas bertambah panjang 0,15 m saat ditarik dengan benda bermassa 0,3 kg yang digantung pada pegas tersebut (lihat gambar). Kemudian, ditarik lagi sejauh 0,1 m dari titik kesetimbangan dan dilepaskan.



Tentukan:

- nilai konstanta pegas k dan frekuensi sudut ω ;
- simpangan y sebagai fungsi dari waktu t ;
- kecepatan setiap saat t ;
- energi total ;
- energi kinetik dan energi potensial fungsi dari waktu t ; dan
- energi kinetik dan energi potensial saat $y = \frac{A}{2}$.

Jawab:

- Nilai konstanta pegas k dan frekuensi sudut ω adalah

$$k = \frac{F}{y} = \frac{mg}{y}$$

$$= \frac{(0,3 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)}{0,150 \text{ m}} = 19,6 \text{ N/m}$$

dan

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{19,6 \text{ N/m}}{0,3 \text{ kg}}} = 8,08 \text{ Hz.}$$

- Untuk menggambarkan hubungan simpangan y terhadap waktu t dapat digunakan dua persamaan, yaitu $y = -A \cos \omega t$ atau $y = -A \sin \omega t$
Pemilihan persamaan yang digunakan bergantung pada kedudukan awal pegas untuk melakukan gerak harmonik. Pada kasus ini diketahui kedudukan awal

pegas pada saat $t = 0$ adalah $y = A = 0,1$ m sehingga persamaannya $y = -(0,1 \text{ m}) \cos(8,08 t)$ atau $y = -(0,1 \text{ m}) \cos(8,08 t - \pi)$ karena fungsi cosinus berharga 1 pada saat $t = 0$

c. Kecepatan setiap saat $t \Rightarrow v = \frac{dy}{dt} = A \omega \sin \omega t$.

$$A \omega = v_{\text{maks}} \Rightarrow v_{\text{maks}} = (8,08 \text{ s}^{-1})(0,1 \text{ m}) = 0,808 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan setiap saat t adalah $v = (0,808 \text{ m/s}) \sin 8,08 t$.

d. $E_{\text{tot}} = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} (19,6 \text{ N/m}) (0,1 \text{ m})^2 = 9,80 \times 10^{-2} \text{ J}$.

e. Dari (b) didapatkan $y = -(0,1 \text{ m}) \cos 8,08 t$.

Dari (c) diperoleh $v = (0,808 \text{ m/s}) \sin 8,08 t$.

Jadi, energi potensial dan kinetik sebagai fungsi dari waktu adalah

$$E_p = \frac{1}{2} k y^2 = (9,80 \times 10^{-2} \text{ J}) \cos^2 8,08 t$$

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = (9,80 \times 10^{-2} \text{ J}) \sin^2 8,08 t$$

f. Pada saat $y = \frac{A}{2} = 0,05$ m, energi potensial dan energi kinetik balok adalah

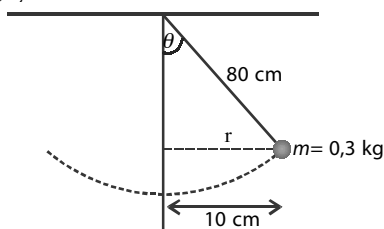
$$E_p = \frac{1}{2} k y^2 = \frac{1}{2} (19,6 \text{ N/m}) (0,05)^2 = 2,45 \times 10^{-2} \text{ J}$$

$$E_k = E_{\text{tot}} - E_p = (9,8 \times 10^{-2}) - (2,45 \times 10^{-2}) = 7,35 \times 10^{-2} \text{ J}$$

Tes Kompetensi Subbab D

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Sebuah ayunan sederhana seperti pada gambar, terbuat dari bandul bermassa 0,3 kg yang diikat seutas tali yang panjangnya 80 cm.



Jika percepatan gravitasi = 10 m/s^2 , tentukan besar gaya pemulih pada bandul.

- Sebuah pegas panjangnya 50 cm. Jika pegas diberi beban 500 g, panjangnya menjadi 60 cm. Kemudian, beban pada pegas tersebut digetarkan. Jika diketahui $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah periode getaran pegas.
- Sebuah benda m digantungkan pada sebuah pegas yang bergetar dengan frekuensi = 0,72 Hz. Ketika beban yang massanya 700 g ditambahkan pada m , frekuensi getaran menjadi 0,48 Hz. Tentukanlah nilai m .
- Sebuah pegas dengan konstanta pegas = 1.250 N/m digantung vertikal. Pada ujungnya diberi beban sebesar 500 gram, beban ditarik ke bawah lalu dilepas. Tentukanlah periode getar pegas dan frekuensi getarnya.
- Jika amplitudo getaran $P =$ amplitudo getaran Q , tetapi periode $Q = \frac{1}{3}$ periode P , lukislah grafik $y - t$ dari dua gerak harmonik tersebut.
- Sebuah benda melakukan gerak harmonik sederhana sepanjang sumbu- y . Persamaan simpangan dinyatakan sebagai $Y = 4 \sin \left(\pi t + \frac{\pi}{6} \right)$ dengan y dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan:
 - amplitudo, frekuensi, kecepatan, dan percepatan;
 - persamaan kecepatan dan percepatan;
 - simpangan, kecepatan, dan percepatan pada saat $t = 1$ sekon;
 - kecepatan maksimum dan percepatan maksimum.

Rangkuman

- Gerak gesek timbul jika dua buah benda bersentuhan. Gaya gesek statis bernilai mulai dari 0 hingga mencapai $\mu_s N$,
 f_s maksimum = $\mu_s N$
 Gaya gesek kinetik bernilai konstan, yaitu
 $f_k = \mu_k N$
- Benda yang disimpan di atas benda miring maka koefisien gesek statis yang terjadi adalah $\mu_s = \tan \alpha$ dengan α adalah sudut kemiringan bidang.
- Kecepatan maksimal mobil yang diperbolehkan melintas agar aman dan tidak selip adalah sebagai berikut.
 - Pada tikungan mendatar:
 $v_{\text{maks}} = \sqrt{\mu g r}$
 - Pada tikungan miring lain:
 $v_{\text{maks}} = \sqrt{r g \tan \theta}$
 - Pada tikungan miring kasar:
 $v_{\text{maks}} = \sqrt{g r \frac{\mu_s + \tan \theta}{1 - \mu_s \tan \theta}}$
 dengan: θ = sudut kemiringan jalan; r = jarak mobil terhadap pusat kelengkungan tikungan.
- Dua buah benda yang bermassa m_1 dan m_2 yang berada pada jarak r satu sama lain akan mengalami gaya tarik gravitasi di antara keduanya yang besarnya dinyatakan dengan

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$
- Percepatan gravitasi Bumi dinyatakan dengan persamaan $g = \frac{GM}{r^2}$
 dengan: r = jarak permukaan Bumi terhadap pusat Bumi.
- Hukum I Kepler menyatakan bahwa semua planet bergerak dalam orbit elips dengan Matahari di salah satu fokusnya.
 Hukum II Kepler menyatakan bahwa garis yang menghubungkan antara planet dan Matahari akan menyapu luas daerah yang sama pada waktu yang sama.
 Hukum III Kepler: $\frac{T^2}{r^3} = \text{konstan}$
 dengan: T = periode; r = jarak antara planet dan Matahari.
- Agar satelit tetap berada pada lintasannya, satelit harus memiliki kecepatan gerak sebesar

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$
- Benda padat memiliki bentuk volume tetap, serta mempunyai sifat elastis.
 Stress (tegangan) pada benda dinyatakan dengan persamaan

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
 Strain (regangan) pada benda dinyatakan dengan

$$\epsilon = \frac{A \ell}{\ell_0}$$
 Modulus elastisitas (Modulus Young) dinyatakan dengan

$$Y = \frac{F \ell_0}{A \Delta \ell}$$
- Dalam gerak harmonik sederhana, bekerja resultan gaya yang selalu menuju titik kesetimbangan. Gaya tersebut dinamakan *gaya pemulih*.
 Gaya pemulih pada pegas:

$$F = -k y$$
 Gaya pemulih pada ayunan sederhana:

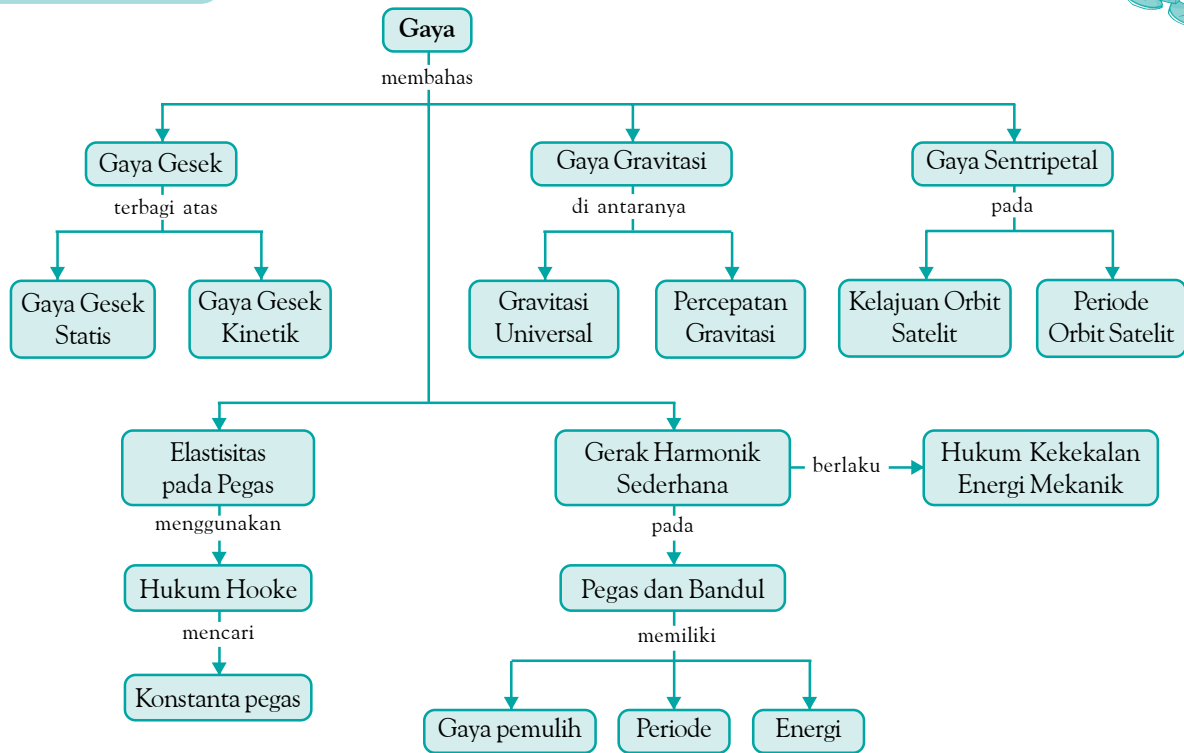
$$F = -mg \sin \theta$$
 Periode gerak harmonik pada pegas dinyatakan

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$
 Periode ayunan bandul sederhana dinyatakan dengan persamaan

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$
 Energi mekanik pada sebuah gerak harmonik sederhana selalu tetap dan tidak bergantung pada simpangan gerak.

$$E_m = 4\pi^2 f^2 A^2 m$$

Peta Konsep



Refleksi

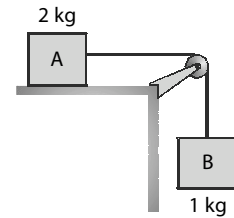
Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda dapat mengetahui jenis-jenis gaya yang sering Anda temukan dalam kehidupan sehari-hari. Anda juga tentu dapat menjelaskan perbedaan antara jenis gaya yang satu dan gaya yang lainnya. Dari materi bab ini, bagian mana yang dianggap sulit? Coba diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Pada bab ini, Anda dapat mempelajari gaya gesek. Kita dapat berjalan atau mobil dapat melaju karena adanya gaya gesek. Ternyata, banyak manfaat dengan adanya gaya gesek, meskipun memang ada kerugiannya pada kasus-kasus tertentu. Coba Anda cari manfaat lain mempelajari bab ini.

Tes Kompetensi Bab 2

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

- Berikut ini yang *tidak* menunjukkan terjadinya gaya gesek adalah
 - mobil dapat berhenti setelah sampai di tempat tujuan
 - orang dapat berjalan di tebing atau kaki gunung
 - bunyi gemerisik daun-daun yang tertiuip angin
 - sepeda motor tergelincir di atas jalan yang licin
 - besi dapat dipegang
- Arah gaya gesek selalu
 - searah dengan arah gaya berat benda
 - searah dengan gerak benda
 - berlawanan arah dengan gerak benda
 - berlawanan dengan berat benda
 - tegak lurus dengan benda
- Sebuah benda yang meluncur pada bidang miring mendapat gaya gesek yang besarnya tidak ditentukan oleh
 - massa benda
 - sudut kemiringan bidang
 - berat benda
 - kekasaran permukaan bidang
 - kecepatan benda
- Benda bermassa 1 kg bergerak mendatar di atas permukaan dengan kecepatan awal = 20 m/s. Jika koefisien gesekan = 0,4, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, jarak yang ditempuh benda tersebut dari posisi awal sampai posisi akhir adalah
 - 400 m
 - 160 m
 - 80 m
 - 50 m
 - 100 m
- Gaya gesek maksimum terjadi pada saat benda
 - tepat akan bergerak
 - bergerak ke bawah
 - diam
 - meluncur ke atas
 - bergerak berlawanan arah
- Mobil bermassa 1.000 kg meluncur dengan kecepatan 72 km/jam direm dengan gaya F . Jika koefisien gesekan kinetik antara roda dan jalan 0,2 dan mobil berhenti setelah 4 detik, besar gaya pengereman F adalah
 - 5.000 N
 - 4.980 N
 - 4.800 N
 - 4.550 N
 - 4.500 N
- Gaya minimum untuk menggerakkan benda yang massanya 8 kg dan terletak pada bidang mendatar yang koefisien gesek statisnya 0,8 adalah
 - 80 N
 - 76 N
 - 54 N
 - 46 N
 - 64 N
- Benda bermassa m berada pada sebuah bidang miring dengan sudut kemiringan 30° . Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, besar koefisien gesekan antara benda dengan bidang pada saat benda tepat akan bergerak adalah
 - 0,33
 - 0,45
 - 0,64
 - 0,75
 - 0,86
- Pada gambar berikut, saat beban B dilepaskan, balok A tepat akan bergerak. Jika percepatan gravitasi sebesar 10 m/s^2 , koefisien gesekan statis antara balok dengan meja adalah
 - 0,5
 - 0,4
 - 0,3
 - 0,2
 - 0,1



- Jika jari-jari Bumi R dan berat benda di permukaan Bumi w , berat benda tersebut pada ketinggian R dari permukaan Bumi adalah
 - w
 - $0,75 w$
 - $0,66 w$
 - $0,50 w$
 - $0,25 w$
- Jika massa Bulan $\frac{1}{81}$ kali massa Bumi dan jari-jari Bulan $\frac{1}{6}$ kali jari-jari Bumi, perbandingan gaya tarik Bumi terhadap Bulan adalah
 - 6 : 81
 - 36 : 81
 - 1 : 1
 - 81 : 36
 - 81 : 6

12. Jika perbandingan jari-jari Bumi di khatulistiwa dan di kutub $9 : 8$, perbandingan percepatan gravitasi Bumi di khatulistiwa dan di kutub adalah
- $3 : 2\sqrt{2}$
 - $2\sqrt{2} : 3$
 - $9 : 8$
 - $81 : 64$
 - $64 : 81$
13. Jika jari-jari Bumi $= R$, medan gravitasi di permukaan Bumi $= g$, besarnya medan gravitasi pada ketinggian h dari permukaan Bumi adalah
- $\frac{gh}{R}$
 - $\frac{gh^2}{(R+h)^2}$
 - $\frac{R^2}{(R+h)^2}$
 - $\frac{gh}{(R+h)}$
 - $\frac{gRh}{(R+h)}$
14. Diketahui perbandingan jari-jari sebuah planet (R_p) dan jari-jari Bumi (R_B) adalah $2 : 1$, sedangkan perbandingan massa planet (M_p) dan massa Bumi (M_B) adalah $10 : 1$. Jika berat Putu di Bumi 100 N , di planet berat Putu menjadi
- 1.000 N
 - 2.000 N
 - 2.500 N
 - 4.000 N
 - 5.000 N
15. Jika medan gravitasi di permukaan Bumi $= 9,8 \text{ m/s}^2$, besarnya medan gravitasi pada ketinggian R dari permukaan Bumi adalah ... ($R =$ jari-jari Bumi).
- nol
 - $1,225 \text{ m/s}^2$
 - $2,45 \text{ m/s}^2$
 - $4,9 \text{ m/s}^2$
 - $9,8 \text{ m/s}^2$
16. Syamsul yang bermassa 80 kg ditimbang dalam sebuah lift. Jarum timbangan menunjukkan angka 1.000 newton . Jika percepatan gravitasi Bumi 10 m/s^2 , dapat disimpulkan bahwa
- lift sedang bergerak ke atas dengan kecepatan tetap
 - lift sedang bergerak ke bawah dengan kecepatan tetap
 - lift sedang bergerak ke atas dengan percepatan tetap
 - lift sedang bergerak ke bawah dengan percepatan tetap
 - lift sedang bergerak ke bawah dengan percepatan berubah
17. Benda elastis adalah benda yang jika dikenai gaya
- mudah patah
 - memiliki bentuk yang baru
 - dapat kembali ke bentuk semula jika gaya dihilangkan
 - bertambah panjang
 - bentuknya tidak berubah
18. Menurut Hukum Hooke, pertambahan panjang sebuah batang yang ditarik oleh suatu gaya
- berbanding lurus dengan besar gaya tarik
 - berbanding lurus dengan luas penampang batang
 - berbanding terbalik dengan modulus Young batang tersebut
 - berbanding terbalik dengan panjang mula-mula
 - berbanding lurus dengan panjang mula-mula
19. Sebuah pegas panjang awalnya ℓ_0 , luas penampang A , dan modulus Young-nya E . Besarnya konstanta gaya pegas (k) yang dimiliki oleh pegas tersebut adalah
- $\frac{EA}{\ell_0}$
 - $\frac{A\ell_0}{E}$
 - $\frac{E\ell_0}{A}$
 - $\frac{E}{A\ell_0}$
 - $\frac{A}{E\ell_0}$
20. Jika $E =$ modulus young, $F =$ gaya, $\ell =$ panjang batang, $\Delta\ell =$ perubahan panjang, dan $A =$ luas penampang, persamaan berikut yang benar adalah
- $E = \frac{A\ell}{F\Delta\ell}$
 - $E = \frac{F\Delta\ell}{A\ell}$
 - $E = \frac{F\ell}{A\Delta\ell}$
 - $E = \frac{F}{A\ell_0}$
 - $E = \frac{A}{F\ell_0}$

21. Sebuah pegas yang panjangnya 30 cm tergantung tanpa beban. Kemudian, ujung bawah pegas digantungi beban 100 g sehingga panjang pegas menjadi 35 cm. Jika beban tersebut ditarik ke bawah sejauh 5 cm, dan percepatan gravitasi Bumi = 10 m/s^2 , energi potensial elastik pegas adalah
- 0,025 joule
 - 0,05 joule
 - 0,1 joule
 - 0,25 joule
 - 0,5 joule

(SIPENMARU 1984)

22. Jika jari-jari Bumi = $6,4 \times 10^6 \text{ cm}$, kelajuan lepas suatu roket yang diluncurkan vertikal dari permukaan Bumi adalah
- $4\sqrt{2} \text{ km/s}$
 - $6\sqrt{2} \text{ km/s}$
 - $8\sqrt{2} \text{ km/s}$
 - $10\sqrt{2} \text{ km/s}$
 - $12\sqrt{2} \text{ km/s}$

(UMPTN 2001)

23. Sebuah pegas yang memiliki panjang 15 cm digantung secara vertikal. Kemudian, mendapatkan gaya tarik 0,5 N dan panjangnya bertambah 12 cm. Panjang pegas jika ditarik dengan gaya 0,6 N adalah
- 32,4 cm
 - 31,4 cm
 - 29,4 cm
 - 29,0 cm
 - 28,5 cm

24. Sebuah pegas digantungi beban bermassa 300 g, kemudian ditarik sehingga memiliki frekuensi gerak harmonis pegas sebesar 2 Hz. Massa benda yang harus ditambahkan agar frekuensi gerak harmonis pegas menjadi 1,5 Hz adalah

- 150 g
- 233 g
- 348 g
- 418 g
- 533 g

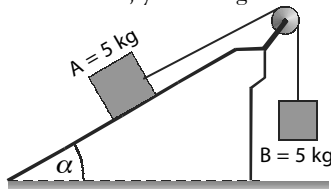
25. Pada gerak harmonik pegas, jika massa beban yang digantung pada ujung bawah pegas 1 kg, periode getarannya 2 sekon. Jika massa beban ditambah hingga menjadi 4 kg, periode getarannya adalah

- $\frac{1}{4}$ sekon
- $\frac{1}{2}$ sekon
- 1 sekon
- 4 sekon
- 8 sekon

(UMPTN 1989)

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

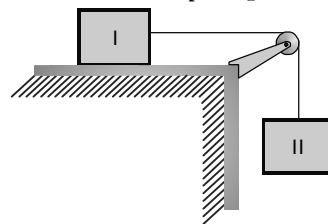
1. Pada susunan benda-benda seperti pada gambar, massa benda A dan B sama, yaitu 5 kg.



Jika koefisien gaya gesek kinetik antara benda A dan bidang miring $\mu_k = 0,2$ dan $\tan \alpha = \frac{3}{4}$, berapakah percepatan setiap benda jika kedua benda dilepaskan?

2. Sebuah benda yang bermassa 8 kg terletak pada bidang datar dengan koefisien gesekan statisnya 0,8.
- Tentukan gaya minimal untuk menggerakkan benda tersebut.
 - Jika benda tersebut dipengaruhi gaya sebesar 54 N yang sejajar dengan arah bidang, bagaimana keadaan benda tersebut?

3. Dua benda tersusun seperti gambar.



Massa benda I = 6 kg dan massa benda II = 4 kg. Koefisien gesekan kinetik benda I dengan bidang sama dengan 0,25 dan percepatan gravitasinya = 10 m/s^2 . Hitunglah percepatan kedua benda dan tegangan tali penghubung kedua benda.

4. 

Dua benda A dan B dihubungkan dengan tali ringan, seperti pada gambar. Massa A = 6 kg dan massa B = 8 kg ($g = 10 \text{ m/s}^2$). Jika gaya F mendatar sebesar 56 N dan koefisien gesekan benda dengan lantai 0,2, tentukan:

- percepatan yang timbul; dan
- tegangan tali.

5. Massa planet Yupiter adalah $1,9 \times 10^{27}$ kg dan massa Matahari adalah $2,0 \times 10^{30}$ kg. Jika jarak rata-rata antara Matahari dan Yupiter adalah $7,8 \times 10^{11}$ m dan $G = 6,67 \times 10^{-11}$ Nm²/kg, tentukan:
 - a. gaya gravitasi Matahari pada planet Yupiter; dan
 - b. laju linear orbit planet Yupiter.
6. Berat Uni di Bumi adalah 800 N. Jika jari-jari Bumi (R) = $6,4 \times 10^6$ m, massa Bumi (M) = $6,0 \times 10^{24}$ kg, dan konstanta gravitasi (G) = $6,7 \times 10^{-11}$ Nm²/kg², berapa berat Uni di ketinggian R dari permukaan Bumi?
7. Massa bulan $\frac{1}{81}$ massa Bumi dan jari-jari Bulan $\frac{1}{4}$ jari-jari Bumi. Jika percepatan gravitasi di permukaan Bumi $9,8$ m/s², tentukan percepatan gravitasi di permukaan Bulan.
8. Sebuah benda bermassa $1,25$ kg ditimbang dengan neraca pegas, pegas akan menyimpang sebesar 5 cm. Tentukan besar konstanta gaya pegas dari neraca pegas tersebut. ($g = 10$ m/s²)
9. Sebuah pegas memiliki konstanta pegas $k = 400$ N/m. Saat beban bermassa 10 kg digantungkan pada ujung pegas, ternyata penjang pegas menjadi 85 cm. Jika percepatan gravitasi $g = 10$ m/s², berapakah panjang pegas mula-mula?
10. Panjang sebuah pegas bertambah 10 cm jika anak timbangan bermassa 3 kg digantungkan pada ujungnya. Jika $g = 10$ m/s², berapakah konstanta pegas tersebut?

Bab 3



Sumber: *Fundamentals of Physics*, 2001

Pada saat atlet angkat besi mengangkat beban, sebetulnya ia sedang melakukan kerja pada beban yang disimpan sebagai energi potensial.

Usaha, Energi, dan Daya

Hasil yang harus Anda capai:

menganalisis gejala alam dan keteraturan dalam cakupan mekanika benda titik.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

- menganalisis hubungan antara usaha, perubahan energi dan hukum kekekalan energi mekanik;
- menerapkan hukum kekekalan energi mekanik untuk menganalisis gerak dalam kehidupan sehari-hari.

Energi sangat dibutuhkan manusia dalam melakukan aktivitasnya sehari-hari. Banyak aktivitas-aktivitas primer manusia yang membutuhkan energi, seperti memasak, mencuci pakaian, dan sebagai sumber penerangan pada malam hari. Selain aktivitas primer, banyak aktivitas lainnya yang membutuhkan energi, di antaranya olahraga. Pada gambar di atas, seorang atlet sedang mengangkat beban yang sangat berat. Atlet tersebut harus dapat mengukur, apakah ia mampu atau tidak mengangkat beban tersebut. Selama proses latihan, atlet tersebut harus menghitung berapa banyak kalori yang harus ia konsumsi supaya dalam perlombaan ia dapat mengangkat beban yang diinginkan.

Dalam bab ini, akan dibahas tentang usaha, energi, daya, dan hubungan antara ketiganya. Konsep Fisika tentang usaha, energi, dan daya ini banyak sekali aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari.

- A. Gaya Dapat Melakukan Usaha**
- B. Energi dan Usaha**
- C. Gaya Konservatif dan Hukum Kekekalan Energi Mekanik**
- D. Daya**

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Usaha, Energi, dan Daya, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

- Jelaskan dengan bahasa Anda sendiri pengertian usaha dan energi.
- Apakah pada sebuah bola yang akan ditendang terdapat energi potensial?
- Sebutkan contoh-contoh penerapan Hukum Kekekalan Energi yang ada di sekitar Anda.
- Apa perbedaan daya dan energi?

A. Gaya Dapat Melakukan Usaha

Agar Anda lebih memahami pengertian usaha dalam kehidupan sehari-hari, pelajari materi berikut ini.

1. Pengertian Usaha

Pada saat di kelas, Anda berusaha belajar maksimal untuk memperoleh nilai tinggi. Ketika belajar, Anda menggunakan tenaga dan pikiran. Dalam kehidupan sehari-hari, usaha didefinisikan sebagai pekerjaan yang dilakukan untuk memperoleh tujuan yang diinginkan. Menurut Anda, apakah pengertian usaha dalam fisika sama dengan pengertian usaha dalam kehidupan sehari-hari tersebut? Usaha dalam fisika selalu berhubungan dengan transfer energi dan gaya. Simaklah contoh berikut. Sebuah mobil mogok didorong oleh Togar dengan gaya F sehingga mobil berpindah tempat sejauh s dari posisi awalnya. Ketika Togar mendorong mobil tersebut sehingga mobil bergerak, Togar melakukan usaha, yaitu mentransfer energi melalui gaya dorong pada mobil sehingga mobil bergerak dan berpindah sejauh s . Besar usaha (W) yang dilakukan Togar untuk mendorong mobil oleh gaya sama dengan hasil kali gaya F dengan perpindahan s .



Gambar 3.1

Togar melakukan usaha (W) dengan mentransfer energi melalui gaya dorong F sehingga mobil berpindah sejauh s .

$$W = F \cdot s \quad (3-1)$$

Keterangan:

W = usaha (joule)

F = gaya (N)

s = perpindahan (m)

Usaha adalah besaran skalar, walaupun gaya F dan perpindahan s merupakan vektor. Menurut perkalian vektor (\cdot), hasilnya harus berupa skalar. Usaha yang dilakukan oleh gaya konstan F yang membentuk sudut α terhadap arah perpindahan benda, seperti terlihat pada **Gambar 3.2**, besar usahanya adalah

$$W = F s \cos \alpha \quad (3-2)$$

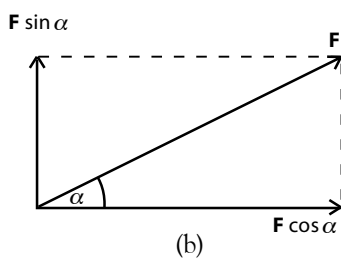
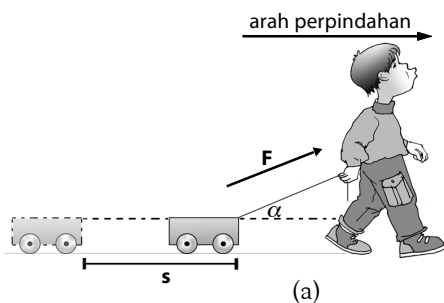
Vektor F dapat diuraikan menjadi dua komponen gaya yang saling tegak lurus, yaitu komponen $F \cos \alpha$ yang searah dengan arah perpindahan benda dan $F \sin \alpha$ yang tegak lurus dengan arah perpindahan. Ternyata, hanya komponen gaya yang searah dengan perpindahan yang menghasilkan usaha, yaitu sebesar $F s \cos \alpha$. Berikut ini beberapa keadaan istimewa yang dihasilkan **Persamaan (3-2)**.

a. $\alpha = 0^\circ$:

Untuk $\alpha = 0^\circ$, arah gaya searah dengan arah perpindahan sehingga diperoleh

$$W = F s \cos 0^\circ$$

$$W = F s \quad (3-3)$$



Gambar 3.2

(a) Usaha oleh gaya F yang membentuk sudut α terhadap perpindahan benda s .

(b) Penguraian vektor F menjadi komponen-komponennya.

b. $\alpha = 90^\circ$:

Untuk $\alpha = 90^\circ$, arah gaya F tegak lurus dengan arah perpindahan sehingga diperoleh

$$W = F s \cos 90^\circ$$

$$W = 0 \quad (3-4)$$

Jika $W = 0$, berarti gaya tersebut tidak melakukan usaha. Dengan kata lain, gaya yang tegak lurus dengan arah perpindahan benda, artinya gaya tersebut tidak melakukan usaha.

c. $\alpha = 180^\circ$:

Keadaan ini menyatakan bahwa arah gaya berlawanan dengan arah perpindahan sehingga diperoleh

$$W = F s \cos 180^\circ$$

$$W = F s (-1)$$

$$W = -F s \quad (3-5)$$

Contoh usaha negatif, yaitu seorang pengendara sepeda yang sedang memacu sepedanya, tiba-tiba mengerem sepedanya. Usaha yang dilakukan oleh gaya gesek yang terjadi antara kedua ban sepeda dengan jalan, bernilai negatif karena gaya gesek berlawanan arah dengan arah perpindahan sepeda. Besarnya usaha negatif tersebut sebanding dengan gaya gesek dan perpindahan yang ditempuh sepeda selama gaya gesek bekerja. Dengan demikian, sepeda mengalami gerak diperlambat.

d. Perpindahan benda $s = 0$:

Pada **Gambar 3.3**, Fadli sedang berdiri sambil menggondong tas. Tas tersebut memiliki gaya berat sebesar w dengan arah ke bawah. Besar gaya tarik tali tas oleh punggung Fadli (F) sama dengan besar gaya berat tas w sehingga tas dalam keadaan setimbang. Gaya reaksi ke atas oleh punggung Fadli pada tali tas tersebut tidak dihitung sebagai usaha karena tidak ada perpindahan pada tas akibat gaya reaksi. Dari **Persamaan (3-2)**, didapatkan bahwa

$$W = F s \cos \alpha$$

$$W = F(0) \cos \alpha$$

$$W = 0$$

Contoh lain adalah seorang anak yang bersandar pada dinding (**Gambar 3.4**). Dinding tidak bergeser karena gaya yang dilakukannya tidak cukup kuat untuk menggeser dinding. Dengan demikian, usaha yang dilakukan oleh gaya dorongnya sama dengan nol.

Perlu Anda ketahui, satuan usaha adalah joule (disingkat J). Satu joule didefinisikan sebagai besar usaha yang dilakukan oleh gaya sebesar satu newton untuk memindahkan benda sejauh satu meter.

Contoh 3.1

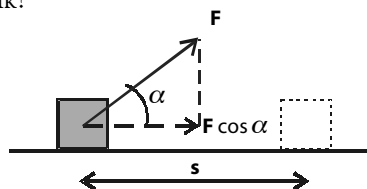
Sebuah gaya tetap sebesar 25 N bekerja pada sebuah benda yang bermassa 4 kg. Jika sudut yang dibentuk antara gaya F dan bidang datar adalah 37° , berapa usaha yang dilakukan gaya itu terhadap benda selama 4 detik?

Jawab:

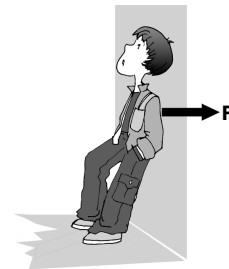
Diketahui: $F = 25 \text{ N}$; $m = 4 \text{ kg}$; $\alpha = 37^\circ$.

$$F \cos \alpha = m a$$

$$a = \frac{F \cos \alpha}{m} = \frac{(25 \text{ N}) \cos 37^\circ}{4 \text{ kg}} = 5 \text{ m/s}^2$$



Gambar 3.3
Fadli sedang menggondong tas.



Gambar 3.4
Seorang anak sedang bersandar pada dinding.

$$s = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} (5 \text{ m/s}^2) (4 \text{ s})^2 = 40 \text{ m}$$

$$W = F s \cos \alpha = (25 \text{ N}) (40 \text{ m}) (0,8) = 800 \text{ J}$$

Jadi, usaha yang dilakukan gaya F adalah 800 joule.

Contoh 3.2

Sebuah benda bermassa 8 kg terletak di atas bidang datar kasar dengan koefisien gesek kinetik 0,2. Benda tersebut ditarik sejauh 6 meter dengan laju tetap. Berapakah usaha yang dihasilkan oleh gaya tarik tersebut jika tarikannya sejajar dengan lantai? (diketahui $g = 10 \text{ m/s}^2$)

Jawab:

Diketahui: $m = 8 \text{ kg}; \quad s = 6 \text{ m}$
 $f_k = 0,2; \quad \theta = 10 \text{ m/s}^2$

Besarnya usaha oleh gaya tarik adalah

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

Oleh karena $\alpha = 0^\circ$ maka besar usaha adalah

$$W = F s$$

Besar gaya F masih belum diketahui.

Oleh karena laju benda tetap maka besar resultan gaya $\Sigma F = 0$

$$F_x - f_k = 0 \text{ (pada sumbu-}x\text{)}$$

$$\text{dan } F_y + N - w = 0 \text{ (pada sumbu-}y\text{)}$$

sehingga

$$F \cos 0^\circ - \mu_k N = 0 \quad \dots(1)$$

$$F \sin 0^\circ + N - w = 0 \Rightarrow N = W \quad \dots(2)$$

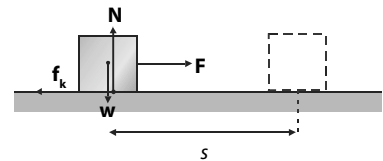
Substitusikan (1) ke (2), diperoleh

$$F - \mu_k w = 0 \Rightarrow F = \mu_k mg$$

$$F = (0,2) (8 \text{ kg}) (10 \text{ m/s}^2) = 16 \text{ N.}$$

$$\text{maka } W = F s = (16 \text{ N}) (6 \text{ m}) = 96 \text{ J.}$$

Jadi, usaha yang dilakukan gaya tersebut adalah 96 J.



Tokoh

James Prescott Joule
(1824–1907)



Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

James Prescott Joule lahir di Salford, Inggris. Ia adalah fisikawan kenamaan Inggris yang berperan dalam perumusan Hukum Kekekalan Energi. Pada 1840, Joule mendeklarasikan sebuah hukum, yang dikenal sebagai Hukum Joule, yaitu tentang panas yang diproduksi dalam konduktor listrik. Untuk menghormati jasanya, nama Joule digunakan sebagai satuan energi dan usaha.

Contoh 3.3

Massa seorang pengendara motor dan sepeda motornya adalah 200 kg. Sepeda motor ini meluncur dengan kelajuan 40 m/s. Kemudian, motor direm hingga berhenti setelah 8 detik. Tentukan usaha yang dilakukan selama pengereman berlangsung.

Jawab:

Diketahui:

$$m = 200 \text{ kg}; \quad v_0 = 40 \text{ m/s}; \quad t = 8 \text{ detik.}$$

Sepeda motor berhenti: $v_t = 0$

$$v_t = v_0 + a t$$

$$0 = 40 \text{ m/s} + a (8 \text{ s})$$

$$a = -5 \text{ m/s}^2$$

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

$$= (40 \text{ m/s}) (8 \text{ s}) + \frac{1}{2} (-5 \text{ m/s}^2) (8 \text{ s})^2 = (320 \text{ m} - 160 \text{ m}) = 160 \text{ m}$$

$$W = F s \text{ (karena arah gaya sejajar dengan perpindahan benda)}$$

$$W = m a s$$

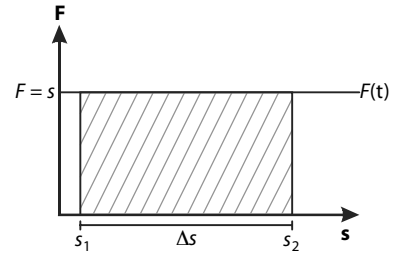
$$= (200 \text{ kg}) (-5 \text{ m/s}) (160 \text{ s}) = -160.000 \text{ J.}$$

Jadi, usaha yang dilakukan selama pengereman adalah -160 kJ .

2. Menentukan Usaha dari Grafik Gaya Terhadap Perpindahan

Pada uraian sebelumnya, gaya F yang digunakan bernilai konstan untuk menghasilkan usaha pada benda yang berpindah sejauh s .

Jika Anda membuat grafik $F(t)$ terhadap s (perpindahan) pada gaya konstan F , Anda akan memperoleh grafik seperti pada **Gambar 3.5**. Berdasarkan grafik tersebut, besar usaha yang dihasilkan oleh gaya konstan F sehingga benda berpindah sejauh Δs sama dengan luas daerah di bawah kurva $F(t)$.



Gambar 3.5

Pada besar F konstan, $W =$ luas daerah di bawah kurva $F(t)$.

Untuk usaha yang dihasilkan gaya F yang besarnya berubah-ubah, akan didapatkan sebuah grafik seperti pada **Gambar 3.6**. Luas daerah yang diarsir berada di antara garis sumbu- s dan garis sumbu- F .

Usaha total yang terjadi pada **Gambar 3.6** merupakan penjumlahan setiap usaha dari s_1 sampai dengan s_2 . Jadi, dapat dituliskan

$$W_{total} = \sum_{s_1}^{s_2} F \Delta s \quad (3-6)$$

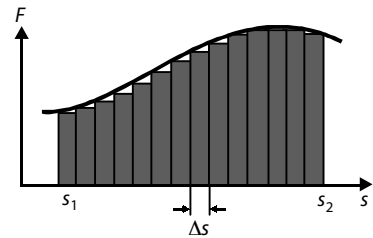
Pendekatan terbaik adalah dengan cara memperkecil Δs sampai mendekati nol atau $\lim_{\Delta s \rightarrow 0}$. Oleh karena itu, secara matematis **Persamaan (3-7)** menjadi

$$W_{total} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \sum_{s_1}^{s_2} F \Delta s \quad (3-7)$$

atau

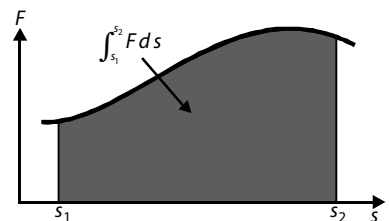
$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \sum_{s_1}^{s_2} F \Delta s = \int_{s_1}^{s_2} F ds \quad (3-8)$$

Arti integral pada **Persamaan (3-8)** adalah luas daerah yang diarsir di antara kurva besar gaya F dan besar perpindahan s .



Gambar 3.6

Grafik gaya (F) terhadap perpindahan (s) dengan gaya (F) tidak konstan atau berubah-ubah.

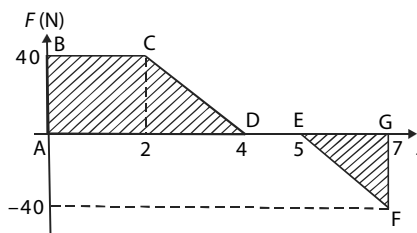


Gambar 3.7

Usaha merupakan luas daerah arsir di antara s_1 dan s_2 pada kurva antara gaya F dan perpindahan s .

Contoh 3.4

Seotong balok kayu yang massanya 4 kg terletak di atas bidang datar. Kemudian, balok kayu tersebut mengalami gerak lurus yang disebabkan oleh gaya yang besarnya berubah-ubah terhadap kedudukan balok, seperti tampak pada gambar. Tentukan total usaha yang dilakukan gaya pada balok hingga berpindah sejauh 7 m.



Jawab:

- $W_{ABCD} =$ luas trapesium ABCD

$$= \frac{(AD + BC)AB}{2} = \frac{(4 + 2)40}{2} = 120 \text{ joule}$$
- $W_{DE} =$ luas DE = 0
- $W_{EFG} =$ luas segitiga EFG

$$= \frac{1}{2} (EG \times GF) = \frac{1}{2} (2 \times (-40)) = -40 \text{ J}$$

Jadi, usaha total untuk $0 < x < 7$ adalah

$$W_{total} = W_{ABCD} + W_{DE} + W_{EFG} \\ = (120 + 0 - 40) \text{ J} = 80 \text{ J}$$

Kata Kunci

- usaha negatif
- usaha nol
- usaha positif

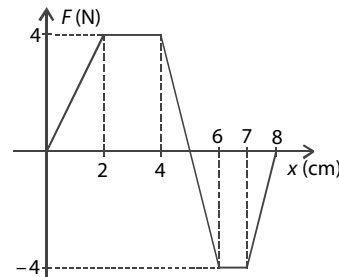
Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Seorang siswa mendorong sebuah meja dengan gaya 80 N. Berapakah usaha yang dilakukan oleh gaya dorong agar meja berpindah sejauh 2 m?
2. Berapakah usaha yang dilakukan untuk mengangkat sebuah mesin tik yang massanya 4 kg hingga ketinggian 2 m ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)?
3. Sebuah benda yang massanya 2 kg meluncur dengan kecepatan 10 m/s. Oleh karena ada pengaruh gaya gesek antara lantai dan benda, benda berhenti setelah bergerak 5 detik. Tentukan usaha yang dilakukan oleh gaya gesek pada benda tersebut.
4. Sebuah benda bermassa 5 kg ditarik ke atas pada bidang miring kasar oleh gaya 40 N searah dengan bidang. Sudut kemiringan bidang terhadap horizontal adalah θ ($\tan \theta = \frac{3}{4}$) sehingga benda berpindah

sejauh 4 m. Jika koefisien gesekan antara benda dengan bidang 0,2 dan $\tan \theta = \frac{3}{4}$, hitunglah usaha yang dilakukan oleh gaya berat dan gaya gesek kinetik.

5. Sebuah gaya F yang berubah-ubah bekerja pada sebuah benda sehingga benda mengalami perubahan seperti grafik pada gambar berikut.



Hitung usaha yang dilakukan oleh gaya F pada benda untuk jarak sejauh 8 m.

B. Energi dan Usaha

Pernahkah Anda melihat seekor kuda yang sedang menarik gerobak yang penuh dengan muatan? Ketika kuda sedang menarik gerobak dalam waktu yang cukup lama, biasanya napas kuda terlihat tersengal-sengal. Mengapa demikian? Kuda tersebut telah mengeluarkan energi yang digunakan untuk melakukan usaha. Dengan demikian, *energi adalah suatu kemampuan untuk melakukan usaha*.

1. Energi Kinetik dan Teori Usaha-Energi

Telah Anda pelajari pada subbab sebelumnya bahwa usaha dapat terjadi pada gaya konstan atau gaya yang berubah-ubah. Kedua jenis usaha tersebut memiliki kesamaan, yaitu adanya gaya yang bekerja pada benda sehingga benda bergerak, lajunya konstan, atau memiliki percepatan.

Sekarang akan dibahas keadaan dengan resultan gaya F konstan. Gaya tersebut bekerja pada benda bermassa m dan akan menghasilkan percepatan a . Menurut Hukum II Newton, besar percepatan tersebut

adalah $a = \frac{F}{m}$. Adapun persamaan besar perpindahannya adalah

$s = \frac{1}{2a}(v_t^2 - v_0^2)$. Usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut adalah

$$W = Fs = mas$$

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

$$W = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (3-9)$$

Anda telah mengetahui bahwa usaha adalah proses transfer energi melalui gaya sehingga benda bergerak. Ketika benda bergerak, benda memiliki kecepatan dan menghasilkan energi kinetik. Berdasarkan **Persamaan (3-9)**, energi kinetik benda dinyatakan dengan

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3-10)$$

Keterangan:

E_k = energi kinetik (J)

m = massa benda (kg)

v = kelajuan benda (m/s)

Dengan demikian,

$$W = E_{k2} - E_{k1} \quad (3-11)$$

Jadi, usaha yang dihasilkan gaya resultan pada partikel tersebut sama dengan perubahan energi kinetik partikel

$$W = \Delta E_k \quad (3-12)$$

Persamaan (3-12) dikenal dengan teorema usaha-energi untuk partikel.

Contoh 3.5

Sebuah kelereng bermassa 20 g. Oleh karena pengaruh gaya, kelereng bergerak dengan kelajuan tetap 40 cm/s. Tentukan energi yang dimiliki kelereng tersebut.

Jawab:

Diketahui:

$$m = 2 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

$$v = 40 \text{ cm/s} = 0,4 \text{ m/s}$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(2 \times 10^{-2} \text{ kg})(0,4 \text{ m/s})^2 \\ = 1,6 \times 10^{-3} \text{ J.}$$

Jadi, energi kinetik yang dimiliki kelereng adalah $1,6 \times 10^{-3} \text{ J}$.

Contoh 3.6

Paku bermassa 5 g terlepas dari tangan seorang tukang kayu. Ketika paku menyentuh tanah, kelajuannya 30 m/s. Jika gaya gesek paku terhadap tanah sebesar 45 N, hitunglah kedalaman paku yang menancap dalam tanah.

Jawab:

Diketahui:

$$m = 5 \text{ g}$$

$$v_1 = 30 \text{ m/s}$$

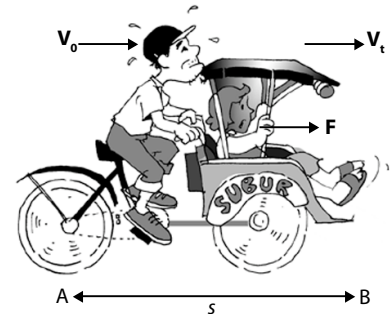
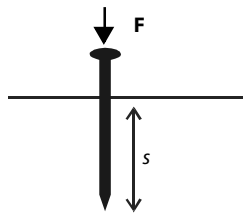
$$F = 45 \text{ N}$$

$$W = -\frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)$$

$$F s = (-\frac{1}{2})(5 \times 10^{-3} \text{ kg})(0 - 30^2 \text{ m/s}^2)$$

$$45 s = 2,25 \Rightarrow s = 0,05 \text{ m.}$$

Jadi, kedalaman paku yang menancap dalam tanah adalah 0,05 m.

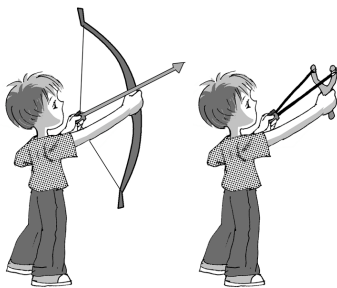


Gambar 3.8

Besar usaha yang dilakukan oleh pengemudi becak sama dengan besar gaya yang bekerja pada becak dikalikan dengan besar perpindahannya.

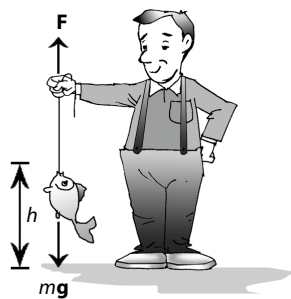
Tugas Anda 3.1

Amatilah perubahan energi yang terjadi di sekitar Anda. Diskusikanlah hal tersebut bersama teman Anda, apakah perubahan energi yang terjadi akan memengaruhi usaha yang dilakukan?



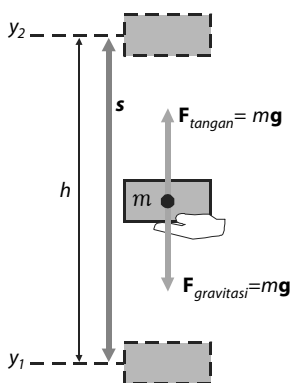
Gambar 3.9

Menegangkan tali panah dan katapel memunculkan energi potensial.



Gambar 3.10

Usaha yang dibutuhkan Pak Simbolon untuk mengangkat ikan setinggi h adalah $W = mgh$.



Gambar 3.11

Sebuah benda yang diangkat oleh gaya dorong $F_{\text{tangan}} = mg$ dari posisi y_1 ke y_2 .

2. Energi Potensial

Energi potensial adalah energi yang tersimpan pada suatu benda akibat bentuknya, letaknya, atau keadaannya, dan jika keadaan memungkinkan, energi tersebut dapat dimunculkan. Contohnya tali busur yang sedang ditegangkan. Pada keadaan ini, tali busur memiliki energi potensial. Jika tali busur dilepaskan, anak panah dapat terlempar dengan jarak tertentu. Begitu juga pada katapel. Energi potensial muncul ketika karet katapel ditegangkan, kemudian hilang ketika karet katapel dilepaskan. Bentuk energi potensial lain yang terdapat di alam adalah energi potensial gravitasi dan energi potensial pegas.

a. Energi Potensial Gravitasi

Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, tetapi dapat berubah dari suatu bentuk menjadi bentuk yang lain. Demikian juga energi potensial gravitasi yang sering ditemukan dalam kehidupan sehari-hari.

Perhatikan contoh berikut. Sebuah batu kerikil dilemparkan secara vertikal. Energi potensial terbesar yang dimiliki batu adalah ketika batu mencapai ketinggian maksimum. Contoh lain, sebuah pensil yang terletak di atas meja memiliki energi potensial gravitasi yang besarnya sebanding dengan massa dan tempat kedudukan pensil terhadap lantai. Ketika pensil Anda sentuh dan Anda biarkan jatuh ke lantai, gaya berat pensil melakukan usaha sehingga pensil berpindah posisinya dari atas meja ke lantai.

Besar energi potensial gravitasi yang dimiliki benda-benda pada contoh di atas bergantung pada kedudukan benda tersebut terhadap acuan tertentu. Pada **Gambar 3.10**, untuk mengangkat seekor ikan yang beratnya w setinggi h , usaha yang dilakukan Pak Simbolon adalah $W = Fh$ (arah gaya searah perpindahan benda) atau ditulis

$$W = mgh \quad (3-13)$$

Keterangan:

m = massa benda (kg)

g = besar percepatan gravitasi (m/s^2)

h = tinggi benda (m)

Benda yang berada pada ketinggian h dari titik acuan memiliki energi potensial untuk melakukan usaha sebesar mgh . Jadi, benda memiliki potensial gravitasi yang besarnya

$$E_p = mgh \quad (3-14)$$

1) Hubungan antara energi potensial gravitasi dan usaha

Perhatikan **Gambar 3.11**. Arah vertikal ke atas (sumbu- y) ditetapkan sebagai arah positif, sedangkan gaya gravitasi berarah ke sumbu- y negatif (ke bawah).

Ketika ke atas:

$$W_{\text{tangan}} = F_{\text{tangan}} \cdot s = mgh = mg(y_2 - y_1).$$

Usaha tersebut didefinisikan sebagai perubahan energi eksternal (tangan) $E_{p\text{ eks}}$

$$\Delta E_{p\text{ eks}} = E_{p2} - E_{p1} = W_{\text{eks}} = mg(y_2 - y_1) \quad (3-15)$$

Saat ke bawah

$$W_{\text{gravitasi}} = \mathbf{F}_{\text{gravitasi}} \cdot \mathbf{s} = mg(y_1 - y_2) = -mgh$$

Usaha tersebut didefinisikan sebagai perubahan energi potensial gravitasi ($\Delta E_{p\text{ grav}}$).

$$\Delta E_{p\text{ grav}} = E_{p2} - E_{p1} = -W_{\text{grav}} = mg(y_2 - y_1) \quad (3-16)$$

Energi potensial gravitasi pada titik y dari titik acuan tertentu ($y_0=0$) dinyatakan dengan persamaan

$$E_p = mgy \text{ atau } E_p = mgh \quad (3-17)$$

dengan h merupakan tinggi benda terhadap lantai.

2) Usaha yang dilakukan oleh gaya pada benda pada ketinggian h

Perhatikan **Gambar 3.12(a)** dan **Gambar 3.12(b)**. Farid dan Samuel sedang memindahkan balok yang bermassa sama ke ketinggian h . Farid memindahkan balok menggunakan bidang miring, sedangkan Samuel memindahkan balok menggunakan katrol. Menurut Anda, samakah usaha yang dilakukan Farid dan Samuel terhadap balok tersebut?

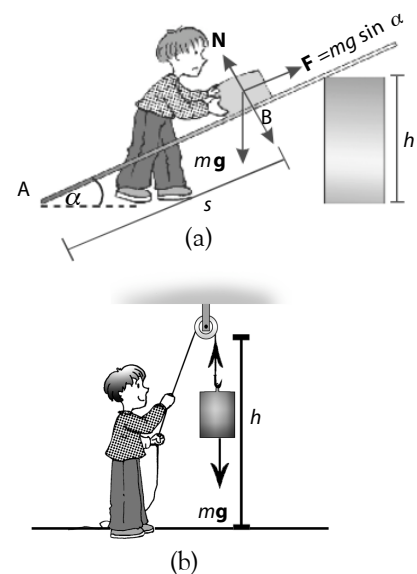
Pada **Gambar 3.12 (a)**, panjang lintasan yang ditempuh (s) membentuk sudut α terhadap bidang horizontal. Dengan demikian, usaha pada lintasan miring (W_{AB}) yang dilakukan Farid adalah

$$\begin{aligned} W_{AB} &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} \\ &= mgs \sin \alpha \\ &= mg \left[\frac{h}{\sin \alpha} \right] \sin \alpha \\ &= mgh \end{aligned} \quad (3-18)$$

Adapun usaha yang dilakukan Samuel untuk memindahkan balok ke ketinggian h menghasilkan lintasan vertikal sepanjang h . Dengan demikian, usaha yang dilakukan Samuel adalah

$$\begin{aligned} W &= Fh \\ &= mgh \end{aligned} \quad (3-19)$$

Berdasarkan kedua contoh tersebut, dapat disimpulkan bahwa usaha yang dilakukan benda bergantung pada ketinggian yang dicapai, tidak bergantung pada cara pengangkatan benda tersebut atau lintasan yang ditempuh selama pengangkatan.



Gambar 3.12

- (a) Farid memindahkan balok ke ketinggian h menggunakan bidang miring, sedangkan (b) Samuel menggunakan katrol dengan lintasan vertikal.

Samakah usaha yang dilakukan keduanya?

Contoh 3.7

Batu bermassa 2 kg jatuh bebas dari ketinggian 20 m di atas tanah. Tentukan perubahan energi potensial dan usaha yang dilakukan gaya berat batu tersebut pada saat mencapai ketinggian 5 m di atas tanah.

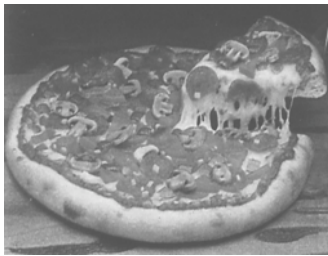
Jawab:

Diketahui:

$$m = 2 \text{ kg}; h_A = 20 \text{ m}; h_B = 5 \text{ m}$$



Tantangan untuk Anda



Sumber: Fisika untuk Sains dan Teknik, 1998

Perhatikan gambar di atas. Jika seorang ahli gizi menyatakan bahwa pada pizza isi daging dan keju tersebut mengandung energi 16 megajoule, bagaimana pendapat Anda jika dikaitkan dengan konsep Fisika? Bagaimana cara mendapatkan angka tersebut?

- Perubahan energi potensial:
 $\Delta E_p = mg(h_B - h_A) = (2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(5 \text{ m} - 20 \text{ m}) = -300 \text{ J}$.
 Jadi, perubahan energi potensial sebesar 300 joule.
- Usaha yang dilakukan gaya berat:
 $W = -mg(h_B - h_A) = -(2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(5 \text{ m} - 20 \text{ m}) = 300 \text{ J}$.
 Usaha positif karena arah gaya berat searah dengan arah perpindahan.
 Jadi, usaha yang dilakukan gaya berat sebesar 300 joule.

Contoh 3.8

Berapakah energi potensial yang dimiliki oleh 400 m^3 air yang berada pada ketinggian 90 m, jika massa jenis air 1.000 kg/m^3 dan percepatan gravitasi di tempat tersebut 10 m/s^2 ?

Jawab:

Air terjun tersebut memiliki massa

$$m = \rho V = (1.000 \text{ kg/m}^3)(400 \text{ m}^3) = 4 \times 10^5 \text{ kg}$$

Energi potensial yang dimiliki air terjun adalah

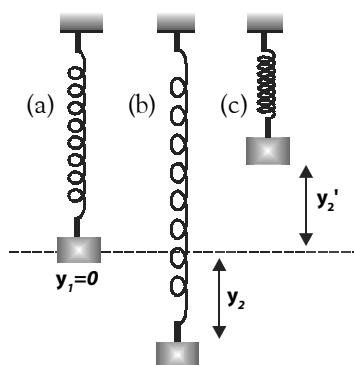
$$E_p = mgh = (4 \times 10^5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(90 \text{ m}) = 3,6 \times 10^8 \text{ J}$$

Jadi, energi potensial yang dimiliki air terjun adalah $3,6 \times 10^8$ joule.

b. Energi Potensial Elastis Pegas

Energi potensial elastis pegas berbeda dengan energi potensial pada umumnya. Energi potensial pegas adalah energi yang dimiliki pegas akibat adanya perubahan panjang atau regangan pegas. Gaya yang bekerja pada pegas memungkinkan pegas untuk meregang.

Perhatikan Gambar 3.13. Pada Gambar 3.13(a), mula-mula pegas dalam keadaan setimbang. Energi potensial pegas dan energi kinetiknya nol. Pada Gambar 3.13(b) dan Gambar 3.13(c), pegas memiliki simpangan sejauh y_2 dan y_2' (panjang $y_2 = y_2'$). Oleh karena ada tarikan sebesar $F = ky$ dan pegas menarik kembali benda sesuai Hukum III Newton, $F_{\text{pegas}} = -k \cdot y$. Besarnya usaha yang dilakukan pegas dari keadaan $y_1 = 0$ ke $y_2 = y$ sama besar dengan perubahan energi potensial pegas antara $y_1 = 0$ dan $y_2 = y$.



Gambar 3.13

- Keadaan awal benda dalam posisi setimbang.
- Pegas ditarik sejauh simpangan y_2 .
- Posisi benda kembali ke titik setimbang karena gaya pegas $F = -ky_2$.

$$\begin{aligned}
 W_{F \text{ pegas}} &= F \Delta s; & \Delta s &= \text{besar perpindahan posisi benda.} \\
 &= - \int_{y=0}^{y_2=y} F \cdot dy \\
 &= - \int_0^y (-ky) dy \\
 &= \frac{1}{2} ky^2
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, besarnya usaha yang dilakukan oleh gaya pegas dinyatakan dengan persamaan

$$W_{F \text{ pegas}} = -\Delta E_{p \text{ pegas}}$$

dengan

$$E_{p \text{ pegas}} = \frac{1}{2} ky^2 \quad (3-20)$$

Ketika pegas dilepaskan, pegas akan melakukan gerak harmonik. Selama pergerakannya, pegas mengalami perubahan energi kinetik menjadi energi potensial pegas, atau sebaliknya. Tidak selamanya pegas melakukan gerak harmonik, pengaruh gaya luar akan membuat pegas berhenti pada posisi kesetimbangan.

Contoh 3.9

Pegas bertambah panjang 10 cm ketika diberi gaya 10 N. Berapakah energi potensial pegas jika gaya pada pegas tersebut dijadikan 2,5 kali lipat?

Jawab:

Diketahui:

$$F_1 = 10 \text{ N}; x_1 = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}.$$

$$k = \frac{F_1}{x_1} = \frac{10 \text{ N}}{0,1 \text{ m}} = 100 \text{ N/m}.$$

$$\text{Jika } F_2 = 2,5 F_1 = (2,5)(10 \text{ N}) \Rightarrow F_2 = 25 \text{ N}.$$

$$x_2 = \frac{F_2}{k_2} = \frac{25 \text{ N}}{100 \text{ N/m}} = 0,25 \text{ m}.$$

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} (100 \text{ N/m})(0,25 \text{ m})^2 = 3,125 \text{ J}.$$

Jadi, besar energi potensial elastis pegas adalah 3,125 J.

Kata Kunci

- energi kinetik
- energi potensial

Tes Kompetensi Subbab B

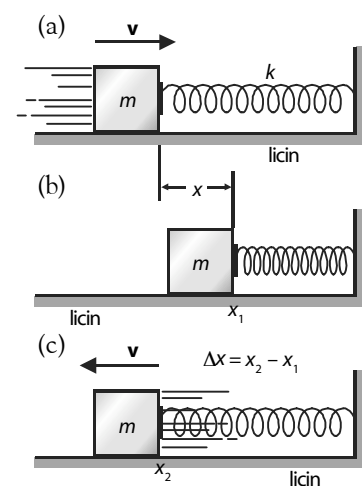
Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah batu kecil bermassa 4 g dilepaskan dari katapel sehingga besar energi kinetik yang dimilikinya adalah 180 joule. Hitung kelajuan batu tersebut.
2. Mobil bermassa 150 kg sedang bergerak dengan kecepatan 72 km/jam, tiba-tiba direm dan berhenti setelah menempuh jarak 20 m. Tentukanlah:
 - a. gaya rem pada mobil; dan
 - b. usaha yang diperoleh dari pengereman.
3. Kereta mainan yang massanya 4 kg dilepaskan dari puncak bidang miring licin dengan sudut kemiringan 30° terhadap horizontal. Jika panjang lintasan bidang miring 12 m dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan perubahan energi potensial di A dan kereta setelah menempuh jarak 10 m.
4. Benda bermassa 0,2 kg dilepaskan dari ketinggian 100 cm.
 - a. Hitunglah usaha yang dilakukan gaya gravitasi pada benda tersebut.
 - b. Hitunglah berkurangnya energi potensial gravitasi benda tersebut.
5. Benda M bermassa 1 kg jatuh menggelincir dari atas bidang miring dengan sudut kemiringan 37° . Benda tersebut menumbuk sebuah pegas yang terletak 1 m dari letak M semula. Jika $k = 200 \text{ N/m}$ dan pegas tertekan maksimum sejauh 10 cm, hitung koefisien gesek antara balok M dengan bidang miring.

C. Gaya Konservatif dan Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Perhatikan Gambar 3.14(a). Sebuah pegas diletakkan di atas lantai dan salah satu ujungnya diikatkan pada dinding. Kemudian, sebuah balok bermassa m meluncur dengan kecepatan v tepat ke arah pegas. Jika lantai datar dan licin, serta pegasnya ideal, sistem akan memenuhi Hukum Hooke, $F = -kx$, dengan F adalah gaya pada pegas saat ujung bebasnya bergeser sejauh x . Keadaan yang diinginkan pada sistem tersebut adalah energi kinetik terpusat pada massa balok sehingga energi kinetik pegas diabaikan. Akibatnya, massa pegas dianggap sangat kecil daripada massa balok.

Ketika balok menyentuh pegas, laju balok berkurang sampai akhirnya berhenti karena gaya pegas yang melawan gaya dorongan dari balok. Perhatikan Gambar 3.14(b). Kemudian, arah balok berbalik akibat gaya pegas bekerja. Akibatnya, balok memperoleh energi kinetiknya kembali seperti saat balok menyentuh pegas, walaupun arahnya berbeda. Balok



Gambar 3.14

Gaya pada pegas merupakan gaya konservatif.

kehilangan energi kinetiknya pada salah satu arah geraknya, tetapi memperoleh energi kinetiknya kembali pada arah gerak yang lain, yaitu ketika balok berbalik ke posisi semula (**Gambar 3.14(c)**).

Pada peristiwa tersebut, usaha yang dilakukan gaya pegas $F = kx$ tidak mengubah energi mekanik sistem pegas. Gaya yang dilakukan oleh pegas tersebut bersifat konservatif. Gaya gravitasi juga bersifat konservatif, dapatkah Anda menjelaskan mengapa gaya gravitasi bersifat konservatif? Dari sudut pandang yang lain, gaya konservatif juga memiliki ciri bahwa jumlah usaha yang dilakukan gaya pada partikel (benda dianggap sebagai partikel) adalah nol. Pada keadaan setimbang (posisi $x = 0$), gaya pegas F_p pada contoh tersebut dinyatakan dengan persamaan

$$F_p = kx \quad (3-21)$$

Tahukah Anda usaha yang dilakukan oleh gaya pegas tersebut? Perhatikan kembali **Gambar 3.14**, ketika benda berpindah dari posisi 1 yang memiliki simpangan x_1 ke posisi 2 dengan simpangan x_2 , besar usaha yang dilakukan gaya pegas terhadap benda dinyatakan dengan persamaan

$$\begin{aligned} W_{1,2} &= -F_p \Delta x \\ W_{1,2} &= -kx \Delta x \end{aligned} \quad (*)$$

Tanda negatif menyatakan bahwa arah gaya pegas F_p berlawanan dengan arah perpindahan Δx . Adapun simpangan x dapat diperoleh dari nilai rata-rata dari simpangan x_1 dan x_2 .

Dengan demikian, persamaan (*) dapat dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} W_{1,2} &= -kx \Delta x \\ W_{1,2} &= -k \left(\frac{x_2 + x_1}{2} \right) (x_2 - x_1) \\ W_{1,2} &= -\frac{k}{2} (x_2 + x_1) (x_2 - x_1) \\ W_{1,2} &= -\frac{k}{2} (x_2^2 - x_1^2) \end{aligned} \quad (**)$$

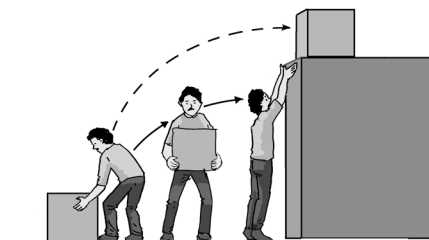
Berdasarkan persamaan (**), jelaslah bahwa usaha yang dilakukan oleh pegas tidak mengubah energi mekanik sistem dan tidak bergantung pada posisi awal dan posisi akhir benda yang dikenai gaya pegas tersebut.

Perhatikan **Gambar 3.15**. Sebuah peti dipindahkan ke tempat lain setinggi h . Usaha yang diperlukan untuk memindahkan peti adalah $W_1 = -mgh$. Tanda negatif timbul karena arah gaya berat W berlawanan dengan arah gerak peti.

Usaha ketika memindahkan peti tidak bergantung pada panjang lintasan yang dilalui peti, tetapi bergantung pada besar perubahan tinggi peti dari kedudukan akhir ke kedudukan awalnya. Jika peti dipindahkan lagi ke posisi awalnya, usaha yang dilakukannya adalah $W_2 = mgh$. Secara matematis, usaha total yang dilakukan untuk memindahkan peti dari bawah ke atas (W_1), lalu dipindahkan lagi ke bawah (W_2) adalah

$$\begin{aligned} W_{\text{tot}} &= W_2 + W_1 \\ &= (-mgh) + (mgh) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Besar usaha pemindahan sebuah peti dari kedudukan awal hingga kembali ke kedudukan akhirnya bernilai nol. Jadi, dapat disimpulkan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya konservatif akan bernilai nol, jika kedudukan akhir benda kembali ke kedudukan awalnya.



Gambar 3.15

Seseorang sedang melakukan usaha memindahkan peti.

Tugas Anda 3.2

Sebutkan contoh-contoh gaya konservatif yang ada di sekitar Anda.

1. Perumusan Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Dalam medan gravitasi, jumlah energi potensial dan energi kinetik suatu benda tetap (jika hanya ada gaya gravitasi). Pernyataan tersebut dikenal sebagai Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Perhatikan **Gambar 3.16**. Sebuah benda bermassa m jatuh bebas. Pada posisi 1, ketinggiannya h_1 terhadap acuan (lantai). Sesaat kemudian, benda berada pada posisi 2 dengan ketinggian h_2 terhadap acuan. Dikatakan bahwa pada benda terjadi pengurangan energi potensial yang besarnya sama dengan usaha yang dilakukan gaya berat.

$$W = - (E_{p2} - E_{p1}) \quad (3-22)$$

Pada posisi 1, kecepatan benda v_1 , kemudian benda turun hingga pada posisi 2 dengan kecepatan v_2 . Pada keadaan tersebut, kecepatan benda bertambah karena pengaruh percepatan gravitasi sehingga usaha yang dilakukan benda sama dengan perubahan energi kinetik, yaitu

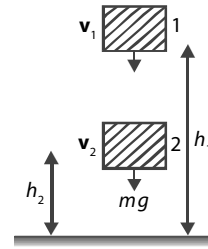
$$W = E_{k2} - E_{k1} \quad (3-23)$$

Berdasarkan **Persamaan (3-22)** dan **Persamaan (3-23)** diperoleh

$$E_{p1} - E_{p2} = E_{k2} - E_{k1}$$

atau

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} \quad (3-24)$$



Gambar 3.16
Balok dijatuhkan dari ketinggian tertentu.

Contoh 3.10

Sebuah bola bermassa m dilemparkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal sebesar v_0 . Tentukan:

- tinggi maksimum yang dicapai; dan
- kecepatan ketika bola mencapai tinggi setengah maksimum.

Jawab:

a. $E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2}$

$$mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$0 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh + 0$$

Oleh karena $v_1 = v_0$ maka $\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh \Rightarrow h = \frac{v_0^2}{2g}$

Jadi, tinggi maksimum yang dicapai adalah $h = \frac{v_0^2}{2g}$.

b. $E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2}$

$$0 + \frac{1}{2}mv_0^2 = mg\left(\frac{1}{2}h_{maks}\right) + \frac{1}{2}mv^2$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mg\left(\frac{1}{2}\frac{v_0^2}{2g}\right) + \frac{1}{2}mv^2$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = m\frac{1}{4}v_0^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

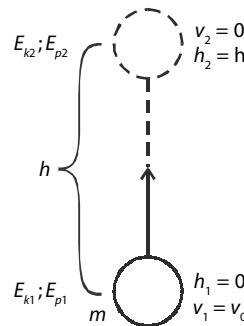
$$\frac{1}{4}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v^2 = \frac{1}{2}v_0^2$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{2}v_0^2}$$

Jadi, kecepatan bola ketika mencapai tinggi setengah tinggi maksimum adalah

$$v = \sqrt{\frac{1}{2}v_0^2}$$



Contoh 3.11

Sebuah batu bermassa m tergantung pada seutas tali yang panjangnya ℓ diberi gaya mendatar. Batu mulai bergerak dengan kelajuan awal v_0 seperti pada gambar, ketika batu menyimpang dengan sudut α , tinggi yang dicapai bola dari titik setimbangnya adalah h . Tentukan:

- tinggi maksimum yang dicapai batu; dan
- besar kecepatan awal batu (v_0).

Jawab:

$$E_{pA} + E_{kA} = E_{pB} + E_{kB}$$

$$mgh_A + \frac{1}{2} mv_A^2 = mgh_B + \frac{1}{2} mv_B^2$$

$$0 + \frac{1}{2} mv_0^2 = mgh_B + 0$$

$$v_0 = \sqrt{2gh} \rightarrow h = \frac{v_0^2}{2g}$$

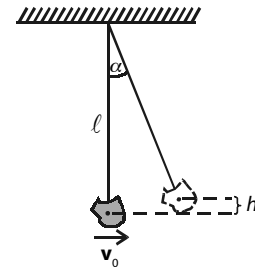
Jadi, tinggi maksimum yang dicapai batu = $\frac{v_0^2}{2g}$.

$$b. \quad \cos \alpha = \frac{\ell - h}{\ell}$$

$$h = \ell - \ell \cos \alpha = \frac{v_0^2}{2g}$$

$$\ell - \ell \cos \alpha = \frac{v_0^2}{2g}$$

$$v_0 = \sqrt{2g\ell(1 - \cos \alpha)}$$



Tugas Anda 3.3

Apakah Anda tahu olahraga *bungee jumping*? Selidikilah Hukum Kekekalan Energi yang bekerja saat orang melakukan *bungee jumping*.

Contoh 3.12

Balok A yang bermassa 5 kg menggelincir dari atas sebuah bidang miring yang sudut miringnya 30° . Balok tersebut kemudian menumbuk pegas yang terletak 8 m dari posisi semula. Jika koefisien gesek antara balok A dengan bidang miring 0,25, berapa meter pegas tertekan? Diketahui konstanta pegas = 500 N/m.

Jawab:

Usaha yang dilakukan gaya pegas adalah negatif karena pegas melawan gaya tekan balok. Artinya, ketika pegas tertekan, pegas melawan gaya tekan sehingga gaya pegas dan arah perpindahan berlawanan arah. Perhatikan gambar berikut.

$$W_{\text{pegas}} = \frac{1}{2} kx^2 = -\frac{1}{2} kb^2$$

$$W_{\text{grav}} = -\Delta E_p = -mg(h_c - h_a)$$

$$= mg(s + b) \sin 30^\circ$$

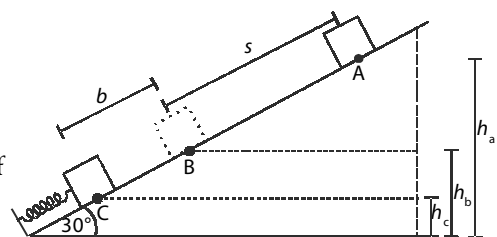
$$= 0,5 mg(s + b)$$

Usaha oleh gesekan bernilai negatif karena arah balok berlawanan dengan arah gaya gesek.

$$W_{\text{gesek}} = -f_k(s + b)$$

$$= -\mu_k mg \cos 30^\circ (s + b)$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{3} mg (s + b) \mu_k$$



Merujuk prinsip energi diketahui bahwa

$$W_{total} = \Delta E_k \text{ sehingga di peroleh}$$

$$W_{pegas} + W_{grav} + W_{gesek} = \frac{1}{2} m (v_c^2 - v_a^2)$$

$$-\frac{1}{2} kb^2 + \frac{1}{2} mg(s+b) - \frac{1}{2} \sqrt{3} mg(s+b) \mu_k = \frac{1}{2} m (0^2 - 0^2)$$

$$-\frac{1}{2} k b^2 + \frac{1}{2} m g \left(0,5 - \frac{1}{2} \sqrt{3} \mu_k \right) b - 0,5 s + \frac{1}{2} \sqrt{3} \mu_k s = 0$$

Anda dapat menyelesaikan persamaan kuadrat tersebut dengan menghitung b dari $m = 5 \text{ kg}$, $k = 500 \text{ N/m}$, $s = 8 \text{ m}$, $\mu_k = 0,25$, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$\frac{500 \text{ N/m}}{(2)(5 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)} b^2 m^2 - \left(0,5 - \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right) (0,25) \right) b - (0,5)(8 \text{ m}) + \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right) (0,25)(8 \text{ m}) = 0$$

$$5 b^2 m^2 - 0,2825 b m - 2,268 \text{ m} = 0$$

$$b_{1,2} = \frac{-(-0,2825) \pm \sqrt{(-0,2825)^2 - (4)(5)(-2,268)}}{10}$$

$$= \frac{0,2825 \pm \sqrt{45,44}}{10}$$

$$= \frac{0,2825 \pm 6,74}{10}$$

$$b_1 = -0,65 \text{ m (tidak terpakai)}$$

$$b_2 = 0,7 \text{ m}$$

Jadi, pegas tertekan sejauh 0,7 m.



Pembahasan Soal

Dua buah benda A dan B yang bermassa masing-masing m , jatuh bebas dari ketinggian h meter dan $2h$ meter. Jika A menyentuh tanah dengan kecepatan $v \text{ m/s}$, benda B akan menyentuh tanah dengan energi kinetik sebesar

- $\frac{3}{2} mv^2$
- mv^2
- $\frac{3}{4} mv^2$
- $\frac{1}{2} mv^2$
- $\frac{1}{4} mv^2$

Soal UMPTN Tahun 1989

Pembahasan:

$$h_B = 2h_A$$

$$\text{Berarti, } E_{pB} = 2 E_{pA}$$

Sesuai dengan Hukum Kekekalan Energi Mekanik maka

$$E_{pB} - E_{pA} = E_{kA} - E_{kB}$$

$$E_{kB} = 2 E_{kA}$$

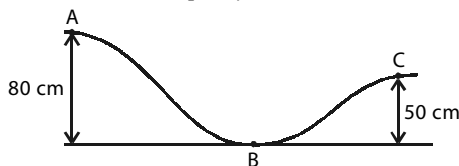
$$= 2 \left(\frac{1}{2} mv^2 \right)$$

$$= mv^2$$

Jawaban: b

Contoh 3.13

Bola dapat bergerak tanpa gesekan pada lintasan seperti gambar berikut. Saat di titik A, bola berkecepatan 200 cm/s. Berapa laju di titik B dan C?



Jawab:

Pada sistem berlaku Kekekalan Energi Mekanik sehingga:

$$a. \quad mgh_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh_B + \frac{1}{2}mv_B^2$$

$$(10 \text{ m/s}^2)(0,8 \text{ m}) + \frac{1}{2}(2 \text{ m/s})^2 = 0 + \frac{1}{2}v_B^2$$

$$v_B = \sqrt{20} \text{ m/s} = 4,44 \text{ m/s}$$

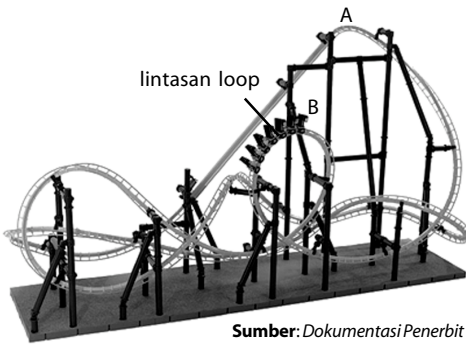
Jadi, kelajuan bola di titik B adalah 4,44 m/s.

$$b. \quad mgh_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh_C + \frac{1}{2}mv_C^2$$

$$(10 \text{ m/s}^2)(0,8 \text{ m}) + \left(\frac{1}{2} \right) (2 \text{ m/s})^2 = (10 \text{ m/s}^2)(0,5 \text{ m}) + \frac{1}{2}v_C^2$$

$$v_C = \sqrt{10} \text{ m/s} = 3,14 \text{ m/s}$$

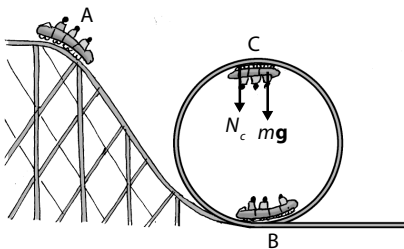
Jadi, kelajuan bola di titik C adalah 3,14 m/s.



Sumber: Dokumentasi Penerbit

Gambar 3.17

Lintasan roller coaster.



Gambar 3.18

Lintasan roller coaster dengan loop berbentuk lingkaran.

2. Analisis Gerak pada Roller Coaster

Hampir semua teknologi di taman hiburan seperti *Disney Land*, *Disney World*, atau *Dunia Fantasi* sangat kaya akan konsep fisika. Di antara sejumlah permainan yang ada, *roller coaster* atau yang biasa disebut halilintar dapat mendorong Anda untuk memahami lebih dalam konsep fisika tentang gerak. Perhatikan **Gambar 3.17**. Kendaraan tanpa mesin menggunakan ban berjalan (*conveyor belt*) untuk naik ke puncak bukit A melalui lintasan yang tidak terlalu curam.

Puncak bukit A sengaja dirancang lebih tinggi daripada puncak loop B, hal tersebut memungkinkan energi potensial kendaraan di A yang lebih besar sehingga mampu berjalan melalui lintasan menuju puncak B dengan baik. Lintasan loop sengaja dibuat seperti tetesan air terbalik. Jika loop berupa lingkaran penuh, akan diperoleh bobot penumpang enam kali bobot normalnya saat kendaraan di posisi terendah, kondisi ini dapat menyebabkan pusing lalu pingsan. Lintasan loop yang seperti tetesan air hanya memberikan bobot maksimum 3,7 kali bobot normalnya, pada bobot tersebut penumpang masih merasakan kenyamanan.

Ketika *roller coaster* berada di titik tertinggi dari lintasan loop, yaitu di titik C seperti yang Anda lihat pada **Gambar 3.18**, gaya sentripetalnya adalah resultan dari N_c (gaya tekan) dan besar gaya berat penumpang mg sehingga

$$F_s = N_c + mg = m \frac{v^2}{R}$$

Syarat kelajuan minimal di titik C adalah $N_c = 0$ sehingga diperoleh

$$0 + mg = m \frac{v_c^2}{R}$$

$$v_{C_{\min}} = \sqrt{gr}$$

Ketika *roller coaster* berada di titik terendah, yaitu titik B,

$$E_{pB} = 0$$

$$E_{kB} + E_{pB} = E_{kC} + E_{pC}$$

$$\frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B = \frac{1}{2}mv_C^2 + mgh_C$$

Kalikan kedua ruas persamaan tersebut dengan $\frac{2}{m}$ sehingga diperoleh

$$2gh_B + v_B^2 = 2gh_C + v_C^2$$

Oleh karena $h_B = 0$; $h_C = 2R$; dan $v_C^2 = gR$ maka persamaan menjadi

$$0 + v_B^2 = 2g(2R) + gR$$

$$v_{B_{\min}} = \sqrt{5gR} \quad (3-25)$$

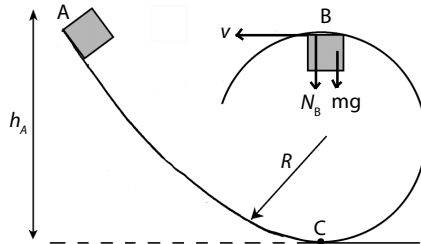
Ketinggian awal minimal luncuran di titik A dapat Anda hitung melalui penerapan Hukum Kekekalan Energi Mekanik di titik A dan C agar *roller coaster* mampu melewati loop dengan aman.

Contoh 3.14

Seotong balok bermassa m meluncur pada suatu talang (lingkaran dalam) seperti terlihat pada gambar. Jika gaya gesek antara balok dan talang diabaikan,

- berapakah ketinggian minimum balok yang harus dilepas agar gerakannya dapat mencapai puncak lingkaran (titik B)?; dan
- tentukanlah besar percepatan balok di titik B.

Jawab:



- Gunakan rumus kelajuan minimum pada titik terendah, **Persamaan (3–25)**.

Jadi, kelajuan minimum di titik C besarnya $v_{C\min} = \sqrt{5gR}$ sehingga antara titik

A dan C dengan menggunakan hukum kekekalan energi mekanik.

$$E_{pA} + E_{kA} = E_{pC} + E_{kC}$$

$$mgh_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh_C + \frac{1}{2}mv_C^2$$

$$mgh_A + 0 = 0 + \frac{1}{2}m(5gR)$$

$$h_A = 2,5R$$

Jadi, ketinggian minimum agar balok mencapai titik B adalah $2,5R$.

- Besar percepatan di titik B adalah percepatan sentripetal. Berdasarkan gambar, di titik B

$$F_s = N + mg$$

$$ma_s = mg, \text{ di mana } N = 0$$

$$a_s = g$$

Jadi, percepatan balok di titik B adalah $a_s = g$.

Kata Kunci

- energi mekanik
- gaya konservatif
- gaya sentripetal
- kelajuan minimal
- konstanta pegas

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Apakah yang Anda ketahui tentang gaya konservatif dan gaya tidak konservatif?
- Apakah hukum kekekalan energi mekanik berlaku pada sebuah benda, jika gaya konservatif bekerja pada benda tersebut?
- Dua buah benda A dan B yang bermassa masing-masing m , jatuh bebas dari ketinggian h meter dan $2h$ meter. Jika A menyentuh tanah dengan kecepatan V m/s, tentukanlah energi kinetik benda B saat akan menyentuh tanah.
- Sebuah balok bermassa 5 kg mula-mula diam. Balok tersebut kemudian dijatuhkan dari suatu ketinggian 6,5 cm pada sebuah pegas yang konstanta gayanya 100 N/m. Jika $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, berapa meter pegas tertekan?
- Tole memindahkan buku dari lantai ke atas meja. Berapa usaha total yang diterima oleh buku tersebut?
- Tiga batu bata yang tebalnya 8 cm diletakkan di atas sebuah meja. Hitunglah usaha untuk menumpuk ketiga batu bata tersebut dalam satu tumpukan jika massa setiap batu bata = 1,5 kg.

7. Sebuah kelapa jatuh bebas dari ketinggian 6 meter. Jika massa buah kelapa 2,5 kg dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah kecepatan buah kelapa saat mencapai ketinggian 2 meter dari tanah dan energi kinetik buah kelapa sesaat sebelum mencapai tanah.
8. Sebuah kereta melewati lintasan *roller coaster* dengan diameter 20 m. Agar kereta dapat melintas dengan aman, tentukanlah kecepatan minimum kereta tersebut.
9. Sebuah benda bermassa 0,75 kg jatuh bebas dari ketinggian 8 meter di atas tanah. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah:
 - a. kecepatan benda saat tiba di tanah; dan
 - b. usaha oleh gaya berat selama perpindahan.
10. Sebuah peluru ditembakkan miring ke atas dengan sudut elevasi 45° dan energi kinetik sebesar 150 J. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah energi kinetik dan energi potensial benda pada saat mencapai titik tertinggi.



D. Daya

Anda telah belajar tentang cara menghitung usaha dari gaya yang dilakukan. Dibandingkan mengetahui besar usaha, lebih menarik mengetahui seberapa laju usaha tersebut dikerjakan. Tentunya besaran waktu di dalam bahasan ini menjadi sangat berperan. Saat usaha per satuan waktu didefinisikan, muncullah istilah daya.

Perlu Anda ingat bahwa daya tidak ditentukan oleh besar energi yang dimiliki suatu benda. Untuk lebih memahaminya, perhatikan contoh berikut. Ucok dan Butet bermassa sama, yaitu 50 kg, menaiki lantai dua sekolahnya setinggi 3 meter. Keduanya memiliki energi sama besar untuk melakukan usaha 1.500 joule. Energi potensial yang dimiliki mereka sama, walaupun kenyataannya Ucok sampai di lantai dua lebih cepat. Dari uraian contoh tersebut diketahui bahwa artinya usaha belum dapat memberikan informasi lebih lengkap tentang perpindahan akibat pengaruh gaya. Dalam peristiwa ini, dapat dikatakan bahwa Ucok memiliki daya lebih besar daripada Butet walaupun keduanya memiliki kemampuan untuk menghasilkan energi yang sama.

Jadi, daya adalah besaran fisika yang menyatakan usaha yang dilakukan oleh benda setiap sekonnya atau laju energi yang dibutuhkan benda setiap sekonnya.

Tugas Anda 3.4

Sebutkan contoh alat-alat yang mencantumkan besaran daya yang ada di sekitar Anda.

$$\text{Daya (rata-rata)} = \frac{\text{usaha}}{\text{selang waktu}}$$

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} \quad \text{atau} \quad \bar{P} = \frac{F \Delta s}{\Delta t} = F \bar{v} \quad (3-26)$$

Keterangan:

W = usaha yang dilakukan (joule)

Δt = waktu yang diperlukan (sekon)

\bar{v} = kelajuan rata-rata (m/s)

Dalam sistem SI, satuan daya diturunkan dari satuan usaha, yaitu J/s. Satuan tersebut sering disebut watt, ditetapkan sebagai penghargaan terhadap ilmuwan Skotlandia, yaitu **James Watt** (1736–1819).

Satuan daya dalam kemampuan sebuah mesin biasa menggunakan satuan *horse power* (*hp*) atau daya kuda.

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ watt} = 0,746 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ (kW)(1 jam)} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

kWh adalah satuan usaha atau energi, bukan satuan daya. Satuan tersebut banyak digunakan untuk menyatakan energi listrik. Jika setrika listrik memiliki daya 300 watt, elemen setrika tersebut energi listrik melakukan kerja atau usaha 300 joule setiap sekonnnya.

Contoh 3.15

Rinto yang bermassa 50 kg menaiki tangga ke lantai tiga setinggi 12 m selama 0,5 menit. Berapakah daya rata-rata yang dilakukan Rinto?

Jawab:

Diketahui:

$$m = 50 \text{ kg}$$

$$h = 12 \text{ m}$$

$$t = 0,5 \text{ menit}$$

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{mgh}{\Delta t}$$

$$P = \frac{(50 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(12 \text{ m})}{30 \text{ s}} = 200 \text{ watt}$$

Jadi, Rinto mengeluarkan daya sebesar 200 watt.

Contoh 3.16

Sebuah mesin pompa sentrifugal dapat memindahkan 300 kg air ke bak yang tingginya 8 meter selama 2,5 menit. Jika efisiensi mesin pompa tersebut hanya 80%, berapakah daya rata-rata listrik yang diperlukan?

Jawab:

Diketahui: $m = 300 \text{ kg}$

$$h = 8 \text{ m}$$

$$t = 2,5 \text{ menit} = 150 \text{ s}$$

Daya yang diperlukan untuk memindahkan air adalah

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{mgh}{\Delta t}$$
$$= \frac{(300 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(8 \text{ m})}{150 \text{ s}} = 160 \text{ watt}$$

Daya yang diperlukan pompa untuk memperoleh usaha sebesar 160 watt dengan efisiensi mesin 80% adalah

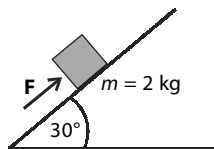
$$P = \frac{160 \text{ watt}}{80\%} = \frac{160 \text{ watt}}{0,8} = 200 \text{ watt.}$$

Jadi, daya pompa agar efisiensinya 80% harus sebesar 200 watt.

Tes Kompetensi Subbab D

Kerjakanlah dalam buku latihan.

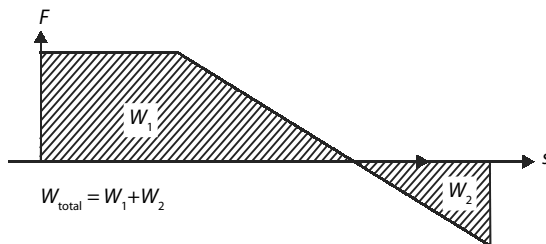
- Rino menaiki tangga yang tingginya 5 m dalam waktu 6 detik. Hitunglah daya rata-rata Rino dalam satuan *hp* jika massanya 60 kg. ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).
- Sebuah pompa mesin digerakkan oleh motor listrik yang memiliki daya 3 *hp*. Mesin tersebut akan menaikkan beban 223,8 kg ke tempat yang tingginya 14 m. Hitunglah waktu yang dibutuhkan untuk menaikkan beban tersebut.
- Sebuah mobil menggunakan mesin 10 *hp*. Berapa gaya rata-rata yang diberikan mesin mobil tersebut agar dapat bergerak dengan kecepatan konstan 90 km/jam?
- Sebuah balok bermassa 2 kg berada dalam keadaan diam di atas bidang miring. Balok tersebut mendapat gaya *F* sebesar 16 N searah bidang miring ke atas.
- Sebuah mesin pompa dapat memindahkan 500 kg air ke sebuah bak yang tingginya 12 m selama 15 menit. Jika efisiensi mesin pompa ini 80%, berapakah daya listrik yang diperlukan?
- Joan bermain papan luncur di ketinggian 2 meter dari lantai. Jika kecepatan Joan pada awal peluncuran 3 m/s, berapakah kecepatannya ketika menyentuh lantai?
- Dari ketinggian 30 m, sebuah kelapa yang memiliki massa 0,5 kg jatuh dari pohon. Berapakah energi kinetik yang dimiliki kelapa pada saat mencapai ketinggian 10 m di atas tanah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)?
- Sebuah benda yang massanya 6 kg bergerak dengan kecepatan tetap 4 m/s. Kemudian, benda tersebut diberi gaya sehingga benda mengalami perlambatan, kemudian berhenti setelah menempuh jarak 12 m. Tentukan:
 - besar gaya pengereman yang bekerja pada benda;
 - usaha yang dilakukan benda hingga berhenti.



- Tentukan kecepatan balok setelah menempuh jarak $s = 0,5 \text{ m}$ sepanjang bidang miring.
- Hitung daya yang diberikan oleh gaya *F* ($s = 0,5 \text{ m}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$; sudut bidang miring = 30°)

Rangkuman

- Usaha adalah besarnya gaya (*F*) searah perpindahan (*s*) dikali dengan besarnya perpindahan $W = F \cos \alpha s$ atau $W = Fs \cos \alpha$ dengan α adalah sudut antara gaya dan perpindahan. Usaha berharga negatif menunjukkan bahwa gaya yang bekerja berlawanan dengan arah perpindahan.
- Pada grafik gaya terhadap perpindahan, besar usaha merupakan luas daerah yang diarsir.



- Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Energi kinetik adalah energi yang dimiliki oleh setiap benda yang bergerak.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Energi potensial adalah energi yang dimiliki oleh setiap benda karena kedudukannya. Jika keadaan memungkinkan, energi tersebut dapat dimunculkan.

$$E_p = mgh \text{ untuk energi potensial gravitasi}$$

$$E_{p \text{ elastis}} = \frac{1}{2} k x^2 \text{ untuk energi potensial pegas}$$

- Usaha merupakan perubahan energi dari suatu benda.

$$W = E_{k2} - E_{k1} \text{ untuk energi kinetik}$$

$$W = E_{p2} - E_{p1} \text{ untuk energi potensial}$$
- Hukum Kekekalan Energi Mekanik: "Jika pada suatu sistem yang bekerja hanya gaya-gaya konservatif, energi mekanik sistem selalu tetap."

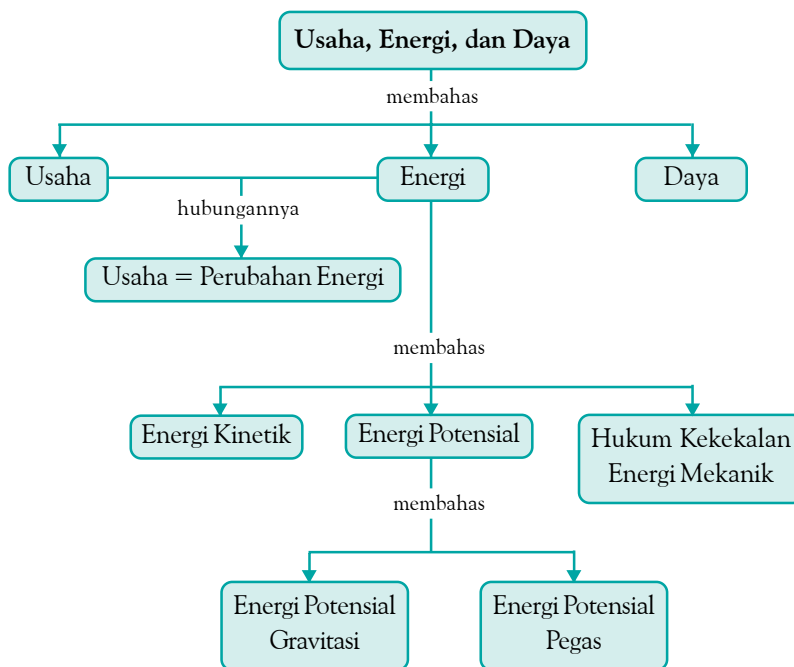
$$E_M = E_p - E_k = \text{konstan}$$

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2}$$

6. Usaha total yang dilakukan oleh gaya konservatif hanya memperhatikan keadaan awal dan keadaan akhir posisi benda, lintasan tidak memengaruhi.

7. Daya adalah usaha yang dilakukan oleh benda setiap sekon atau laju energi yang berubah menjadi energi bentuk lain.

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda dapat memahami konsep usaha, energi, dan daya. Anda juga tentu dapat mengetahui hubungan antara usaha, energi, dan daya. Nah, dari materi-materi bab ini, bagian manakah yang Anda anggap sulit? Coba diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Dengan mempelajari konsep usaha, Anda dapat menentukan usaha dengan menentukan lintasan yang lebih efisien untuk dilakukan. Hal tersebut adalah salah satu manfaat mempelajari bab ini. Coba Anda sebutkan manfaat lain setelah mempelajari bab ini.

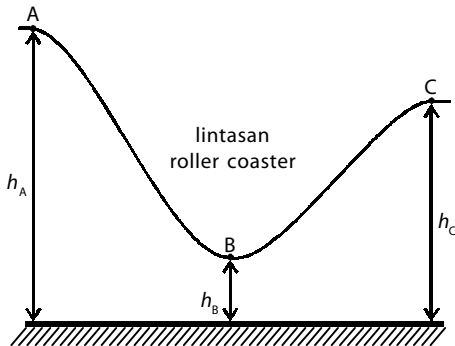
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

- Satuan-satuan berikut ini yang *tidak* termasuk satuan usaha adalah
 - newton meter
 - joule
 - $\text{kgm}^2/\text{s}^{-2}$
 - kgm^2/s^2
 - kgm^2/s
 - Besaran-besaran berikut ini *tidak* memiliki satuan sama adalah
 - usaha-energi
 - usaha-energi kinetik
 - energi potensial-energi kinetik
 - tenaga-usaha
 - gaya-usaha
 - Sebuah benda massanya 6 kg dalam keadaan diam. Kemudian, benda tersebut diberi gaya tetap sebesar 30 N selama 4 detik. Usaha yang dilakukan gaya tersebut adalah
 - 1.200 J
 - 1.100 J
 - 1.000 J
 - 800 J
 - 600 J
 - Bu Mina membawa keranjang bermassa 20 kg dan berjalan sejauh 10 m. Jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 , besar usaha yang dilakukan Bu Mina adalah
 - 2.000 J
 - 1.000 J
 - 200 J
 - 100 J
 - nol
 - Mobil yang massanya 2.000 kg direm dengan gaya 40.000 N sehingga berhenti pada jarak 2 m. Besar usaha saat pengereman mobil tersebut adalah
 - $1,6 \times 10^5 \text{ J}$
 - $8 \times 10^4 \text{ J}$
 - $4 \times 10^4 \text{ J}$
 - $8 \times 10^3 \text{ J}$
 - $4 \times 10^3 \text{ J}$
 - Benda bermassa 11 kg terletak pada bidang datar. Benda tersebut diberi gaya 100 N yang membentuk sudut 30° terhadap bidang datar. Jika benda berpindah sejauh 2 m, besar usaha yang dilakukan benda adalah
 - $110\sqrt{3} \text{ J}$
 - $100\sqrt{3} \text{ J}$
 - $55\sqrt{3} \text{ J}$
 - $50\sqrt{3} \text{ J}$
 - $25\sqrt{3} \text{ J}$
 - Pada bidang miring dan licin AB, dilepaskan benda tanpa kecepatan awal hingga benda berada di kaki bidang miring sejauh 5 m. Jika $\sin \alpha = 0,8$, kecepatan benda AB adalah
 - $5\sqrt{5} \text{ m/s}$
 - $4\sqrt{5} \text{ m/s}$
 - $3\sqrt{5} \text{ m/s}$
 - $2\sqrt{5} \text{ m/s}$
 - $\sqrt{5} \text{ m/s}$
 - Sebuah gaya $\mathbf{F} = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \text{ N}$ melakukan usaha dengan titik tangkapnya berpindah menurut $\mathbf{r} = (4\mathbf{i} + a\mathbf{j}) \text{ m}$ dan vektor \mathbf{i} dan \mathbf{j} berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu- x dan sumbu- y pada koordinat Cartesius. Jika usaha tersebut bernilai 26 J, nilai a sama dengan
 - 5
 - 6
 - 7
 - 8
 - 12
- (UMPTN 1991)
- Gerobak dengan massa 20 kg terletak pada bidang miring yang sudut kemiringannya 30° terhadap bidang horizontal. Jika diketahui percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan gerobak bergeser sejauh 3 m ke arah bawah, usaha yang dilakukan oleh gaya berat adalah
 - 60 J
 - $60\sqrt{3} \text{ J}$
 - 150 J
 - 200 J
 - 300 J
 - Sebuah benda bermassa 5 kg jatuh bebas dari ketinggian 150 m. Jika besar percepatan gravitasi g sama dengan 10 m/s^2 , kecepatan benda saat berada di ketinggian 25 m dari tanah adalah
 - 25 m/s
 - 35 m/s
 - 40 m/s
 - 50 m/s
 - 75 m/s
 - Air terjun setinggi 8 m mengalirkan 10 m^3 air setiap sekon. Massa jenis air $= 1.000 \text{ kg/m}^3$ dan percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$. Jika hanya 10% energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik, besar energi listrik yang dapat dihasilkan setiap sekonnya adalah

- a. 70 kJ
b. 75 kJ
c. 80 kJ
d. 90 kJ
e. 95 kJ
12. Sebuah pot jatuh bebas dari tempat yang tingginya 80 m. Jika energi potensial awal pot sebesar 4.000 joule dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tepat sebelum sampai di tanah kecepatannya adalah
a. 50 m/s
b. 40 m/s
c. 35 m/s
d. 25 m/s
e. 20 m/s
13. Sebuah palu bermassa 2 kg dan berkecepatan 20 m/s menghantam sebuah paku sehingga paku masuk ke dalam kayu 5 cm. Besar gaya tahanan yang disebabkan kayu adalah
a. 400 N
b. 800 N
c. 4.000 N
d. 8.000 N
e. 40.000 N
- (SIPENMARU 1989)**
14. Air terjun setinggi 10 m dengan debit sebesar $50 \text{ m}^3/\text{s}$ dimanfaatkan untuk memutar turbin yang menggerakkan generator listrik. Jika 25% energi air terjun dapat diubah menjadi listrik, daya kekuatan generator setiap sekonnya sama dengan
a. 0,90 mW
b. 1,10 mW
c. 1,25 mW
d. 1,30 mW
e. 1,50 mW
15. Jika Anda bersepeda menuruni bukit tanpa mengayuh dan besar kecepatannya 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
- (Tes ITB 1975)**
16. Sebuah bola digantungkan pada ujung tali yang panjangnya 1,5 m. Bola ditarik ke samping sehingga tali membentuk sudut 60° terhadap vertikal. Jika bola dilepaskan, kelajuan bola pada kedudukan terendah adalah
a. 15 m/s
b. 20 m/s
c. 25 m/s
d. $\sqrt{15} \text{ m/s}$
e. $\sqrt{20} \text{ m/s}$
17. Sebuah benda yang bermassa 4 kg mula-mula diam, kemudian bergerak lurus dengan percepatan 3 m/s^2 . Usaha yang menjadi energi kinetik setelah 2 detik adalah
a. 6 joule
b. 12 joule
c. 24 joule
d. 48 joule
e. 72 joule
18. Sebuah pegas memiliki tetapan $k = 200 \text{ N/m}$. Jika pada ujung pegas tersebut digantungkan beban yang beratnya 10 N, energi potensial yang disimpan dalam pegas tersebut adalah
a. 0,05 J
b. 0,10 J
c. 0,15 J
d. 0,20 J
e. 0,25 J
19. Dua benda A dan B masing-masing bermassa m jatuh bebas dari ketinggian h meter dan $2h$ meter. Jika A menyentuh tanah dengan kecepatan $v \text{ m/s}$, benda B akan menyentuh tanah dengan energi kinetik sebesar
a. $\frac{3}{2} mv^2$
b. mv^2
c. $\frac{3}{4} mv^2$
d. $\frac{1}{2} mv^2$
e. $\frac{1}{4} mv^2$
20. Sebuah pegas ditarik dengan gaya 100 N hingga bertambah panjang 5 cm. Besar energi potensial pegas tersebut adalah
a. 0,5 J
b. 1,0 J
c. 1,5 J
d. 2,0 J
e. 2,5 J

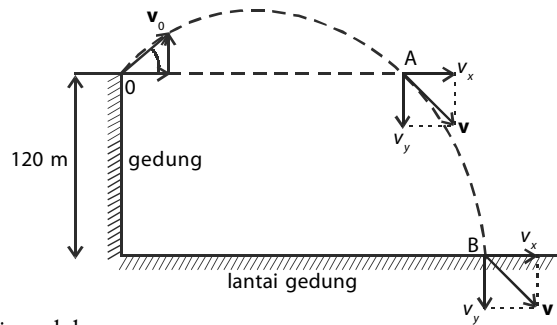
B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Sebuah benda yang massanya 2 kg dari keadaan diam bergerak hingga kecepatannya menjadi 10 m/s selama 2 sekon karena pengaruh gaya F . Berapakah besar usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut?
2. Sebuah benda memiliki massa 4 kg dalam keadaan diam. Kemudian, bergerak lurus dengan kecepatan 3 m/s selama 2 detik. Samakah besar usaha dan perubahan energi kinetik yang terjadi? Jelaskan.
3. Sebuah peluru bermassa 2 kg ditembakkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal 50 m/s. Tinggi yang dicapai peluru adalah 100 m. Berapakah besarnya perubahan energi mekanik menjadi energi panas pada peristiwa tersebut? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
4. Sebuah benda ditembakkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal v_0 . Tinggi maksimum yang dicapai adalah h . Nyatakan ketinggian benda dalam h pada saat energi potensial benda sama dengan energi kinetiknya?
5. Sebuah *roller coaster* (di Dunia Fantasi Ancol disebut halilintar) mendaki ke ketinggian maksimumnya $h_A = 50 \text{ m}$ di atas tanah dengan kelajuan $v_1 = 0,5 \text{ m/s}$. Kemudian, *roller coaster* meluncur ke bawah ke ketinggian minimumnya $h_B = 5 \text{ m}$ sebelum mendaki kembali menuju ketinggian $h_C = 20 \text{ m}$.



Jika gaya gesek *roller coaster* dan lintasannya diabaikan, tentukan kelajuan *roller coaster* pada kedua titik tersebut.

6. Sebuah benda bermassa 3 kg digantung dengan seutas tali yang panjangnya 2 m. Ujung tali yang lain diikat pada langit-langit. Benda dipukul sehingga bergerak dengan kecepatan tetap $2\sqrt{5} \text{ m/s}$. Berapakah besar sudut maksimum yang dibentuk tali terhadap arah vertikal?
7. Bola yang massanya 0,4 kg dilemparkan ke arah horizontal dengan kecepatan 10 m/s dari puncak menara gedung yang tingginya 120 m.



Hitunglah:

- a. energi kinetik awal;
 - b. energi potensial awal;
 - c. energi kinetik bola ketika menumbuk tanah;
 - d. kelajuan bola ketika menumbuk tanah.
8. Pada sebuah pegas tergantung beban yang massanya 1 kg. Pegas tersebut bertambah panjang 5 cm. Hitunglah energi potensial pegas dan berapakah besar energi potensial pegas jika bebannya ditambah 2 kg? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
 9. Sebuah balok bermassa 3 kg mula-mula diam. Balok tersebut kemudian dijatuhkan dari ketinggian 1 m pada sebuah pegas. Ternyata, pegas tertekan maksimum sebesar 40 cm. Berapakah konstanta pegas tersebut? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
 10. Air terjun 8 m dengan debit $50 \text{ m}^3/\text{s}$ digunakan untuk memutar generator listrik. Jika diketahui $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan hanya 10% energi air yang berubah menjadi energi listrik, berapa watt daya yang dihasilkan generator tersebut?

(petunjuk: $\text{daya} = \frac{\text{energi}}{\text{sekon}}$, memiliki satuan watt)

Bab 4



Sumber: www.savannah.com

Petinju secara rutin berlatih meningkatkan kecepatan pukulan dan berusaha mempersingkat interaksi dengan sasarannya. Petinju juga menggunakan sarung tangan ketika bertinju.

Momentum, Impuls, dan Tumbukan

Hasil yang harus Anda capai:

menganalisis gejala alam dan keteraturan dalam cakupan mekanika benda titik.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

menunjukkan hubungan antara konsep impuls dan momentum untuk menyelesaikan masalah tumbukan.

Pernahkah Anda menonton pertandingan tinju di TV? Tinju merupakan salah satu olahraga yang cukup digemari. Sebagai bekal saat bertanding, seorang petinju melatih pukulannya secara teratur dan intensif. Seperti yang Anda lihat pada gambar di atas, seorang petinju melatih pukulannya pada suatu sasaran dengan memakai sarung tinju. Petinju berlatih secara intensif agar refleks dan kecepatan pukulan semakin meningkat. Semakin singkat interaksi pukulan dengan sasaran, semakin baik kualitas pukulan.

Pernahkah Anda berpikir, mengapa petinju harus menggunakan sarung tinju? Apakah pengaruh yang dirasakan petinju ketika lawannya memukul dengan sarung tinju? Mengapa petinju dituntut memiliki pukulan secepat mungkin? Pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat Anda jawab jika Anda dapat memahami isi bab ini.

- A. Momentum Linear**
- B. Tumbukan**
- C. Jenis Tumbukan**
- D. Tumbukan Lenting Sebagian pada Benda Jatuh Bebas**
- E. Ayunan Balistik**
- F. Gaya Dorong Roket**

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Momentum, Impuls, dan Tumbukan, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Apakah setiap benda yang memiliki momentum juga memiliki energi?
2. Jika dua buah benda memiliki energi kinetik sama besar, tetapi massanya berbeda, benda mana yang memiliki momentum lebih besar?
3. Apa yang dimaksud dengan koefisien restitusi?
4. Bola A bermassa 2 kg bergerak dengan kecepatan 2 m/s. Bola B bermassa 1 kg bergerak berlawanan arah terhadap benda A dengan kecepatan 6 m/s. Setelah bertumbukan, kecepatan bola B menjadi 3 m/s. Berapakah kecepatan akhir bola A?

A. Momentum Linear

Setiap benda yang bergerak dengan kecepatan tertentu dipastikan memiliki momentum. Besarnya momentum sangat bergantung pada massa dan kecepatan benda tersebut. Momentum yang dimiliki suatu benda adalah hasil perkalian antara massa dan kecepatan benda pada saat tertentu.

Persamaan momentum suatu benda yang bermassa m dan bergerak dengan kecepatan v secara matematis dirumuskan sebagai berikut.

$$\mathbf{p} = mv \quad (4-1)$$

Keterangan:

\mathbf{p} = momentum benda (kgm/s)

m = massa benda (kg)

v = kecepatan benda (m/s)

Momentum adalah sebuah besaran vektor yang arahnya sama dengan arah kecepatan benda. *Isaac Newton* mengemukakan hukum gerak yang kedua dikaitkan dengan momentum. Ia mengatakan momentum sebagai kuantitas gerak. Hukum II Newton mengatakan bahwa, perubahan momentum benda tiap satuan waktu sebanding dengan gaya resultan yang bekerja pada benda dan berarah sama dengan arah gaya tersebut. Secara matematis, dapat ditulis sebagai berikut.

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad (4-2)$$

Persamaan (4-2) setara dengan bentuk $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ untuk sebuah partikel tunggal dengan massa m (konstan). Perhatikan hubungannya dalam bentuk berikut ini.

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} \quad (4-3)$$

Pada teori relativitas (Anda akan mempelajarinya di Kelas XII dalam bahasan Fisika Modern), Hukum II Newton untuk partikel tunggal bentuk

$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ tidak berlaku, tetapi Hukum II Newton bentuk $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$ tetap berlaku.

1. Hukum Kekekalan Momentum Linear

Jika partikel mengalami total gaya luar \mathbf{F} nol, **Persamaan (4-2)** dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = 0 \text{ atau } \mathbf{p} = \text{tetap} \quad (4-4)$$

Tugas Anda 4.1

Jika Anda bersepeda dengan kecepatan tinggi, manakah yang memiliki momentum lebih besar, sepeda atau Anda? Apakah hal tersebut dapat memberikan penjelasan, mengapa Anda akan terpelanting ke depan ketika sepeda berhenti mendadak?

Ingatlah

Kecepatan yang berada pada kerangka satu-dimensi, penulisan notasi vektornya dapat diganti dengan notasi skalar.

Persamaan (4-4) menyatakan bahwa jika gaya luar total pada sebuah partikel adalah nol, momentum linear total \mathbf{p} dari sistem adalah tetap. Pernyataan tersebut dikenal dengan *Hukum Kekekalan Momentum Linear* yang dinyatakan dengan

$$\mathbf{p}_{\text{awal}} = \mathbf{p}_{\text{akhir}} \quad (4-5)$$

Persamaan (4-5) mengandung pengertian bahwa momentum linear total pada waktu awal sama dengan momentum linear total pada waktu akhir. Ingat, **Persamaan (4-5)** adalah bentuk vektor. Oleh karena itu, arah momentum linearnya bergantung pada arah.

2. Momentum Linear dan Impuls

Perhatikan **Gambar 4.1**. Sebuah mobil bermassa m terletak pada bidang datar bergerak dengan kecepatan v_1 , kemudian diberi gaya tetap \mathbf{F} sehingga kecepatannya berubah menjadi v_2 selama Δt .

Dari Hukum II Newton, diperoleh persamaan

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (4-6)$$

Pada gerak lurus dipercepat berlaku

$$\mathbf{a} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \quad (4-7)$$

Dari **Persamaan (4-6)** dan **Persamaan (4-7)** didapatkan

$$\mathbf{F} = m \frac{(v_2 - v_1)}{\Delta t} \quad (4-8)$$

Menurut Hukum II Newton yang dikaitkan dengan momentum linear menyatakan bahwa gaya (\mathbf{F}) yang diberikan pada benda besarnya sama dengan perubahan momentum (\mathbf{p}) benda per satuan waktu (t). Lihat **Persamaan (4-2)**, yaitu $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$. Berarti, **Persamaan (4-8)** sesuai dengan **Persamaan (4-2)**.

Oleh karena itu, gaya rata-ratanya adalah

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} \\ &= \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{\Delta t} \end{aligned}$$

sehingga

$$\mathbf{F}\Delta t = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1 \quad (4-9)$$

Berdasarkan **Persamaan (4-9)**, Anda mengetahui bahwa hasil kali gaya (\mathbf{F}) dan selang waktu lamanya gaya bekerja (Δt) sama dengan perubahan momentum atau selisih antara momentum akhir ($m\mathbf{v}_2$) dan momentum awal ($m\mathbf{v}_1$) benda untuk gaya \mathbf{F} yang tetap.

Nilai $\mathbf{F}\Delta t$ dikenal sebagai impuls yang dilambangkan dengan \mathbf{I} . Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa impuls yang bekerja pada suatu benda sama dengan perubahan momentum yang terjadi pada benda tersebut.

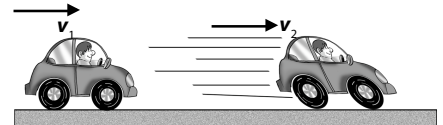
$$\mathbf{I} = \mathbf{F}\Delta t \quad (4-10)$$

Keterangan:

\mathbf{I} = impuls (Ns)

\mathbf{F} = gaya (N)

Δt = selang waktu (s)



Gambar 4.1

Sebuah mobil yang mengalami percepatan sehingga kecepatannya berubah dari v_1 menjadi v_2 .



Tokoh

Werner Heisenberg
(1901–1976)



Sumber: *Conceptual Physics*, 1998

Ia dilahirkan di Duisberg, Jerman. Ia mempelajari fisika teoritis di Munich, di tempat ini pun ia menjadi penggemar ski dan pendaki gunung. Hasil pemikirannya yang terkenal ialah prinsip ketidakpastian Heisenberg yang didasarkan pada konsep momentum, yaitu foton yang digunakan untuk mengamati posisi elektron memiliki momentum yang relatif sama. Oleh karena itu, ketika terjadi tumbukan antara foton dan elektron akan mengubah posisi elektron.

Ingatlah



Impuls sebanding dengan perubahan momentum.



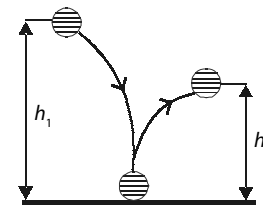
Kata Kunci

- impuls
- momentum linear

Contoh 4.1

Sebuah bola bermassa 50 g jatuh dari ketinggian 7,2 meter. Setelah menumbuk lantai, bola memantul kembali (berlawanan dengan arah semula) dengan ketinggian 3,2 m. Hitunglah:

- momentum bola sebelum dan sesudah menumbuk lantai;
- gaya yang diberikan lantai pada bola ketika bola menyentuh lantai selama 0,02 s.



Jawab:

Diketahui: $m = 50 \text{ g} = 5 \times 10^{-2} \text{ kg}$

$$h_1 = 7,2 \text{ m}$$

$$h_2 = 3,2 \text{ m}$$

$$\Delta t = 0,02 \text{ s}$$

Untuk gerak jatuh bebas, berlaku persamaan sebagai berikut.

$$v_1 = -\sqrt{2gh_1}$$

$$v_2 = \sqrt{2gh_2}$$

$$= -\sqrt{(2)(10)(7,2)} = -12 \text{ m/s} \quad = +\sqrt{(2)(10)(3,2)} = 8 \text{ m/s}$$

arah ke bawah (-)

arah ke atas(+)

$$\text{a. } p_1 = mv_1 = (5 \times 10^{-2} \text{ kg})(-12 \text{ m/s}) = -0,6 \text{ kgm/s (arahnya ke bawah)}$$

$$p_2 = mv_2 = (5 \times 10^{-2} \text{ kg})(8 \text{ m/s}) = 0,4 \text{ kgm/s (arahnya ke atas)}$$

Jadi, momentum bola sebelum tumbukan adalah $-0,6 \text{ kgm/s}$ dan setelah tumbukan adalah $0,4 \text{ kgm/s}$.

$$\text{b. Impuls yang diberikan bola: } I = p_2 - p_1 = 0,4 - (-0,6) = 1 \text{ kgm/s}$$

Gaya yang dikerjakan lantai pada bola selama 2×10^{-2} detik adalah

$$F = \frac{I}{\Delta t} = \frac{1 \text{ kgm/s}}{(2 \times 10^{-2}) \text{ s}} = 50 \text{ N}$$

Jadi, gaya yang diberikan lantai 50 N melawan arah gerak jatuh bola.

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Sebuah bola sepak bermassa 0,4 kg ditendang horizontal oleh penjaga gawang dengan kecepatan 100 m/s. Tentukan gaya yang diberikan oleh kaki penjaga gawang terhadap bola jika selang waktu kaki menyentuh bola:
 - $4 \times 10^{-2} \text{ s}$;
 - $2 \times 10^{-3} \text{ s}$.
- Seorang siswa menggenggam bola bermassa 0,5 kg dan melemparkannya secara horizontal dengan kecepatan awal 20 m/s. Bola tersebut membentur tiang selama $2 \times 10^{-2} \text{ s}$ sehingga berbalik arah dengan kecepatan 15 m/s. Tentukan:
 - impuls yang diberikan tiang pada bola;
 - gaya yang diberikan tiang pada bola; dan
 - percepatan bola (pemukul) selama bersentuhan.

Ingatlah



Jika berlaku Hukum Kekekalan Momentum Linear, momentum linear awal sama dengan momentum linear akhir.

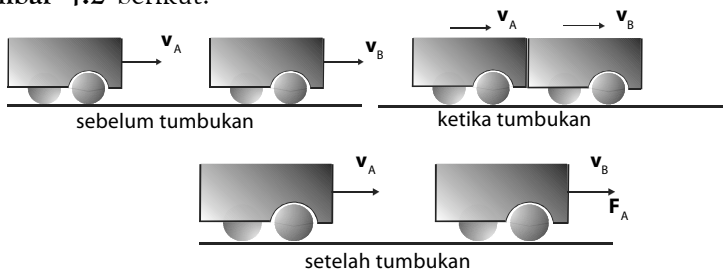


B. Tumbukan

Peristiwa tumbukan dapat Anda temui pada dua benda yang saling bertabrakan satu sama lain. Permainan yang memanfaatkan secara langsung peristiwa tumbukan adalah permainan biliard dan bowling. Tahukah Anda aturan permainan-permainan tersebut?

Pada uraian subbab sebelumnya, telah diketahui bahwa impuls sama dengan perubahan momentum. Berikut ini akan dijelaskan perubahan momentum yang terjadi pada setiap benda yang saling bertumbukan, serta kaitan antara setiap perubahan momentum tersebut.

Misalnya, ada dua buah benda yang saling bertumbukan, seperti pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2
Hukum Kekekalan Momentum Linear berlaku pada dua benda yang bertumbukan.

Kereta A dan kereta B sebelum bertumbukan masing-masing memiliki massa m_A dan m_B , dan kecepatan v_A dan v_B . Kedua kereta tersebut berada pada satu bidang datar dan memiliki arah gerak yang sama. Jika kecepatan kereta A lebih besar daripada kecepatan kereta B, kereta A pada saat tertentu akan menabrak kereta B. Ketika kereta A menabrak kereta B, sesuai dengan Hukum III Newton, kereta A akan memberikan gaya aksi sebesar F_A dan kereta B akan memberikan gaya reaksi sebesar F_B .

Bagaimana besar gaya reaksi tersebut pada kereta B? Jika Hukum Kekekalan Momentum Linear berlaku pada peristiwa tumbukan antara kereta A dan B, besar kedua gaya tersebut akan sama besar. Akan tetapi, arah kedua gaya berlawanan arah sehingga secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}_{\text{awal}} &= \mathbf{p}_{\text{akhir}} \\
 \mathbf{p}_{A \text{ awal}} + \mathbf{p}_{B \text{ awal}} &= \mathbf{p}_{A \text{ akhir}} + \mathbf{p}_{B \text{ akhir}} \\
 m_A v_A + m_B v_B &= m_A v'_A + m_B v'_B
 \end{aligned}
 \tag{4-11}$$

Keterangan:

- $m_A v_A + m_B v_B$ = jumlah momentum sebelum tumbukan
- $m_A v'_A + m_B v'_B$ = jumlah momentum sesudah tumbukan

Contoh lain dari peristiwa tumbukan yang dapat dilakukan pendekatan dengan Hukum Kekekalan Momentum Linear adalah pada permainan *bom-bom car*. Di beberapa kota besar, permainan ini disebut juga mobil senggol. Mobil tersebut digerakkan oleh energi listrik yang diperoleh dari jaringan listrik di atasnya. Kecepatan maksimum setiap mobil adalah sama karena energi listrik yang disuplai oleh jaringan listrik di atasnya juga sama. Akan tetapi, berat penumpangnya berbeda, kecepatan mobil juga berbeda. Ketika terjadi benturan antara dua mobil atau lebih, efek guncangan yang paling keras akan diterima oleh mobil dengan berat penumpang paling kecil.



Sumber: Dokumentasi Penerbit

Gambar 4.3
Hukum kekekalan momentum terjadi pada *bom-bom car* yang bertumbukan.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Seorang nelayan bermassa 40 kg berada di atas perahu 60 kg. Perahu bergerak dengan kelajuan 10 m/s. Tentukan kecepatan perahu jika nelayan melompat dengan kecepatan 15 m/s dengan arah:
 - ke depan, searah dengan arah gerak perahu;
 - ke belakang, berlawanan dengan arah gerak perahu; dan
 - ke samping, tegak lurus dengan arah gerak perahu.
- Dua buah kelereng A dan B masing-masing bermassa 0,8 kg dan 0,6 kg, bergerak searah dengan kecepatan 30 m/s dan 50 m/s. Posisi kelereng dibuat sedemikian sehingga kelereng B menumbuk kelereng A dari belakang. Setelah tumbukan, keduanya bergerak bersamaan. Tentukan kecepatan kedua kelereng tersebut.



C. Jenis Tumbukan

Ada tiga macam tumbukan yang dipelajari pada pokok bahasan tumbukan, yaitu tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian, dan tumbukan tidak lenting sama sekali. Subbab ini hanya membahas tumbukan antara dua benda yang lintasan keduanya berada pada satu garis lurus.

1. Tumbukan Lenting Sempurna

Dalam kehidupan nyata, tumbukan lenting sempurna tidak pernah terjadi karena setelah tumbukan ada sebagian energi yang berubah bentuk menjadi energi panas, energi bunyi, dan energi lainnya. Akan tetapi, dalam pembahasan ini, tumbukan lenting sempurna dianggap dapat terjadi. Anggapan demikian sering digunakan oleh para fisikawan untuk menyederhanakan suatu masalah, yang dijadikan sebagai suatu landasan teori yang mendasari peristiwa tumbukan lainnya.

Pada tumbukan lenting sempurna, berlaku Hukum Kekekalan Momentum Linear. Energi kinetik total yang dimiliki benda sebelum dan sesudah tumbukan adalah tetap. Energi potensial benda tidak diperhitungkan karena kedua benda bergerak dalam satu bidang datar dengan ketinggian yang sama.

Gambar 4.4
Tumbukan lenting sempurna.



Perhatikan **Gambar 4.4**. Dua buah benda pada bidang datar bergerak berlawanan. Kemudian, setelah terjadi tumbukan kedua benda tersebut bergerak berlawanan arah dari arah semula. Kecepatan setiap benda adalah v_1' dan v_2' . Sesuai dengan Hukum Kekekalan Momentum Linear, didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$m_1(v_1 - v_1') = m_2(v_2' - v_2) \quad (4-12)$$

Menurut Hukum Kekekalan Energi Kinetik, didapatkan persamaan berikut.

$$E_{k1} + E_{k2} = E_{k1}' + E_{k2}'$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (4-13)$$

Dari **Persamaan (4-13)** akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2$$

$$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2'^2 - v_2^2)$$

$$m_1(v_1 + v_1')(v_1 - v_1') = m_2(v_2' + v_2)(v_2' - v_2) \quad (4-14)$$

Jika ruas kanan **Persamaan (4-14)** dibagi dengan ruas kanan **Persamaan (4-12)**, dan ruas kiri **Persamaan (4-14)** dibagi dengan ruas kiri **Persamaan (4-12)**, akan dihasilkan

$$(v_1 + v_1') = (v_2 + v_2')$$

$$(v_1' - v_2') = -(v_1 - v_2)$$

atau

$$-\left(\frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2}\right) = 1 \quad (4-15)$$

Tugas Anda 4.2

Anggota polisi sering menggunakan rompi anti peluru dalam melaksanakan tugasnya. Dalam beberapa kejadian, rompi tersebut bisa tembus oleh peluru. Mengapa hal tersebut bisa terjadi?

Harga 1 pada **Persamaan (4-18)** menyatakan *koefisien restitusi* untuk tumbukan lenting sempurna. Secara umum, **Persamaan (4-18)** ditulis

$$-\left(\frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2}\right) = e \quad (4-19)$$

Dalam hal ini, e adalah koefisien restitusi. **Persamaan (4-19)** berlaku untuk semua jenis tumbukan.

2. Tumbukan Lenting Sebagian dan Tumbukan Tidak Lenting Sama Sekali

Hukum kekekalan momentum berlaku untuk semua jenis tumbukan. Akan tetapi, hukum kekekalan energi kinetik hanya berlaku pada tumbukan lenting sempurna.

Pada tumbukan lenting sebagian, sebagian energi kinetik setelah tumbukan akan berubah bentuk menjadi energi lain sehingga jumlah energi kinetik setelah tumbukan akan lebih kecil daripada sebelum tumbukan. Harga koefisien restitusi (e) pada **Persamaan (4-16)** berada pada interval $0 < e < 1$.

Pada tumbukan tidak lenting sama sekali, sebagian besar energi kinetiknya berubah bentuk sehingga jumlah energi kinetik sebelum tumbukan lebih besar daripada setelah tumbukan, dan $e = 0$.

Pada tumbukan tidak lenting sama sekali, kedua benda bersatu setelah tumbukan dan bergerak bersama-sama dengan kecepatan sama. Anda dapat memperhatikan akibat lain dari tumbukan jenis ini.

Contoh 4.2

Dua benda yang bermassa 2 kg dan 4 kg bergerak berlawanan arah dengan kecepatan 6 m/s dan 4 m/s. Tentukan kecepatan kedua benda setelah tumbukan jika tumbukan lenting sempurna dan tumbukan lenting sebagian, $e = 0,4$.

Jawab:

Diketahui: $m_A = 2$ kg, $m_B = 4$ kg, $v_A = 6$ m/s, $v_B = -4$ m/s.

Perhatikan. Oleh karena kedua benda bergerak berlawanan arah maka kedua kecepatan harus berlawanan tanda. Pada contoh soal ini, v_A dianggap positif dan v_B dianggap negatif.

Dari Hukum Kekekalan Momentum didapat

$$\begin{aligned} m_A v_A + m_B v_B &= m_A v_A' + m_B v_B' \\ (2 \text{ kg})(6 \text{ m/s}) + (4 \text{ kg})(-4 \text{ m/s}) &= (2 \text{ kg}) v_A' + (4 \text{ kg}) v_B' \\ 12 \text{ m/s} - 16 \text{ m/s} &= 2 v_A' + 4 v_B' \\ -2 \text{ m/s} &= (v_A' + 2 v_B') \text{ m/s} \end{aligned} \quad (*)$$

Pada tumbukan lenting sempurna, $e = 1$ maka

$$\begin{aligned} -\left(\frac{v_A' - v_B'}{v_A - v_B}\right) &= 1 \Rightarrow -\frac{v_A' - v_B'}{6 - (-4)} = 1 \\ -v_A' + v_B' &= 10 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (**)$$

Dari eliminasi persamaan (*) dan (**), diperoleh

$$-2 = v_A' + 2 v_B' \Rightarrow v_A' = -2 - 2 v_B'$$

maka

$$\begin{aligned} -v_A' + v_B' &= 10 \text{ m/s} \\ v_B' &= 10 \text{ m/s} + v_A' \\ v_B' &= 10 \text{ m/s} - 2 \text{ m/s} - 2 v_B' \\ v_B' &= \frac{8}{3} \text{ m/s} \end{aligned}$$



- Pada tumbukan lenting sempurna, koefisien restitusinya adalah $e = 1$.
- Pada tumbukan lenting sebagian, koefisien restitusinya $0 < e < 1$, sedangkan pada tumbukan tidak lenting sama sekali, koefisien restitusinya adalah $e = 0$.

Dari persamaan (**), diperoleh

$$-v_A' + v_B' = 10 \text{ m/s}$$

$$-v_A' + \frac{8}{3} \text{ m/s} = 10 \text{ m/s}$$

$$v_A' = -\frac{22}{3} \text{ m/s} = -7\frac{1}{3} \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan kedua benda setelah tumbukan lenting sempurna adalah

$$v_A' = -7\frac{1}{3} \text{ m/s} \text{ dan } v_B' = \frac{8}{3} \text{ m/s.}$$

Kedua kecepatan mengalami perubahan tanda. Artinya, kedua benda tersebut mengalami perubahan arah gerak. Jika Anda mendapatkan nilai kecepatan tidak berubah arah setelah tumbukan, berarti perhitungan Anda belum benar.

Pada tumbukan lenting sebagian, $e = 0,4$ sehingga

$$-\frac{(v_A' - v_B')}{6 \text{ m/s} - (-4 \text{ m/s})} = 0,4$$

$$-v_A' + v_B' = 4 \text{ m/s} \quad (***)$$

Dari eliminasi persamaan (*) dan (***), didapat $v_B' = \frac{1}{3} \text{ m/s}$; $v_A' = \frac{10}{3} \text{ m/s}$.

Jadi, untuk tumbukan lenting sebagian, kecepatan benda A setelah tumbukan adalah

$$\frac{10}{3} \text{ m/s} \text{ dan kecepatan benda B adalah } \frac{1}{3} \text{ m/s.}$$

Tugas Anda 4.3

Jika Anda sedang menggunakan sepatu, cobalah tendang sebuah bola sepak. Kemudian, bukalah sepatu dan tendang kembali bola tersebut. Jika diasumsikan gaya yang Anda berikan selama menyentuh sama besar, **selidikilah** tendangan mana yang membuat bola terlempar jauh? Apa hubungan kejadian ini dengan konsep impuls?

Contoh 4.3

Dua buah benda terletak pada satu bidang dan segaris. Benda pertama bermassa $m_1 = 8 \text{ kg}$ dan benda kedua $m_2 = 12 \text{ kg}$. Kedua benda bergerak berlawanan arah dengan kecepatan $v_1 = 20 \text{ m/s}$ dan $v_2 = -10 \text{ m/s}$. Tentukan kecepatan setiap benda setelah terjadi tumbukan. Berapa energi kinetik yang berubah menjadi energi panas, jika terjadi:

- tumbukan lenting sempurna;
- tumbukan lenting sebagian, $e = 0,25$; dan
- tumbukan tidak lenting sama sekali.

Jawab:

Diketahui:

$$m_1 = 8 \text{ kg}; \quad m_2 = 12 \text{ kg}$$

$$v_1 = 20 \text{ m/s}; \quad v_2 = -10 \text{ m/s}$$

- Untuk tumbukan lenting sempurna:

Dari Hukum Kekekalan Momentum, didapatkan

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$(8 \text{ kg})(20 \text{ m/s}) + (12 \text{ kg})(-10 \text{ m/s}) = 8 \text{ kg } v_1' + 12 \text{ kg } v_2'$$

$$10 \text{ kgm/s} = 2 \text{ kg } v_1' + 3 \text{ kg } v_2' \quad (*)$$

Untuk tumbukan lenting sempurna, $e = 1$, **Persamaan (4-16)** menjadi

$$-\left(\frac{v_1' - v_2'}{20 \text{ m/s} - (-10 \text{ m/s})}\right) = 1$$

$$30 = -v_1' + v_2' \quad (**)$$

Mensubstitusikan **Persamaan (*)** ke **Persamaan (**)** menghasilkan

$$v_1' = -16 \text{ m/s.}$$

$$v_2' = 14 \text{ m/s.}$$

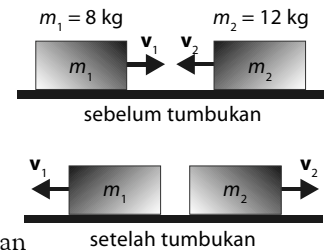
Perubahan energi kinetik

Energi kinetik sebelum tumbukan:

$$E_{k1} + E_{k2} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} (8 \text{ kg})(20 \text{ m/s})^2 + \frac{1}{2} (12 \text{ kg})(10 \text{ m/s})^2 = 2.200 \text{ J.}$$

Energi kinetik setelah tumbukan:

$$E_{k1}' + E_{k2}' = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 = \frac{1}{2} (8 \text{ kg})(-16 \text{ m/s})^2 + \frac{1}{2} (12 \text{ kg})(14 \text{ m/s})^2 = 2.200 \text{ J.}$$

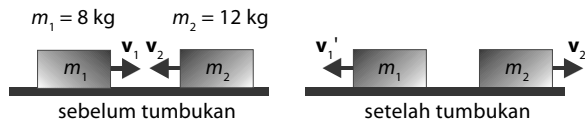


Tantangan untuk Anda

Apakah Anda pernah menonton balapan? Mengapa di beberapa bagian sirkuit diberi pagar dari ban (*tyre wall*)?

Jadi, pada tumbukan lenting sempurna, energi kinetik sebelum dan sesudah tumbukan adalah tetap.

- b. Untuk tumbukan lenting sebagian, $e = 0,25$:



Dari Hukum Kekekalan Momentum, didapat hasil seperti **Persamaan (*)**.

Pada tumbukan lenting sebagian, $e = 0,25$, **Persamaan (4-9)** menjadi $7,5 \text{ m/s} = -v_1' + v_2'$ (***)

Substitusikan **Persamaan (*)** ke dalam **Persamaan (***)** sehingga diperoleh hasil

$$v_1' = -2,5 \text{ m/s}$$

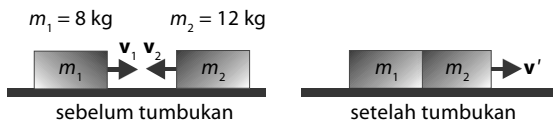
$$v_2' = 5 \text{ m/s}$$

Energi kinetik setelah tumbukan

$$\begin{aligned} E_{k1}' + E_{k2}' &= \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \\ &= \frac{1}{2} (8 \text{ kg}) (-2,5 \text{ m/s})^2 + \frac{1}{2} (12 \text{ kg}) (5 \text{ m/s})^2 \\ &= 25 + 150 = 175 \text{ joule} \end{aligned}$$

Jadi, energi kinetik yang berubah menjadi panas adalah *energi kinetik sebelum tumbukan* – *energi kinetik setelah tumbukan*
 $= 2.200 \text{ joule} - 175 \text{ joule} = 2.025 \text{ joule}$.

- c. Untuk tumbukan tidak lenting sama sekali, $e = 0$:



Oleh karena $e = 0$ maka $v_1' = v_2' = v'$ sehingga **Persamaan (*)** akan menjadi

$$10 = 5 v_1' = 5 v_2' = 5 v'$$

$$v' = 2 \text{ m/s}$$

Energi kinetik setelah tumbukan

$$E_{k1}' + E_{k2}' = \left(\frac{1}{2} m_1 + \frac{1}{2} m_2\right) v'^2 = (10 \text{ kg}) (2 \text{ m/s})^2 = 40 \text{ joule}$$

Jadi, banyaknya energi kinetik yang berubah menjadi panas adalah $(2.200 - 40) \text{ joule} = 2.160 \text{ joule}$.

Kata Kunci

- tumbukan lenting sebagian
- tumbukan lenting sempurna
- tumbukan tidak lenting sama sekali



Tantangan untuk Anda

Berikut ini ukuran diameter, massa jenis, dan periode rotasi dari planet-planet.

Planet	d(km)	ρ ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	T
Bumi	12.675	5,52	23 jam 56'
Mars	6.790	3,95	24 jam 37'
Yupiter	142.980	3,33	9 jam 35'
Saturnus	120.540	0,69	10 jam 40'

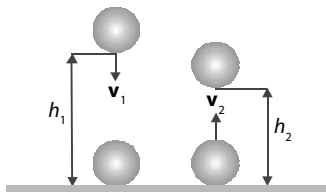
Dari data tersebut, berapakah momentum yang dimiliki setiap planet? Apakah ada hubungan antara momentum dan periode rotasi planet tersebut?

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah bola yang memiliki momentum p , menumbuk dinding dan memantul. Tumbukan tersebut bersifat lenting sempurna dan arahnya tegak lurus. Tentukanlah besarnya perubahan momentum bola.
2. Sebuah benda A bermassa 4 kg tergantung pada seutas tali yang panjangnya 3 m. Benda B yang bermassa 4 kg menumbuk benda A dengan kecepatan mendatar sebesar 6 m/s. Jika tumbukan yang terjadi elastis sempurna, hitunglah sudut simpangan maksimum.
3. Dua buah benda masing-masing bermassa 12 kg dan 18 kg bergerak berlawanan arah. Kecepatan setiap benda 30 m/s. Pada suatu saat, kedua benda tersebut saling bertumbukan di atas lantai yang licin. Tentukan kecepatan setiap benda setelah tumbukan dan energi kinetik yang berubah menjadi energi panas, jika terjadi:
 - a. tumbukan lenting sempurna;
 - b. tumbukan lenting sebagian, $e = 0,4$; dan
 - c. tumbukan tidak lenting sama sekali.
4. Sebuah balok bermassa 0,5 kg terletak di atas lantai. Koefisien gesekan balok dengan lantai adalah 0,2. Peluru yang bermassa 10 gram ditembakkan ke arah balok hingga bersarang di dalamnya dan balok bergeser sejauh satu meter. Berapakah kecepatan peluru saat akan mengenai balok ($g = 10 \text{ m/s}^2$)? (Gunakan: $f_k s = \frac{1}{2} m v^2$)

5. Sebuah benda A bermassa 2 kg yang bergerak dengan kelajuan 6 m/s bertumbukan dengan benda B bermassa 4 kg yang diam. Setelah tumbukan, benda A bergerak mundur dengan kelajuan 1 m/s. Tentukan:
 - a. kecepatan benda B setelah tumbukan;
 - b. energi yang berubah akibat tumbukan; dan
 - c. koefisien restitusi untuk tumbukan tersebut.
6. Sebuah truk berisi muatan dengan massa 30 ton yang bergerak dengan kecepatan 10 m/s menabrak sebuah mobil bermassa 20 ton yang sedang diam. Setelah tumbukan, keduanya bergerak dengan kecepatan v . Hitung nilai v .
7. Peluru bermassa 30 g ditembakkan dan bersarang pada sebuah balok kayu. Kemudian, sistem (balok dan peluru) bergerak dengan kecepatan 1 m/s, berapakah kecepatan peluru ketika mengenai balok? (massa balok 6 kg)
8. Tono yang bermassa 35 kg melompat dengan kecepatan 3 m/s dari sebuah perahu kecil yang diam. Massa perahu adalah 30 kg. Berapakah kecepatan perahu setelah Tono melompat?
9. Dua mobil mainan masing-masing bergerak dengan kecepatan 36 km/jam dalam arah berlawanan dan bertumbukan secara tidak elastis sama sekali. Massa kedua mobil masing-masing 0,5 kg dan 0,25 kg. Hitung berapa kecepatan kedua mobil tersebut setelah tumbukan. Berapakah energi kinetik yang hilang?
10. Gerbong pengangkut barang bermassa 12.000 kg bergerak pada relnya dengan kecepatan 4 m/s. Tiba-tiba barang seberat 3 ton ditambahkan dalam gerbong tersebut tegak lurus arah gerak gerbong. Hitung kecepatan gerbong sekarang.



Gambar 4.5
Tumbukan lenting sebagian pada benda jatuh bebas.

D. Tumbukan Lenting Sebagian pada Benda Jatuh Bebas

Tumbukan lenting sebagian berlaku juga pada sebuah benda yang bergerak jatuh bebas. Dalam kasus ini, yang bertindak sebagai benda kedua adalah lantai. Perhatikan **Gambar 4.5**. Dengan demikian, kecepatan benda kedua sebelum dan sesudah tumbukan adalah nol.

Sebuah bola jatuh bebas dari ketinggian h terhadap lantai. Kecepatan bola sesaat sebelum dan sesudah menumbuk lantai memenuhi persamaan

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4-17)$$

Kecepatan bola sebelum dan sesudah menumbuk lantai memenuhi persamaan

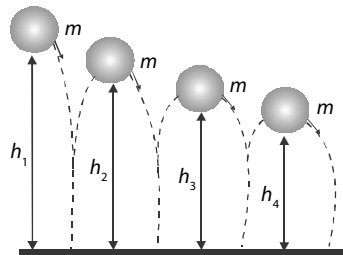
$$v_1 = -\sqrt{2gh_1} \quad \text{dan} \quad v_1' = +\sqrt{2gh_1'} \quad (4-18)$$

Tanda negatif pada v_1 menandakan arah bola ke bawah dan tanda positif pada v_1' menandakan arah bola ke atas. Koefisien restitusi antara bola dan lantai dapat diperoleh dari persamaan

$$e = \frac{(v_1' - v_2')}{(v_1 - v_2)}$$

$$e = -\left(\frac{\sqrt{2gh_1'} - 0}{-\sqrt{2gh_1} - 0}\right)$$

$$e = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (4-19)$$



Gambar 4.6
Tinggi pantulan bola yang mengalami tumbukan lenting sebagian.

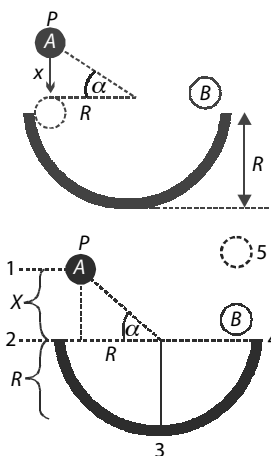
Persamaan (4-19) dapat digunakan pada benda jatuh ke lantai dan kemudian memantul beberapa kali. Sebagai contoh, perhatikan kasus pada **Gambar 4.6**. Pada kasus tersebut, persamaan koefisien restitusi menjadi

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = \sqrt{\frac{h_3}{h_2}} = \sqrt{\frac{h_4}{h_3}} \quad (4-20)$$

Contoh 4.4

Sebuah bola A dijatuhkan (jatuh bebas) dari suatu titik P. Lokasi titik P ditunjukkan pada gambar. Bola bergerak bebas sepanjang talang licin (jari-jari talang R). Di ujung talang terdapat bola B yang massanya 2 kali massa A. Keduanya bertumbukan secara elastis sempurna.

- Hitung kecepatan bola A sesaat sebelum menumbuk bola B.
- Hitung kecepatan bola B sesaat setelah bertumbukan dengan bola A.
- Berapa tinggi maksimum yang dicapai oleh benda B? (Soal Menuju Olimpiade Sains Indonesia)



Jawab:

Perhatikan gambar. Tinggi bola A dari permukaan talang sebelum jatuh adalah $\frac{x}{R} = \tan \alpha \rightarrow x = R \tan \alpha$

massa bola A, $m_A = m$

massa bola B, $m_B = 2m$

- Kecepatan bola A sesaat sebelum menumbuk bola B sama dengan kecepatan pada posisi 2,

$$\text{maka } \frac{1}{2} m v_A^2 = mgx = mgR \tan \alpha$$

$$v_A = \sqrt{2gR \tan \alpha}$$

- Kecepatan bola B sesaat setelah bertumbukan dengan bola A memenuhi Hukum Kekekalan Momentum:

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B'$$

$$m v_A + 0 = m v_A' + 2 m v_B'$$

$$v_A = v_A' + v_B'$$

$$\sqrt{2gR \tan \alpha} = v_A' + v_B' \dots\dots (*)$$

Hukum Kekekalan Energi Mekanik:

$$\frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 = \frac{1}{2} m_A v_A'^2 + \frac{1}{2} m_B v_B'^2$$

$$\frac{1}{2} m v_A^2 = \frac{1}{2} m v_A'^2 + m v_B'^2$$

$$mgR \tan \alpha = \frac{1}{2} m v_A'^2 + m v_B'^2$$

$$gR \tan \alpha = \frac{1}{2} v_A'^2 + v_B'^2 \dots\dots (**)$$

Dari persamaan (*) dan (**), akan diperoleh

$$gR \tan \alpha = \frac{1}{2} (\sqrt{2gR \tan \alpha} - 2 v_B')^2 + v_B'^2$$

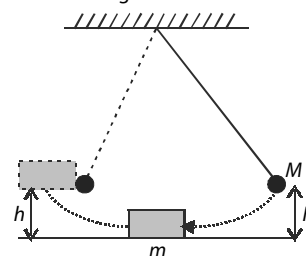
$$gR \tan \alpha = \frac{1}{2} (2gR \tan \alpha - 4 v_B' \sqrt{2gR \tan \alpha} + 4 v_B'^2) + v_B'^2$$

$$\cancel{gR \tan \alpha} = \cancel{gR \tan \alpha} - 2 v_B' \sqrt{2gR \tan \alpha} + 3 v_B'^2$$



Pembahasan Soal

Perhatikan gambar berikut.



Sebuah ayunan yang bandulnya bermassa M dinaikkan pada ketinggian H dan dilepaskan. Pada bagian terendah dari lintasannya, bandul membentur suatu balok bermassa m yang mula-mula diam di atas permukaan dataran yang licin. Jika setelah tumbukan kedua benda saling menempel, ketinggian h yang dapat dicapai keduanya adalah

- $\left[\frac{m}{m+M} \right]^2 H$
- $\left[\frac{m}{m+M} \right] H$
- $\left[\frac{M}{m+M} \right]^2 H$
- $\left[\frac{M}{m+M} \right] H^2$
- $\left[\frac{M}{m+M} \right]^2 H^2$

Soal UMPN Tahun 2001

Pembahasan:

$$Mv = (M+m)v'$$

$$M \sqrt{2gH} = (M+m) \sqrt{2gh}$$

$$M^2 2gH = (M+m)^2 2gh$$

$$h = \frac{M^2 H}{(m+M)^2} = \left[\frac{M}{m+M} \right]^2 H$$

Jawaban: c

Kata Kunci

- koefisien restitusi

$$v_B' = \frac{2}{3} \sqrt{2gR \tan \alpha}$$

Kecepatan bola A sesudah tumbukan adalah

$$gR \tan \alpha = \frac{1}{2} v_A'^2 + \left(\frac{2}{3} \sqrt{2gR \tan \alpha} \right)^2 = \frac{1}{2} v_A'^2 + \frac{8}{9} gR \tan \alpha$$

$$v_A' = \sqrt{\frac{2}{9} gR \tan \alpha} \text{ m/s.}$$

Jadi, kecepatan bola A setelah tumbukan adalah $v_A' = \sqrt{\frac{2}{9} gR \tan \alpha} \text{ m/s.}$

- c. Tinggi maksimum yang dicapai bola B setelah tumbukan diperoleh melalui persamaan energi mekanik di posisi 4 dan 5.

$$E_{PB4} + E_{KB4} = E_{PB5} + E_{KB5}$$

$$0 + \frac{1}{2} m_B v_B'^2 = m_B g y + 0$$

$$\left(\frac{1}{2} \right) (2m) \left(\frac{2}{3} \sqrt{2gR \tan \alpha} \right)^2 = 2mgy$$

$$m \left(\frac{4}{9} 2gR \tan \alpha \right) = 2mgy$$

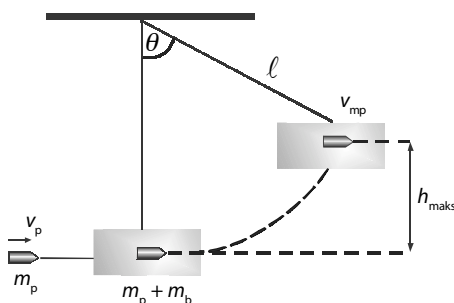
$$y = R \left(\frac{4}{9} \tan \alpha \right) \text{ atau } y = R \left(1 + \frac{4}{9} \tan \alpha \right) \text{ dari dasar talang.}$$

Jadi, tinggi maksimum bola B setelah tumbukan adalah $y = R \left(1 + \frac{4}{9} \tan \alpha \right)$ dari dasar talang.

Tes Kompetensi Subbab D

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah bola dilepaskan dari ketinggian 10 meter di atas lantai. Bola menumbuk lantai dan dipantulkan kembali. Jika koefisien restitusi tumbukannya 0,6, berapakah tinggi bola yang dipantulkan.
2. Sebuah benda dilepaskan dari suatu tempat sejauh 125 m di atas lantai. Setelah mengenai lantai, bola memantul kembali dan benda naik lagi setinggi 45 m. Hitung koefisien restitusi tumbukan benda tersebut.
3. Sebuah bola dilepaskan dari gedung yang tingginya 50 m. Setelah mengenai lantai, bola tersebut dipantulkan kembali. Pada pantulan pertama, bola mencapai ketinggian h meter di atas lantai dan pada pantulan kedua mencapai ketinggian 5 meter. Hitunglah h .



Gambar 4.7

Ayunan balistik mencapai tinggi maksimum $h_{\text{maks}} = \ell(1 - \cos \theta)$.

E. Ayunan Balistik

Tumbukan tidak lenting berlaku juga pada peristiwa ayunan balistik, yaitu benda yang terdiri atas sepotong balok kayu yang diikatkan pada seutas tali. Kemudian, digantungkan sedemikian rupa agar balok dapat bergerak dengan bebas. Ayunan seperti ini dapat digunakan sebagai salah satu cara untuk mengukur kelajuan peluru. Peluru yang akan diukur kelajuannya ditembakkan dari sebuah senjata ke arah balok tersebut. Perhatikan **Gambar 4.7**. Misalkan balok yang tergantung memiliki massa m_B , sedangkan peluru tersebut memiliki massa m_p . Peluru yang ditembakkan tersebut bersarang dalam balok dan bergerak bersama-sama dengan kecepatan v' sehingga balok berayun dan mencapai ketinggian h . Menurut Hukum Kekekalan Momentum Linear, didapat persamaan

$$m_p v_p = (m_p + m_B) v'$$

$$v_p = \frac{(m_p + m_B) v'}{m_p} \quad (4-21)$$

Menurut Hukum Kekekalan Energi Mekanik, energi kinetik yang dimiliki peluru dan balok pada posisi P sama dengan energi potensial yang dimiliki peluru dan balok ketika mencapai ketinggian maksimum. Secara matematis, keadaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{1}{2}(m_p + m_B)v'^2 = (m_p + m_B)gh$$

$$v' = \sqrt{2gh} \quad (4-22)$$

Dari Persamaan (4-21) dan Persamaan (4-22), diperoleh

$$v_p = \frac{(m_p + m_B)}{m_p}(\sqrt{2gh}) \quad (4-23)$$

Keterangan:

m_p = massa peluru (kg)

m_B = massa balok (kg)

v_p = kecepatan peluru (m/s)

v' = kecepatan setelah peluru dan balok bertumbukan (m/s)

Contoh 4.5

Sepotong balok kayu bermassa 4,95 kg tergantung pada seutas tali. Sebuah peluru yang massanya 50 g ditembakkan dari sebuah senapan ke arah balok sehingga peluru tersebut bersarang di dalamnya. Balok tersebut berayun dan naik setinggi 80 cm dari kedudukan semula. Jika percepatan gravitasi di tempat tersebut 10 m/s^2 , tentukan kecepatan peluru sebelum mengenai balok.

Jawab:

Diketahui:

$$m_p = 50 \text{ g} = 0,05 \text{ kg};$$

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

$$m_B = 4,95 \text{ kg};$$

$$h = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$v_p = \frac{(m_p + m_B)}{m_p} \sqrt{2gh}$$

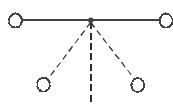
$$= \frac{(0,05)(4,95)}{0,05 \text{ kg}} \sqrt{(2)(10 \text{ m/s}^2)(0,8)} \text{ m} = 400 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan peluru sebelum mengenai balok adalah 400 m/s.

Tes Kompetensi Subbab E

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah balok baja bermassa 2 kg tergantung pada seutas tali panjang. Balok tersebut ditembak oleh sebutir peluru bermassa 20 g dengan kecepatan mendatar 500 m/s. Jika tumbukannya elastis sebagian ($e = 0,6160$), hitung ketinggian maksimum yang dapat dicapai balok tersebut.
2. Dua bola kecil yang masing-masing bermassa 1 kg dan 2 kg digantungkan pada seutas tali 0,2 m. Setiap bola mula-mula diberi ayunan sebesar 90° terhadap garis vertikal seperti pada gambar. Kemudian, kedua bola



3. dilepas pada saat yang bersamaan dan keduanya bertumbukan secara elastis sempurna. Hitunglah kenaikan kedua bola tersebut setelah tumbukan.
3. Sebuah benda tergantung pada seutas tali yang panjangnya 20 cm. Benda tersebut ditumbuk oleh benda lain yang massanya 4 kali massa benda semula. Jika tumbukannya elastis sebagian, dengan nilai $e = 0,75$, berapakah kecepatan benda yang menumbuk agar benda yang tergantung tersebut mencapai titik tertinggi dari lintasannya?



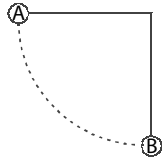
Informasi untuk Anda

Gaya dorong pada roket dihasilkan akibat semburan gas panas dengan kecepatan tinggi. Gas panas tersebut dihasilkan dari proses pembakaran hidrogen cair dan oksigen cair. Untuk mengatasi pengaruh gravitasi Bumi, roket memiliki percepatan 3 kali percepatan gravitasi Bumi. Oleh karena itu, gaya dorong yang harus diberikan oleh roket harus lebih dari $3 \times 10^7 \text{ N}$.

Information for You

Rocket propulsion is produced by hot gas expelled from the rear of the rocket at high velocity. The hot gas made from burning of liquid hydrogen and liquid oxygen. To abandon the earth's gravitational force, rocket have to get acceleration three times faster than earth's gravitational acceleration. So, rocket propulsion should be more $3 \times 10^7 \text{ N}$.

4. Bola A yang massanya 3 kg berada pada posisi seperti terlihat pada gambar.



Bola tersebut akan menumbuk bola B yang bermassa 2 kg. Jika koefisien restitusi tumbukan 0,5, berapa meterkah bola B akan naik? (panjang tali 0,2 m).

F. Gaya Dorong Roket

Ambillah sebuah balon karet, lalu tiuplah balon tersebut hingga mengembang, namun jangan sampai meletus. Jepitlah ujung lubang tempat udara masuk dengan tangan, kemudian lepaskan. Anda akan melihat balon karet tersebut terdorong oleh udara yang keluar dari dalam balon kaset. Prinsip seperti ini merupakan prinsip kerja roket.



Gambar 4.8
Gaya dorong pada balon.

Momentum balon sebelum dilepaskan adalah sama dengan nol, karena $v = 0$. Ketika balon dilepaskan, momentum balon menjadi $p = m_{\text{balon}} v_{\text{balon}}$. Perubahan momentumnya per satuan waktu adalah sama dengan gaya dorong yang dilakukan embusan udara terhadap balon, yang arahnya berlawanan dengan arah kelajuan balon. Oleh karena prinsip ini sama dengan prinsip gaya dorong roket, perubahan momentum pada roket dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (4-24)$$

Keterangan:

F = gaya dorong roket (N)

v = kecepatan roket (m/s)

Gaya dorong yang dilakukan gas pada balon dapat dianalogikan sebagai gaya dorong bahan bakar pada roket.

Tes Kompetensi Subbab F

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Diketahui gas panas yang keluar dari roket memiliki kelajuan 200 m/s. Tentukan besar gaya dorong sebuah roket yang mesinnya dapat menyemburkan gas panas hasil dari pembakaran dengan kelajuan pancaran gas 50 kg/s.
2. Massa total sebuah roket termasuk bahan bakarnya adalah 1.200 kg. Semburan gaya panas yang keluar dari roket memiliki kelajuan 250 m/s. Jika diharapkan roket dapat melaju dengan percepatan 2,5 m/s², tentukanlah kelajuan perubahan massa gas di dalam roket tersebut.

Rangkuman

- Momentum yang dimiliki suatu benda adalah hasil perkalian antara massa dan kecepatan pada saat tertentu. Momentum merupakan besaran vektor yang arahnya sama dengan arah kecepatannya.

$$\mathbf{p} = m \mathbf{v}$$

Impuls adalah hasil kali gaya dan selang waktu selama gaya bekerja.

$$\mathbf{I} = \mathbf{F} \Delta t$$

Impuls yang bekerja pada suatu benda besarnya sama dengan perubahan momentum yang dialami benda.

$$\mathbf{I} = m \Delta \mathbf{v} = m \mathbf{v}_2 - m \mathbf{v}_1$$

- Hukum Kekekalan Momentum menyatakan bahwa jumlah momentum sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama, yaitu

$$m_A \mathbf{v}_A + m_B \mathbf{v}_B = m_A \mathbf{v}'_A + m_B \mathbf{v}'_B$$

- Hukum II Newton menyatakan bahwa gaya yang diberikan pada suatu benda, besarnya sama dengan perubahan momentum benda setiap satu satuan waktu.

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = \frac{m \mathbf{v}_2 - m \mathbf{v}_1}{\Delta t}$$

- Koefisien restitusi adalah ukuran kelentingan (elastisitas) sebuah tumbukan.

$$e = - \left(\frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} \right)$$

- Hukum Kekekalan Momentum berlaku pada semua jenis tumbukan. Pada tumbukan lenting sempurna, berlaku

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$v_2' - v_1' = -(v_2 - v_1)$$

atau koefisien restitusi $e = 1$.

Pada tumbukan tidak lenting sama sekali, kedua benda yang bertumbukan akan bersatu dan bergerak bersama setelah tumbukan. Pada jenis tumbukan ini, Hukum Kekekalan Energi Kinetik tidak berlaku, energi sebagian hilang menjadi energi kalor, energi bunyi, dan menyebabkan perubahan wujud pada benda.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$$

Pada tumbukan lenting sebagian, berlaku persamaan

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

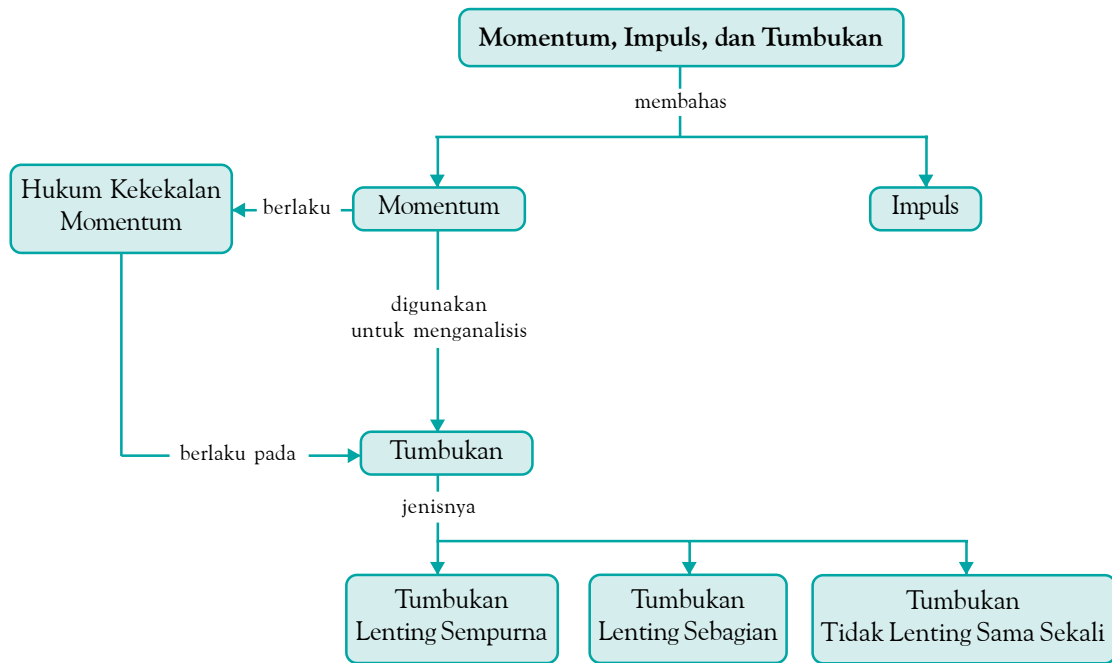
$$e = - \left(\frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} \right), 0 < e < 1$$

- Benda yang bergerak jatuh bebas merupakan jenis tumbukan lenting sebagian. Koefisien restitusinya adalah

$$e = \sqrt{\frac{h'}{h}} \text{ atau } e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = \sqrt{\frac{h_3}{h_2}} = \sqrt{\frac{h_4}{h_3}}$$

- Kecepatan peluru dapat diukur dengan ayunan balistik dengan memanfaatkan prinsip tumbukan tidak lenting sama sekali.

$$v_p = \frac{(m_p + m_B)}{m_p} (\sqrt{2gh})$$



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda dapat memahami konsep momentum, impuls, dan tumbukan. Anda juga tentu dapat menjelaskan jenis-jenis tumbukan yang mungkin terjadi dan hukum apa saja yang berlaku di dalamnya. Dari keseluruhan materi yang telah Anda pelajari, bagian manakah yang menurut Anda sulit? Coba Anda diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Dengan mempelajari bab ini, Anda dapat mengetahui bahwa untuk mengukur kecepatan peluru tidak harus memasang alat ukur pada peluru. Anda cukup menghitung jejak yang ditinggalkannya, seperti pada bandul balistik. Nah, coba sebutkan manfaat lain mempelajari bab ini.

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

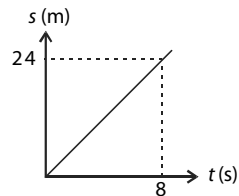
1. Dimensi impuls adalah

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

2. Dua benda memiliki massa yang sama, sedangkan momentum benda pertama dua kali momentum benda kedua. Perbandingan energi kinetik benda pertama dan benda kedua tersebut adalah

- 1 : 1
- 1 : 2
- 1 : 4
- 2 : 1
- 4 : 1

3. Gambar berikut menunjukkan grafik ($s - t$) dari gerak sebuah benda yang massanya 5 kg. Momentum benda tersebut adalah

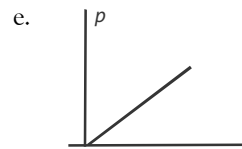
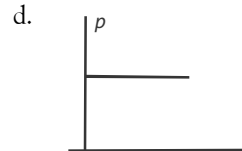
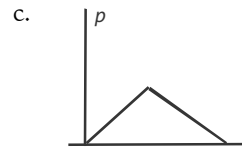
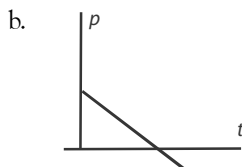
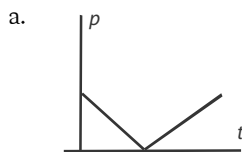


- 21 kgm/s
- 20 kgm/s
- 18 kgm/s
- 15 kgm/s
- 10 kgm/s

4. Sebuah bola billiar disodok menggunakan tongkat dengan gaya 50 newton dalam waktu 10 milisekon. Jika massa bola 0,2 kg, kecepatan bola setelah disodok adalah

- 0,25 m/s
- 2,5 m/s
- 25 m/s
- 250 m/s
- 2.500 m/s

5. Grafik momentum (p) terhadap waktu (t) dari sebuah benda bermassa m yang ditembakkan vertikal ke atas adalah



6. Sebuah bola dari keadaan diam dipukul dengan gaya 600 newton hingga melesat dengan kecepatan 60 m/s. Jika massa bola 0,5 kg, pemukul akan menyentuh bola selama

- 4×10^{-2} s
- 5×10^{-2} s
- 6×10^{-2} s
- 7×10^{-2} s
- 8×10^{-2} s

7. Gaya yang diperlukan untuk menghentikan benda bermassa 35 kg yang bergerak dengan kecepatan 120 m/s hingga berhenti setelah 5 sekon adalah

- 780 newton
- 800 newton
- 820 newton
- 840 newton
- 860 newton

8. Benda bermassa m memiliki momentum p dan energi kinetik E . Jika energi kinetik berubah menjadi $4E$, momentumnya menjadi

- p
- $3p$
- $5p$
- $2p$
- $4p$

9. Bola A dan B memiliki momentum yang sama dan massa $A > B$ maka

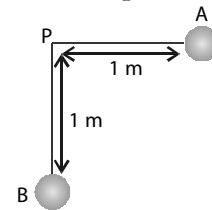
- kecepatan $A >$ kecepatan B
- energi kinetik $A =$ energi kinetik B
- energi kinetik $A >$ energi kinetik B
- energi kinetik $A <$ energi kinetik B
- kecepatan $A =$ kecepatan B

10. Seorang anak yang massanya 30 kg sedang berdiri di atas perahu bermassa 20 kg yang sedang meluncur ke arah utara dengan kecepatan 10 m/s. Tiba-tiba anak tersebut meloncat ke arah selatan dengan kecepatan 6 m/s. Kecepatan perahu tersebut menjadi
- 19 m/s
 - 20 m/s
 - 27 m/s
 - 30 m/s
 - 34 m/s
11. Berdasarkan soal nomor 10, jika arah loncatan anak ke utara, kecepatan perahu akan menjadi
- 16 m/s
 - 12 m/s
 - 7 m/s
 - 4 m/s
 - 1 m/s
12. Pada tumbukan lenting sempurna, berlaku hukum kekekalan
- momentum
 - energi kinetik
 - energi potensial
 - kesetimbangan
 - energi kinetik dan momentum
13. Sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian h . Benda mengenai lantai dipantulkan kembali secara tegak lurus. Jika koefisien restitusi antara bola dengan lantai e , tinggi pantulan bola adalah
- $e\sqrt{2gh}$
 - $\sqrt{2gh}$
 - ghe
 - e^2h
 - $\frac{2gh}{e}$
14. Sebuah bola jatuh bebas dari ketinggian 20 m di atas lantai. Jika tumbukan dengan lantai elastis sebagian dengan koefisien restitusinya 0,4, kecepatan pantul bola setelah menumbuk lantai adalah
- 4 m/s
 - 6 m/s
 - 8 m/s
 - 9 m/s
 - 10 m/s
15. Sebuah bola jatuh bebas dari ketinggian 100 m di atas lantai. Jika koefisien restitusi antara bola dengan lantai 0,5, tinggi pantulan bola adalah
- 80 m
 - 75 m
 - 50 m
 - 25 m
 - 20 m
16. Jika diketahui benda-benda berikut dihentikan oleh dinding dalam selang waktu yang sama, di antara benda-benda tersebut yang mengalami gaya terbesar pada waktu bertumbukan dengan dinding batu adalah
- benda yang bermassa 150 kg bergerak dengan laju 7 m/s
 - benda yang bermassa 100 kg bergerak dengan laju 12 m/s
 - benda yang bermassa 50 kg bergerak dengan laju 15 m/s
 - benda yang bermassa 40 kg bergerak dengan laju 25 m/s
 - benda yang bermassa 25 kg bergerak dengan laju 50 m/s
17. Sebuah benda bermassa 1 kg bergerak ke kanan dengan kecepatan 6 m/s dan menumbuk benda lain yang bermassa 2 kg dan bergerak ke kiri dengan besar kecepatan 3 m/s. Jika kedua benda saling melekat setelah tumbukan, kecepatan kedua benda tersebut adalah
- 4 m/s ke kanan
 - 4 m/s ke kiri
 - 2 m/s ke kanan
 - 2 m/s ke kiri
 - nol
18. Peluru bermassa 10 g bergerak dengan kecepatan sebesar 1.000 m/s dan menembus sebuah balok bermassa 100 kg yang diam di atas bidang datar licin. Kecepatan peluru setelah menembus balok adalah 100 m/s. Kecepatan balok karena tertembus peluru adalah
- 0,09 m/s
 - 0,9 m/s
 - 9 m/s
 - 90 m/s
 - 900 m/s
19. Sebuah bom dilemparkan vertikal ke atas. Pada titik tertinggi, bom tersebut meledak menjadi dua bagian dengan perbandingan massa 2 : 1. Sesaat setelah meledak, kecepatan bagian bom yang besar 10 m/s. Kecepatan bagian bom yang kecil adalah
- 25 m/s
 - 20 m/s
 - 15 m/s
 - 10 m/s
 - 5 m/s
20. Dua buah benda A dan B masing-masing massanya 1 kg bergerak saling berlawanan dengan kecepatan 4 m/s dan 5 m/s. Jika tumbukan yang terjadi lenting sempurna, kecepatan benda A dan B adalah
- 1 m/s dan 8 m/s
 - 2 m/s dan 3 m/s
 - 3 m/s dan 13 m/s
 - 4 m/s dan 1 m/s
 - 8 m/s dan 1 m/s

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Sebuah benda bermassa 4 kg dijatuhkan tanpa kecepatan awal dari ketinggian 62,5 m. Jika percepatan gravitasi Bumi $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, tentukanlah momentum benda saat menumbuk tanah.
2. Sebuah mobil bermassa 1.000 kg bergerak dengan kelajuan 20 m/s. Hitunglah gaya rem yang diperlukan agar mobil berhenti setelah 10 sekon.
3. Dua buah benda A dan B memiliki massa 300 g dan 200 g. Jika kecepatan benda A 50 cm/s dan kecepatan benda B = 100 cm/s, dan gerak kedua benda tersebut berlawanan arah, tentukan kecepatan setiap benda setelah tumbukan, jika:
 - a. kedua benda melekat menjadi satu; dan
 - b. tumbukan yang terjadi lenting sempurna.
4. Sebuah bola bermassa 1 kg yang bergerak dengan kecepatan 10 m/s menabrak bola lain yang sedang bergerak searah dengan kecepatan 5 m/s dan bermassa 2 kg. Setelah tumbukan, kedua bola bergerak bersama. Berapakah kelajuan kedua bola setelah tumbukan?
5. Sebuah bom bermassa 5 kg ditembakkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal = 40 m/s. Setelah 2 s, bom meledak menjadi dua bagian, masing-masing 2 kg dan 3 kg. Sesaat setelah meledak, bagian yang kecil berkecepatan 60 m/s bergerak vertikal ke atas. Berapa kecepatan bagian yang besar?
6. Sebuah benda bermassa 3 kg bergerak dengan kecepatan 16 m/s mengenai lantai dengan sudut datang 30° dan dipantulkan kembali dengan sudut pantul 60° .
 - a. Tentukan koefisien restitusi tumbukan benda tersebut (e).
 - b. Tentukan besarnya perubahan momentum benda tersebut.

7. Sebuah balok bermassa 2 kg terletak di atas lantai licin. Peluru bermassa 15 gram ditembakkan horizontal mengenai balok dan peluru diam di dalam balok tersebut. Balok bergeser sejauh 2 meter dalam waktu 1 detik. Berapakah kecepatan peluru ketika mengenai balok? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
8. Panji bermassa 60 kg menaiki perahu bermassa 40 kg yang sedang meluncur ke timur dengan kecepatan sebesar 12 m/s. Tiba-tiba Panji meloncat dengan kecepatan 8 m/s terhadap perahu. Berapakah kecepatan perahu sesaat setelah Panji meloncat, jika
 - a. arah loncatan ke timur; dan
 - b. arah loncatan ke utara?
9. Perhatikan gambar berikut.



Bola A dan B masing-masing bermassa 2 kg diikat dengan seutas tali yang panjangnya 1 m pada paku P. Tali bola A diarahkan mendatar, kemudian dilepaskan menumbuk bola B. Berapa tinggi maksimum yang dicapai bola B, jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan tumbukan kedua bola bersifat:

- a. lenting sempurna;
 - b. lenting sebagian dengan $e = 0,4$; dan
 - c. tidak lenting sama sekali?
10. Segumpal plastisin bermassa 0,2 kg ditembakkan dengan kecepatan 20 m/s mengenai balok bermassa 1,8 kg yang diam di atas lantai kasar. Jika plastisin menempel pada balok dan gaya gesek antara balok dan lantai 10 N, berapakah panjang pergeseran balok?

Proyek Semester 1



Pada semester ini Anda telah belajar konsep tentang Gerak dan Gaya. Untuk lebih meningkatkan pemahaman tentang konsep tersebut, Anda ditugaskan melakukan kegiatan semester secara berkelompok (4–5 orang). Langkah kegiatan yang harus Anda lakukan tercantum dalam tugas semester. Sebagai tugas akhir kegiatan, Anda bersama kelompok Anda ditugaskan membuat laporan kegiatan semester yang akan dipresentasikan di akhir semester. Format laporan terdiri atas: Judul, Tujuan, Alat dan Bahan, Prosedur Penelitian, Data, Analisis, serta Kesimpulan dan Saran terhadap penelitian yang telah dilakukan.

Kereta Dinamika

Tujuan Kegiatan

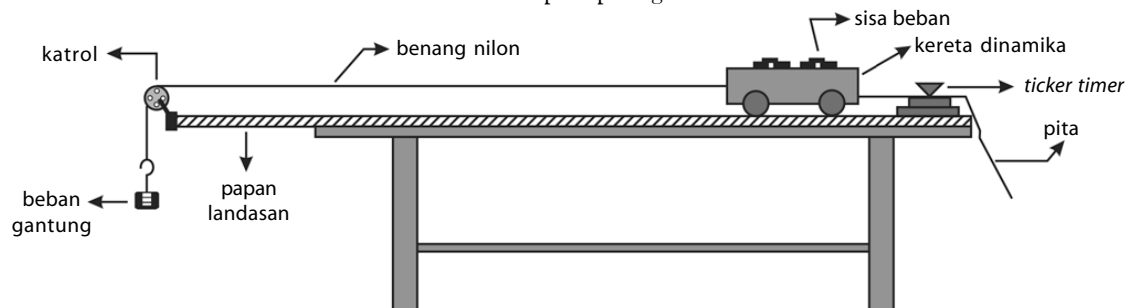
Mempelajari Hukum Newton

Alat dan Bahan

1. Kereta dinamika
2. Papan landasan ($240\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 2\text{ cm}$) dan katrol meja berdiameter 4 cm
3. *Ticker timer* (celah pita 1,5 cm) dan *power supply*-nya
4. Beban gantung 250 g (variasi 5, 10, 20, dan 50 g)
5. Kertas karbon dan benang nilon

Prosedur Percobaan

1. Ukur massa kereta dinamika dan beban gantung. Jumlah massa keduanya dianggap sebagai massa sistem.
2. Susun alat-alat seperti pada gambar berikut.



Gunakan sebagian beban gantung untuk menggerakkan kereta dinamika dan sisanya simpan di atas kereta dinamika.

3. Gerakkan kereta dinamika bersamaan dengan dihidupkannya *ticker timer*. Hentikan kereta dinamika pada saat beban gantung tepat akan tiba di lantai dan segera matikan *ticker timer*. Teliti jejak ketikan *ticker timer* pada pita kertas. Jika sudah bagus hasilnya, lanjutkan langkah berikutnya.
4. Lakukan langkah kedua dan ketiga di atas 10 kali dengan beban gantung (penggerak) yang berbeda namun dengan massa sistem tetap.

Pengolahan Data

1. Dengan kertas pita yang diperoleh dari percobaan kereta dinamika, buatlah grafik $v = f(t)$ untuk setiap percobaan. Tentukan percepatan sistem dari setiap percobaan berdasarkan grafik yang Anda buat tersebut.
2. Buatlah grafik hubungan antara resultan gaya dengan percepatan sistem. Apakah hasilnya sesuai dengan Hukum II Newton? Berikan penjelasan.
3. Tentukan besar gaya gesek yang terjadi dalam percobaan tersebut.

Tes Kompetensi Fisika

Semester 1

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

1. Percepatan sebuah partikel pada saat t adalah $6t\mathbf{i} - 4\mathbf{j}$. Mula-mula partikel bergerak dengan kecepatan $2\mathbf{i}$. Vektor kecepatan partikel pada saat t adalah

- $(2 + 3t)\mathbf{i} - 4t\mathbf{j}$
- $(2 - 3t^2)\mathbf{i} + 4t\mathbf{j}$
- $(2 + 3t^2)\mathbf{i} - 4t\mathbf{j}$
- $(3 - 2t^2)\mathbf{i} + 4t\mathbf{j}$
- $(3 + 2t^2)\mathbf{i} - 4t\mathbf{j}$

2. Sebuah partikel bergerak sesuai dengan persamaan posisi $r = (t^2 - 4t)\mathbf{i} + (2t^2 - 2t)\mathbf{j}$, r dalam meter dan t dalam detik. Besar kecepatan benda pada saat $t = 1$ detik adalah

- 2 m/s
- 8 m/s
- $2\sqrt{2}$ m/s
- $2\sqrt{5}$ m/s
- $3\sqrt{3}$ m/s

3. Dua buah benda A dan B masing-masing bermassa 4 kg dan 3 kg dihubungkan dengan tali (massa tali diabaikan) melalui sebuah katrol bermassa 2 kg dan berjari-jari 20 cm. Jika benda berputar dengan tali, percepatan setiap benda adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

- 0,75 m/s^2
- 1,25 m/s^2
- 1,50 m/s^2
- 1,75 m/s^2
- 2,00 m/s^2

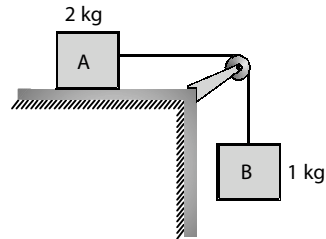
4. Sebuah partikel mula-mula diam, kemudian dipercepat dalam lintasan melingkar dengan jari-jari 2 m menurut persamaan percepatan $a = 6t^2 - 4t$. Persamaan kecepatan sentripetalnya adalah

- $4t^3 - 4t^2$
- $12t^2 - 8t$
- $9t^6 - 12t^5 + 4t^4$
- $4t^6 - 6t^5 + 4t^4$
- $36t^4 - 24t^3 - 16t^2$

5. Sebuah mobil bermassa 1.000 kg meluncur dengan kecepatan 72 km/jam, kemudian direm dengan gaya F . Jika koefisien gesek kinetik antara roda dan jalan 0,2 kemudian berhenti setelah 4 detik, besar gaya pengereman F adalah

- 5.000 N
- 4.500 N
- 3.500 N
- 3.000 N
- 4.000 N

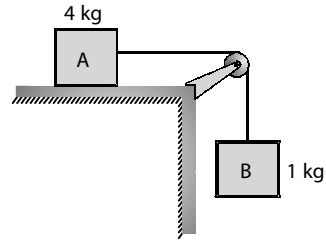
6. Perhatikan gambar berikut, jika beban B dilepaskan, balok A tepat akan bergerak.



Jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 , koefisien gesek statis antara balok dan meja adalah

- 0,5
- 0,4
- 0,3
- 0,2
- 0,1

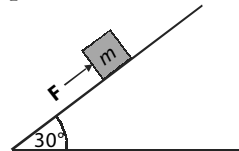
7. Perhatikan susunan benda-benda pada gambar berikut.



Koefisien gesek kinetik antara balok A dan meja adalah 0,125. Jika beban B dilepaskan, percepatan benda A adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

- 2,25 m/s^2
- 2,00 m/s^2
- 1,00 m/s^2
- 1,75 m/s^2
- 1,50 m/s^2

8. Perhatikan gambar berikut ini.



Koefisien gesek kinetik antara benda dengan bidang miring adalah 0,5 dan percepatan gravitasi Bumi $= g$. Besarnya gaya yang dibutuhkan untuk mendorong benda dengan massa m supaya dapat bergerak ke atas dengan kecepatan tetap adalah

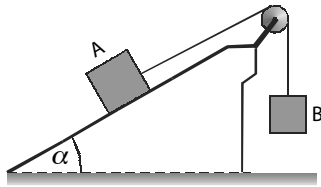
- 0,5 mg
- 0,8 mg
- 1,3 mg
- 1,5 mg
- 1,1 mg

9. Sebuah benda dengan massa m diberi gaya F hingga bergerak. Jika gaya gesek antara benda dan lantai sama dengan f_k , percepatan gerak benda adalah
- $a = \frac{F - f_k}{m}$
 - $a = \frac{F + f_k}{m}$
 - $a = \frac{m}{F - f_k}$
 - $a = \frac{F}{m + f_k}$
 - $a = \frac{F}{m - f_k}$
10. Seorang nelayan menyeberangi sungai menggunakan perahu dayung. Perahu dayung tersebut selalu diarahkan tegak lurus terhadap arah arus air dengan kecepatan 3 m/s, sedangkan kecepatan aliran air = 3 m/s. Kecepatan total perahu dan arahnya dalam melintasi sungai adalah
- 3 m/s dan 45°
 - $3\sqrt{2}$ m/s dan 45°
 - $3\sqrt{2}$ m/s dan 90°
 - $3\sqrt{3}$ m/s dan 45°
 - 6 m/s dan 90°
11. Peluru ditembakkan dengan sudut elevasi 45° dan kecepatan awal = 100 m/s. Jika percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, kedudukan peluru saat $t = 3$ sekon adalah
- $x = 300 \text{ m}; y = 210 \text{ m}$
 - $x = 50\sqrt{2} \text{ m}; y = 50\sqrt{2}$
 - $x = 50\sqrt{2} \text{ m}; y = 210 \text{ m}$
 - $x = 210 \text{ m}; y = 167,13 \text{ m}$
 - $x = 300 \text{ m}; y = 90 \text{ m}$
12. Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan awal 100 m/s dan sudut elevasinya 53° . Perbandingan tinggi maksimum dan titik jauh maksimum yang dicapai oleh peluru tersebut adalah
- 1 : 4
 - 1 : 3
 - 1 : 2
 - 2 : 1
 - 3 : 1
13. Pada permainan sepak bola, bola yang ditendang melayang di udara selama 4 detik dengan sudut elevasi 30° . Jika gesekan dengan udara diabaikan dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, bola mencapai jarak sejauh
- 120 m
 - 138 m
 - 200 m
 - 300 m
 - 480 m
14. Sebuah sepeda motor membelok pada tikungan berbentuk busur lingkaran dengan jari-jari 10 m. Jika koefisien gesekan antara roda dan jalan 0,25 dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, kecepatan motor terbesar agar sepeda motor tidak slip adalah
- 5 m/s
 - 2,5 m/s
 - 2,0 m/s
 - 1,5 m/s
 - 1,2 m/s
15. Sebuah mobil menempuh sebuah belokan jalan yang datar dengan kelajuan = 50 km/jam. Jika koefisien gesek antara ban mobil dan jalan adalah 0,05, jari-jari minimum belokan mobil adalah
- 9,9 m
 - 0,38 km
 - 39 m
 - 5,1 km
 - 7,5 km
16. Sebuah balok bermassa 3 kg terletak pada bidang mendatar yang mempunyai koefisien gesek kinetik $\frac{1}{4}\sqrt{3}$. Balok diberi gaya 20 N dan bersudut 30° terhadap bidang mendatar. Percepatan balok tersebut adalah
- $\frac{3}{2}\sqrt{3} \text{ m/s}^2$
 - $\frac{5}{3}\sqrt{3} \text{ m/s}^2$
 - $\frac{2}{3}\sqrt{3} \text{ m/s}^2$
 - $\frac{3}{5}\sqrt{3} \text{ m/s}^2$
 - $\frac{5}{6}\sqrt{3} \text{ m/s}^2$
17. Jika massa Bulan $\frac{1}{81}$ kali massa Bumi dan jari-jari Bulan $\frac{1}{6}$ kali jari-jari Bumi, perbandingan gaya tarik Bumi terhadap Bulan adalah
- 6 : 81
 - 36 : 81
 - 1 : 1
 - 81 : 36
 - 81 : 6
18. Jika perbandingan jari-jari Bumi di khatulistiwa dan di kutub 9 : 8, perbandingan percepatan gravitasi Bumi di khatulistiwa dan di kutub adalah
- 3 : 2
 - $2\sqrt{2} : 3$
 - 9 : 8
 - 81 : 64
 - 64 : 81
19. Perbandingan jari-jari sebuah planet (R_p) dan jari-jari Bumi (R_b) adalah 2 : 1, sedangkan massa planet (M_p) dan massa Bumi (M_b) berbanding 10 : 1. Orang yang beratnya di Bumi 100 N, di planet tersebut menjadi
- 100 N
 - 200 N
 - 250 N
 - 400 N
 - 500 N

20. Massa jari-jari planet X sama dengan a kali massa Bumi dan berjari-jari b kali jari-jari Bumi. Berat benda di planet X dibandingkan dengan beratnya di Bumi menjadi
- ab kali
 - ab^2 kali
 - $\frac{a}{b}$ kali
 - $\frac{a}{b^2}$ kali
 - $\frac{1}{ab}$ kali
21. Sebuah satelit berada pada ketinggian h di atas permukaan Bumi. Jika diketahui jari-jari Bumi adalah R , periode satelit tersebut mengelilingi Bumi adalah (orbit satelit dianggap berupa lingkaran)
- $2\pi\sqrt{\frac{(R+h)}{g}}$
 - $2\pi\sqrt{R+h}$
 - $\pi\sqrt{R+h}$
 - $4\pi^2\frac{(R+h)}{g}$
 - $4\pi^2\frac{(R+h)}{2g}$
22. Sebuah benda yang berada di Bulan bergerak dengan percepatan a karena mendapat gaya F . Jika benda tersebut dibawa ke Bumi yang gaya gravitasinya enam kali massa Bulan dan benda tersebut diberi gaya F juga, percepatan adalah
- $6a$
 - $a\sqrt{6}$
 - a
 - $\frac{a}{\sqrt{6}}$
 - $\frac{a}{6}$
23. Menurut Hukum III Kepler, kuadrat periode suatu planet mengelilingi Matahari sebanding dengan
- massa planet
 - jarak planet ke Matahari
 - pangkat tiga massa planet
 - pangkat tiga jarak planet ke Matahari
 - kuadrat jarak Matahari ke planet
24. Jika periode satelit yang mengorbit Bumi dengan jari-jari = $12,8 \times 10^6$ m sebesar 3,9 jam, periode satelit yang jari-jari orbitnya = $19,2 \times 10^6$ m adalah
- 7,2 jam
 - 6,4 jam
 - 5,9 jam
 - 4,8 jam
 - 2,1 jam
25. Seorang nelayan menarik perahunya dengan sudut 45° terhadap arah horizontal dan perahu berpindah sejauh 10 m. Jika nelayan tersebut menarik perahu dengan gaya 180 N, besar usaha yang dilakukan nelayan tersebut adalah
- 900 J
 - $900\sqrt{2}$ J
 - $900\sqrt{3}$ J
 - 850 J
 - 875 J
26. Sebuah bola bermassa 400 g dilempar vertikal ke atas hingga mencapai ketinggian 8 m. Perubahan energi potensial ketika bola berada pada ketinggian 4 m adalah
- 12 J
 - 16 J
 - 12 J
 - 16 J
 - 32 J
27. Sebuah benda jatuh bebas dari tempat yang tingginya 80 m. Jika energi potensialnya mula-mula sebesar 4.000 J dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, kecepatan benda tepat sebelum sampai di tanah adalah
- 10 m/s
 - 20 m/s
 - 25 m/s
 - 30 m/s
 - 40 m/s
28. Sebuah mesin kendaraan bermotor memiliki daya sebesar 100 hp. Waktu yang diperlukan mesin tersebut untuk menghasilkan gaya 3.730 N dan menggerakkan kendaraan sejauh 60 m adalah
- 2 sekon
 - 3 sekon
 - 4 sekon
 - 5 sekon
 - 6 sekon
29. Sebuah granat bermassa 0,5 kg tiba-tiba meledak dan pecah menjadi dua bagian dengan perbandingan massa pecahan 2 : 3 dan bergerak berlawanan arah. Jika pecahan yang kecil memiliki kecepatan 240 m/s, perbandingan energi kinetik pecahan pertama dan pecahan kedua sesaat setelah granat tersebut meledak adalah
- 1 : 1
 - 3 : 2
 - 2 : 3
 - 9 : 4
 - 2 : 1
30. Gas panas yang dihasilkan oleh sebuah roket memiliki kelajuan 400 m/s dan terjadi pembakaran gas sebanyak 80 kg dalam waktu satu sekon. Besarnya gaya dorong roket tersebut adalah
- 2.000 N
 - 12.000 N
 - 16.000 N
 - 24.000 N
 - 32.000 N

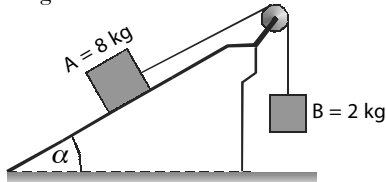
B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Pada susunan benda-benda seperti pada gambar, massa benda A dan B sama, yaitu 5 kg.



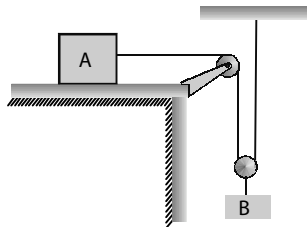
Jika koefisien gesekan kinetik antara benda A dan bidang miring adalah 0,2 dan $\tan \alpha = \frac{3}{4}$, berapakah percepatan setiap benda jika kedua benda tersebut dilepaskan?

2. Perhatikan gambar berikut ini.



Jika kedua benda dilepaskan, tali memiliki tegangan 24 N. Jika $\sin \alpha = \frac{3}{5}$, berapakah koefisien gesek antara benda A dan bidang?

3. Dua benda A dan B tersusun seperti gambar berikut.



Massa A = 4 kg dan massa B = 8 kg ($g = 10 \text{ m/s}^2$). Tentukan besar percepatan benda B dan tegangan talinya, jika koefisien gesekan statis antara bidang dengan benda A adalah 0,2.

4. Sebuah mobil bergerak dengan percepatan tetap, yaitu sebesar 2 m/s^2 . Setelah menempuh jarak 150 m, ternyata kecepatannya menjadi 25 m/s.
- Berapakah kecepatan awal mobil tersebut?
 - Berapa lama waktu tempuh mobil tersebut?

- Massa planet Jupiter adalah $1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$ dan massa Matahari = $2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$. Jika jarak antara Matahari dan planet Jupiter adalah $7,8 \times 10^{11} \text{ m}$ dan G sebesar $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$, tentukan:
 - gaya gravitasi Matahari pada planet Jupiter; dan
 - laju linear orbit planet Jupiter, jika lintasannya dianggap sebagai lingkaran.
- Berat seseorang di Bumi adalah 800 N. Jika jari-jari Bumi $R = 6,4 \times 10^6 \text{ m}$, massa Bumi $M = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$ dan konstanta gravitasi $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$, berapakah berat orang tersebut pada ketinggian R dari permukaan Bumi?
- Diketahui massa Bumi = $6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$, jari-jari Bumi = $6,4 \times 10^6 \text{ m}$, dan $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$. Jika sebuah satelit yang massanya 200 kg, beredar pada ketinggian 300 km dari permukaan Bumi dengan lintasan berbentuk lingkaran, berapakah laju linear satelit tersebut?
- Sebuah benda dilemparkan ke atas dengan energi kinetik = 200 joule. Diketahui massa benda = 1 kg dan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Setelah mencapai titik puncak, benda tersebut kembali ke tanah. Tentukanlah energi kinetik benda pada saat mencapai ketinggian 10 meter dari tanah.
- Massa total sebuah roket = 0,75 ton. Dalam waktu 1 sekon, roket tersebut mampu menyemburkan gas panas sebanyak 40 kg. Diketahui gas panas tersebut disemburkan keluar dengan kecepatan = 250 m/s. Anggap perubahan perbandingan jumlah bahan bakar dan massa roket sangat kecil dan percepatan gravitasi Bumi = 10 m/s^2 . Tentukanlah jarak jelajah roket dalam waktu 0,5 menit.
- Sebuah balok bermassa 2 kg berada di atas lantai dan dalam keadaan diam. Koefisien gesek balok dan bidang horizontal = 0,2. Kemudian, sebutir peluru bermassa 50 g ditembakkan horizontal mengenai balok tersebut dan diam di dalam balok. Jika balok bergeser sejauh 2 meter, berapakah kecepatan peluru ketika menumbuk balok?

Bab 5



Sumber: *Contemporary College Physics*, 1993

Peloncat indah menekuk tubuhnya ketika mulai berputar dan merentangkan tubuhnya ketika hendak mendekati air.

Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep dan prinsip mekanika klasik sistem kontinu dalam menyelesaikan masalah.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

memformulasikan hubungan antara konsep torsi, momentum sudut, dan momen inersia berdasarkan Hukum II Newton, serta penerapannya dalam masalah benda tegar.

Pernahkah Anda melihat gerakan tubuh seorang atlet peloncat indah? Mengapa atlet tersebut selalu menekuk tubuhnya ketika mulai berputar? Ketika kedua lengan dan kakinya ditekuk, ia mengalami gerak rotasi lebih cepat dibandingkan pada saat direntangkan. Hal ini diperoleh akibat pengurangan momen inersia yang dimiliki tubuhnya. Kemudian, ia kembali merentangkan tubuhnya ketika hendak mendekati air agar memperoleh momen inersia yang lebih besar sehingga kecepatan sudutnya menjadi lebih kecil, lalu masuk ke dalam air dengan halus tanpa terdengar bunyi percikan air.

Dalam bab ini, Anda akan mempelajari prinsip-prinsip fisika yang menjadi acuan dari peristiwa tersebut. Dalam kehidupan sehari-hari, Anda akan banyak menemukan aplikasi penerapan konsep dinamika rotasi dan kesetimbangan benda tegar.

- A. Kinematika Gerak Rotasi**
- B. Dinamika Gerak Rotasi**
- C. Kesetimbangan Benda Tegar**

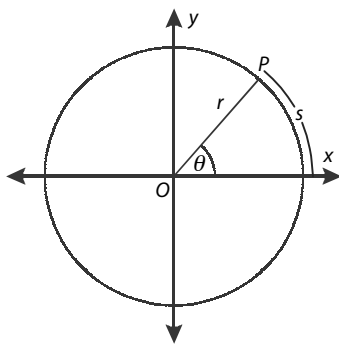
Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

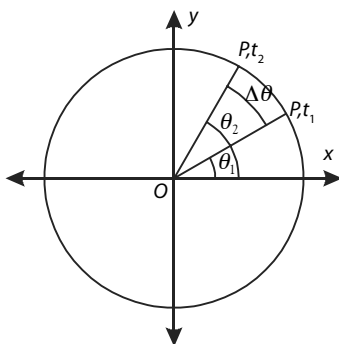
1. Apa yang dimaksud dengan momen gaya, momen kopel, dan momen inersia?
2. Apa hubungan antara Hukum Kekekalan Momentum Sudut dan Hukum II Kepler?
3. Sebutkan jenis-jenis kesetimbangan. Jelaskan dengan bahasa Anda sendiri.
4. Apa pengertian dari titik berat benda?



Gambar 5.1
Baling-baling kipas berotasi pada porosnya.



Gambar 5.2
Sebuah benda tegar berbentuk lingkaran berotasi pada sumbu koordinat O.



Gambar 5.3
Perpindahan sudut sebesar $\Delta\theta$ dari sebuah benda tegar yang berotasi pada saat t_1 dan t_2 .

A. Kinematika Gerak Rotasi

Jika Anda memperhatikan sebuah piringan hitam yang sedang berputar atau baling-baling kipas angin yang sedang berputar, Anda akan melihat bahwa piringan hitam dan baling-baling kipas angin tersebut melakukan gerak rotasi pada sebuah sumbu stasioner (tetap) dalam kerangka acuan inersia tertentu. Contoh lain dari benda tegar yang sedang berotasi adalah ban sepeda yang sedang berputar dan komidi putar.

1. Posisi Sudut dalam Gerak Rotasi

Perhatikan **Gambar 5.2** yang mendeskripsikan sebuah benda tegar berbentuk lingkaran yang berotasi pada sumbu tetap O dan tegak lurus terhadap bidang xy . Titik P terletak pada benda sehingga garis OP berotasi bersama benda tersebut. Sudut θ yang dibentuk oleh garis OP dan sumbu- x mendeskripsikan posisi benda saat benda berotasi.

Sudut θ dibentuk oleh sebuah busur s pada lingkaran berjari-jari r . Nilai sudut θ (dalam radian) dinyatakan dengan persamaan

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (5-1)$$

Koordinat θ menentukan posisi rotasi dari benda tegar pada suatu waktu, $\theta = \theta(t)$. Jika pada saat t posisi sudut benda θ maka pada saat $t + \Delta t$, posisi sudutnya $\theta + \Delta\theta$.

2. Kecepatan Sudut Rata-Rata dalam Gerak Rotasi

Sama halnya dengan gerak linear, dalam gerak rotasi, kecepatan sudut rata-rata didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan sudut $\Delta\theta$ terhadap perubahan waktu (Δt). Perhatikan **Gambar 5.3**. Garis OP pada benda tegar berbentuk lingkaran yang berotasi membentuk sudut θ_1 terhadap sumbu- x pada waktu t_1 . Kemudian, pada saat t_2 , sudut yang dibentuknya berubah menjadi θ_2 . Dengan demikian, kecepatan sudut rata-ratanya adalah

$$\omega_{\text{rata-rata}} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (5-2)$$

Oleh karena θ memiliki satuan derajat, radian, atau putaran, kecepatan sudut rata-rata dapat dinyatakan dengan satuan derajat/sekon, radian/sekon, atau putaran/sekon.

3. Kecepatan Sudut Sesaat dalam Gerak Rotasi

Bagaimanakah cara mengukur kecepatan sudut sesaat dari sebuah benda tegar yang bergerak rotasi? Sama halnya dengan gerak linear, dalam gerak rotasi, kecepatan sudut sesaat (ω) ditentukan dalam selang waktu (Δt) yang sangat singkat ($\Delta t \rightarrow 0$) sehingga perubahan kecepatannya sangat kecil. Oleh karena itu, kecepatan sudut sesaat pada gerak rotasi dinyatakan dengan persamaan

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

atau

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (5-3)$$

Dengan demikian, kecepatan sudut sesaat merupakan turunan pertama dari persamaan posisi sudut sebagai fungsi waktu. Perhatikan grafik θ terhadap t pada Gambar 5.4.

Jika $\Delta t = t_2 - t_1$ sangat kecil atau mendekati nol, titik Q akan sangat dekat dengan P, atau bahkan berimpit sehingga kemiringan (gradien) grafik θ terhadap t di titik P merupakan kecepatan sudut sesaat. Oleh karena itu, kecepatan sudut sesaat dapat pula dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \tan \beta \quad (5-4)$$

4. Percepatan Sudut dalam Gerak Rotasi

Sebuah partikel yang bergerak rotasi akan memiliki percepatan sudut jika partikel tersebut mengalami perubahan kecepatan sudut. Dengan demikian, percepatan sudut adalah perubahan kecepatan sudut setiap satuan waktu sehingga satuannya adalah rad/s^2 .

a. Percepatan Sudut Rata-Rata

Percepatan sudut rata-rata dinyatakan dengan lambang $\bar{\alpha}$. Jika sebuah partikel bergerak melingkar dengan kecepatan sudut ω_1 pada saat t_1 , kemudian berubah menjadi ω_2 pada saat t_2 , percepatan sudut rata-rata ($\bar{\alpha}$) partikel tersebut dalam selang waktu Δt dinyatakan dengan persamaan berikut.

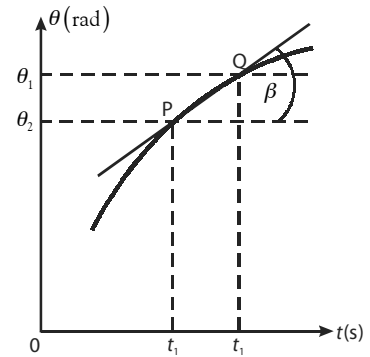
$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

atau

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad (5-5)$$

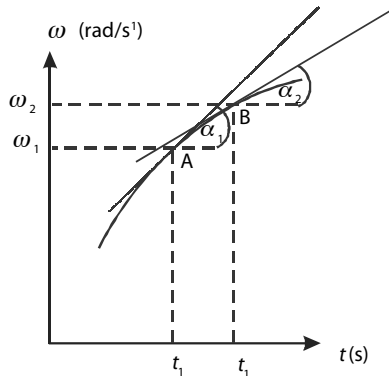
b. Percepatan Sudut Sesaat

Anda telah mengetahui bahwa kecepatan sudut sesaat (ω) ditentukan dalam selang waktu yang sangat singkat ($\Delta t \rightarrow 0$) sehingga perubahan kecepatannya sangat kecil. Sama halnya dengan kecepatan sudut sesaat (ω), percepatan sudut sesaat (α) juga merupakan percepatan sudut rata-rata yang terjadi dalam selang waktu (Δt) yang sangat singkat, atau $\Delta t \rightarrow 0$. Dengan demikian, percepatan sudut sesaat dinyatakan dengan persamaan berikut.



Gambar 5.4

Kecepatan sudut sesaat (ω) dapat ditentukan dari gradien grafik θ terhadap t pada sebuah titik.



Gambar 5.5
Percepatan sudut sesaat berdasarkan gradien garis singgung $\omega = \omega(t)$ di titik t .

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\alpha}$$

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (5-6)$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan (5-3)** ke dalam **Persamaan (5-6)**, diperoleh persamaan percepatan sudut sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (5-7)$$

Dengan demikian, Anda telah mengetahui bahwa percepatan sudut sesaat merupakan turunan pertama dari kecepatan sudut sesaat atau turunan kedua dari persamaan posisi sudut sebagai fungsi waktu. Selain itu, percepatan sudut sesaat dapat pula ditentukan berdasarkan gradien garis sehingga grafik ω terhadap t di suatu titik. Perhatikan grafik $\omega = \omega(t)$ pada **Gambar 5.5**. Percepatan sudut sesaat di titik A adalah $\tan \alpha_1$, sedangkan percepatan sudut sesaat di titik B adalah $\tan \alpha_2$.

5. Gerak Rotasi dengan Kecepatan Sudut Konstan

Jika sebuah benda tegar bergerak rotasi dengan kecepatan sudut (ω) konstan, persamaan gerak dari benda tegar tersebut dinyatakan dengan persamaan

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$d\theta = \omega dt$$

$$\int_0^\theta d\theta = \int_0^t \omega dt$$

$$\theta(t) - \theta_0 = \omega \int_0^t dt$$

$$\theta(t) - \theta_0 = \omega t$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega t \quad (5-8)$$

dengan θ_0 adalah sudut yang ditempuh pada saat $t = 0$.

Akan tetapi, jika partikel tersebut mengalami perubahan kecepatan sudut sehingga menghasilkan percepatan sudut, persamaan gerak rotasi dari benda tegar tersebut dapat diturunkan dari **Persamaan (5-7)**, dengan nilai α tetap.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

$$d\omega = \alpha dt$$

$$\int_{\omega_0}^\omega d\omega = \int_0^t \alpha dt$$

$$\omega(t) - \omega_0 = \alpha \int_0^t dt$$

$$\omega(t) - \omega_0 = \alpha t$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \alpha t \quad (5-9)$$

Kata Kunci

- posisi sudut
- kecepatan sudut
- percepatan sudut

Berdasarkan **Persamaan (5–8)** dan **Persamaan (5–9)**, diperoleh persamaan posisi sudut untuk gerak melingkar beraturan sebagai berikut.

$$\int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega(t) dt$$

$$= \int_0^t (\omega_0 + \alpha t) dt$$

$$\theta - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

(5–10)

Tugas Anda 5.1

Buatlah perbandingan antara persamaan posisi, kecepatan, dan percepatan untuk gerak lurus berubah beraturan dan gerak rotasi benda tegar.

Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah roda berjari-jari 30 cm berotasi dengan sudut rotasi yang dinyatakan dengan persamaan $\theta = (4 \text{ rad/s}^2)t^2$. Tentukanlah
 - a. besar sudut θ pada waktu $t_1 = 2 \text{ s}$ dan $t_2 = 4,05$ dalam satuan radian dan derajat;
 - b. jarak tempuh partikel pada tepi roda selama interval waktu t_1 dan t_2 ;
 - c. kecepatan sudut rata-rata dalam satuan rad/s antara t_1 dan t_2 ; dan
 - d. kecepatan sudut sesaat pada $t = 3 \text{ s}$.
2. Sebuah roda sepeda yang sedang berputar memiliki diameter 38 cm. Jika sebuah titik pada tepi roda menempel 56,5 kali pada tanah, berapakah panjang lintasan yang dilalui oleh roda sepeda tersebut?
3. Sebuah piringan VCD berotasi dengan kecepatan sudut ω yang dinyatakan dengan persamaan $\omega = (8 \text{ rad/s}^3)t^2$. Tentukanlah percepatan sudut rata-rata antara $t_1 = 1 \text{ s}$ dan $t_2 = 2 \text{ s}$ dan besar percepatan sudut sesaat pada saat $t = 5 \text{ s}$.

B. Dinamika Gerak Rotasi

1. Momen Gaya (Torsi)

Momen gaya atau torsi merupakan besaran yang menyebabkan sebuah benda tegar (benda yang tidak dapat berubah bentuk) cenderung untuk berotasi terhadap porosnya. Momen gaya termasuk besaran vektor dan diberi lambang τ (tau).

Bagaimanakah cara menentukan torsi atau momen gaya yang bekerja pada benda yang berotasi? Perhatikan kembali **Gambar 5.6 (a)**. Kunci mur yang memiliki panjang r digunakan untuk memutar mur pada roda mobil. Ketika mur berputar akibat gaya yang diberikan pada kunci mur, mur berperan sebagai engsel atau pusat sumbu putar. Momen gaya dirumuskan dengan persamaan

$$\tau = r \times F$$

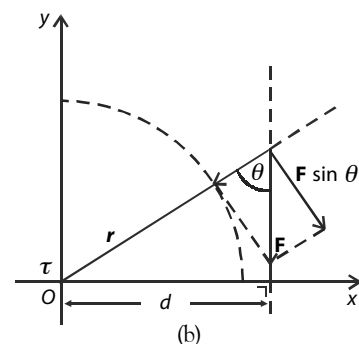
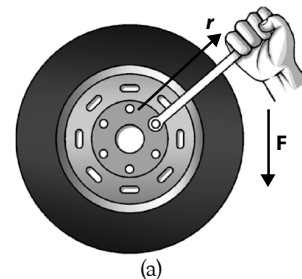
(5–11)

Berdasarkan **Persamaan (5–11)**, diketahui bahwa torsi atau momen gaya memiliki satuan newton meter (Nm).

Perhatikan **Gambar 5.6(b)** yang menunjukkan diagram momen gaya yang bekerja pada saat membuka mur roda mobil. Komponen gaya F yang bekerja pada batang r membentuk sudut θ , arah perputarannya searah dengan arah putaran jarum jam. Komponen gaya F yang menyebabkan mur berotasi adalah $F \sin \theta$, yaitu komponen gaya yang tegak lurus terhadap r . Oleh karena itu, besar momen gaya yang dihasilkan adalah

$$\tau = rF \sin \theta = Fd$$

(5–12)



Gambar 5.6

- (a) Gaya F dibutuhkan untuk membuka mur pada roda mobil.
- (b) Diagram momen gaya atau torsi yang bekerja saat membuka mur pada roda mobil.

Keterangan:

τ = besar momen gaya (Nm)

r = jarak sumbu rotasi ke titik tangkap (m)

F = besar gaya yang dikerjakan (N)

$d = r \sin \theta =$ lengan momen (m)

Perhatikan persamaan momen gaya pada **Persamaan (5–11)**. Besar momen gaya dihasilkan dari perkalian vektor. Jika sudut antara r dan gaya F tegak lurus ($\theta = 90^\circ$), akan diperoleh besar momen gaya τ sebesar

$$\tau = rF \quad (5-13)$$

Arah dari momen gaya (τ) dapat ditentukan berdasarkan konvensi atau kesepakatan berikut ini. Jika arah putaran torsi searah dengan arah putaran jarum jam, momen gaya (τ) bernilai positif. Jika arah putaran torsi berlawanan arah dengan arah putaran jarum jam, momen gaya (τ) bernilai negatif.

2. Momen Inersia

Anda tentu mengetahui bahwa setiap benda memiliki kecenderungan untuk mempertahankan keadaan geraknya. Dalam gerak linear, setiap benda yang diam akan tetap diam. Adapun benda yang sedang bergerak lurus beraturan memiliki kecenderungan untuk tetap bergerak lurus beraturan, kecuali ada resultan gaya yang memengaruhinya. Hal tersebut sesuai dengan Hukum I Newton. Kecenderungan benda untuk mempertahankan keadaannya disebut *inersia* atau *massa*.

Demikian pula halnya dengan dinamika gerak rotasi. Benda yang sedang berotasi memiliki kecenderungan untuk tetap mempertahankan gerak rotasinya. Kecenderungan tersebut dinamakan *momen inersia*. Momen inersia yang berotasi dipengaruhi oleh massa dan pola distribusi massa terhadap sumbu putar.

a. Momen Inersia Benda Diskrit (Partikel)

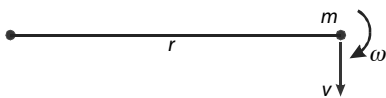
Jika sebuah partikel yang bermassa m berputar mengelilingi sumbu putar yang berjarak r dari partikel tersebut, dapatkan Anda menghitung besarnya energi kinetik dari partikel tersebut? Perhatikan **Gambar 5.7**. Dalam gerak melingkar, kecepatan linear dinyatakan dengan $v = \omega r$, dengan ω kecepatan sudut. Oleh karena itu, besar energi kinetik rotasi dari partikel dapat dinyatakan dengan

$$E_{k\text{rotasi}} = \frac{1}{2} m r^2 v^2 \quad (5-14)$$

Dari **Persamaan (5–14)**, diperoleh nilai $m r^2$ yang menyatakan momen inersia dari partikel yang bergerak melingkar. Momen inersia dilambangkan dengan I .

$$I = m r^2 \quad (5-15)$$

Dengan demikian, momen inersia sebuah partikel sebanding dengan massa partikel dan kuadrat jarak antara partikel dan sumbu putarnya. Momen inersia merupakan besaran skalar yang memiliki satuan kgm^2 .



Gambar 5.7

Partikel bermassa m berputar mengelilingi sebuah sumbu putar yang berjarak r dari partikel tersebut.

b. Momen Inersia Benda Tegar

Sebuah benda tegar terdiri atas sejumlah partikel yang terpisah satu dengan yang lainnya serta jaraknya tetap. Momen inersianya merupakan jumlah dari momen inersia semua partikel itu, yakni $I = \Sigma mr^2$. Akan tetapi, untuk sebuah benda yang memiliki distribusi massa yang kontinu, atau tidak dapat dipisahkan seperti **Gambar 5.8**, berlaku persamaan

$$I = \int r^2 dm \tag{5-16}$$

Sebuah benda bermassa m yang berbentuk batang dengan panjang L tampak seperti **Gambar 5.9**. Benda tersebut memiliki momen inersia terhadap porosnya di O . Momen inersianya ditentukan dengan cara integrasi dari seluruh massa yang ada, dengan r adalah jarak elemen massa dm ke sumbu putar. Tinjau sebuah batang yang memiliki massa m serba sama dan panjang batang L . Dari **Persamaan (5-16)**, diketahui bahwa $r = x$ dan $dm = \frac{M}{L}dM$ serta batas-batas integralnya adalah x_1 dan x_2 , akan diperoleh

$$I = \int_{x_1}^{x_2} x^2 \left(\frac{M}{L} \right) dx \tag{5-17}$$

Untuk sumbu putar yang terletak pada ujung batang seperti **Gambar 5.10** dengan $x_1 = 0$ dan $x_2 = L$ maka momen inersia batang menjadi

$$I = \frac{M}{L} \int_0^L x^2 dx = \frac{M}{L} \left[\frac{1}{3} x^3 \right]_0^L = \frac{M}{L} \left[\frac{1}{3} L^3 \right] = \frac{1}{3} ML^2 \tag{5-18}$$

Untuk sumbu putar yang terletak pada pertengahan batang, seperti tampak pada **Gambar 5.11**, akan diperoleh $x_1 = -\frac{1}{2}L$ dan $x_2 = \frac{1}{2}L$. Oleh karena itu, momen inersia batang akan menjadi

$$\begin{aligned} I &= \frac{M}{L} \int_{-\frac{1}{2}L}^{\frac{1}{2}L} x^2 dx = \frac{M}{L} \left[\frac{1}{3} x^3 \right]_{-\frac{1}{2}L}^{\frac{1}{2}L} \\ &= \frac{M}{L} \left[\frac{1}{3} \left(\frac{1}{2}L \right)^3 - \frac{1}{3} \left(-\frac{1}{2}L \right)^3 \right] = \frac{1}{12} ML^2 \end{aligned} \tag{5-19}$$

Momen inersia benda yang sumbu putarnya terletak pada pusat massa disebut momen inersia pusat massa (I_{pm}). Jika sumbu putarnya tidak terletak pada pusat massa, untuk mencari momen inersianya, dapat digunakan persamaan berikut ini yang disebut sebagai kaidah sumbu sejajar.

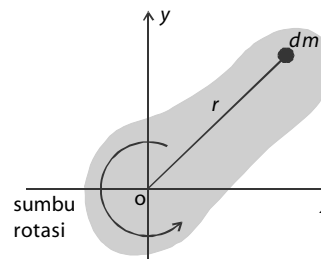
$$I = I_{pm} + md^2$$

Keterangan:

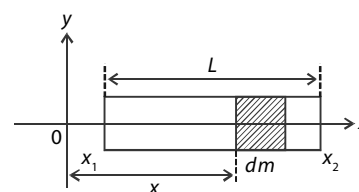
m = massa benda

d = jarak dari pusat massa ke sumbu putar

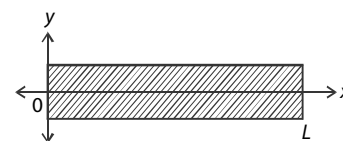
Momen inersia dari beberapa bentuk benda dengan posisi sumbu tertentu dapat dilihat pada tabel berikut ini.



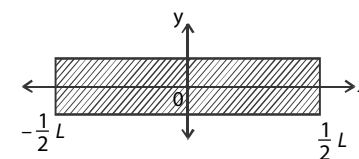
Gambar 5.8 Momen inersia benda pejal dihitung dengan metode integral terhadap $r^2 dm$.



Gambar 5.9 Sebuah batang homogen memiliki massa m dengan panjang batang L .



Gambar 5.10 Momen inersia untuk sumbu putar yang terletak pada ujung batang adalah $I = \frac{1}{3} ML^2$.



Gambar 5.11 Momen inersia untuk sumbu putar yang terletak pada pertengahan batang adalah $I = \frac{1}{12} ML^2$.

Tabel 5.1
Momen Inersia Berbagai Benda

Ingatlah

Momentum sudut merupakan besaran vektor.

Benda	Gambar	Poros	Momen Inersia
batang silinder		melalui pusat	$I = \frac{1}{12}ML^2$
batang silinder		melalui ujung	$I = \frac{1}{3}ML^2$
cincin tipis		melalui sumbu silinder	$I = MR^2$
silinder pejal		melalui sumbu silinder pejal	$I = \frac{1}{2}MR^2$
silinder pejal		seperti tampak pada gambar	$I = \frac{1}{4}MR^2 + \frac{1}{12}ML^2$
bola pejal		melalui diameter	$I = \frac{2}{5}MR^2$
bola berongga		melalui diameter	$I = \frac{2}{3}MR^2$
bola pejal		melalui salah satu garis singgungnya	$I = \frac{7}{5}MR^2$

Sumber: *Fundamental of Physics*, 2001

3. Hubungan Momen Gaya dan Percepatan Sudut

Perhatikan Gambar 5.12. Sebuah benda tegar bermassa m berotasi pada terhadap titik sumbu O . Anda telah mengetahui bahwa pada benda tegar yang berotasi gaya yang bekerja pada benda meliputi seluruh bagian benda, tetapi fokus pada gambar tersebut diwakili oleh titik P yang berjarak r terhadap sumbu rotasi. Gaya tangensial F bekerja di titik P sehingga benda bergerak rotasi dengan percepatan tangensial a_t konstan. Menurut Hukum II Newton, besar gaya tangensial tersebut adalah

$$F_t = m a_t \quad (5-20)$$

Jika ruas kiri dan ruas kanan dari Persamaan (5-20) dikalikan dengan jari-jari r , akan diperoleh

$$F_t r = m a_t r$$

Hubungan antara percepatan tangensial (a_t) dan percepatan sudut (α) adalah $a_t = \alpha r$. Oleh karena itu, diperoleh

$$F_t r = m \alpha r^2 = m r^2 \alpha \quad (5-21)$$

Telah diketahui bahwa $\tau = F_t r$. Oleh karena F_t tegak lurus r maka diperoleh persamaan momen gaya sebesar

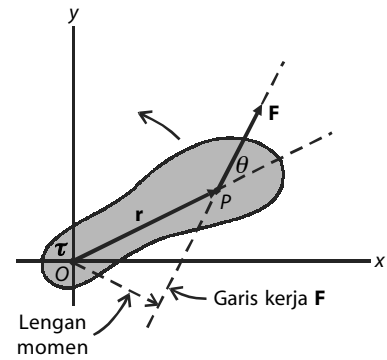
$$\tau = m r^2 \alpha = I \alpha \quad (5-22)$$

Keterangan:

τ = besar momen gaya (Nm)

α = besar percepatan sudut (rad/s)

I = momen inersia (kgm^2)



Gambar 5.12

Gaya F bekerja pada sebuah partikel P pada benda tegar menghasilkan torsi τ .

Kata Kunci

- benda diskrit
- benda tegar
- energi kinetik rotasi
- energi kinetik translasi
- momentum sudut
- sumbu putar
- torsi

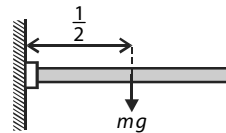
Contoh 5.1

Sebuah batang homogen memiliki panjang L dan massa m . Batang tersebut diberi engsel sehingga dapat berotasi seperti tampak pada gambar. Batang dalam keadaan diam pada posisi horizontal. Tentukanlah besar percepatan sudut (α) dan besar percepatan tangensial pada ujung batang (a_t) ketika batang dilepaskan.

Jawab:

Gaya berat yang bekerja pada batang adalah $F = mg$,

dengan jarak $d = \frac{1}{2} L$ dari pusat rotasi (engsel).



Momen Inersia batang yang diperoleh dari Tabel 5.1 adalah $I = \frac{1}{3} ML^2$. Persamaan percepatan sudut batang adalah

$$\alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{Fd}{\frac{1}{3} ML^2} = \frac{(mg)\frac{1}{2}L}{\frac{1}{3} mL^2} = \frac{3g}{2L}$$

Jadi, besar percepatan sudut batang adalah $\alpha = \frac{3g}{2L}$.

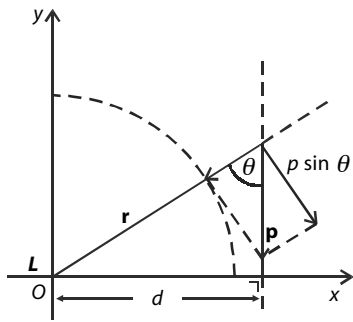
Adapun besar percepatan tangensial pada ujung batang adalah

$$a_t = \alpha r = \frac{3g}{2L} L = \frac{3}{2} g.$$



Tantangan untuk Anda

Seorang pemain akrobat akan membutuhkan tongkat ketika melakukan aksi berjalan di atas tali. Jika ada dua buah tongkat yang sama panjang tetapi beratnya berbeda, tongkat manakah yang harus dipilih?



Gambar 5.13

Diagram momen gaya atau torsi yang bekerja pada waktu membuka mur sebuah roda mobil.

4. Momentum Sudut dan Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Seperti halnya pada gerak translasi, pada gerak rotasi juga terdapat konsep momentum yang disebut dengan momentum sudut. Pentingnya keberadaan momentum sudut pada gerak rotasi sama dengan pentingnya keberadaan momentum linear pada gerak translasi.

Pada **Gambar 5.13** terlihat sebuah partikel bermassa m dan memiliki momentum linear \mathbf{p} pada posisi \mathbf{r} terhadap titik pusat O . Momentum sudut \mathbf{L} terhadap titik pusat O adalah

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} \quad (5-23)$$

Besarnya momentum sudut diberikan oleh persamaan

$$L = r p \sin \theta \quad (5-24)$$

Sudut θ adalah sudut yang dibentuk oleh \mathbf{r} dan \mathbf{p} . Arah momentum sudut \mathbf{L} tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk oleh \mathbf{r} dan \mathbf{p} . Arah \mathbf{L} dapat dibentuk oleh kaidah tangan kanan, yaitu ayunkan \mathbf{r} ke arah \mathbf{p} melalui sudut terkecil dengan cara mengepalkan jari-jemari tangan kanan. Ibu jari yang tegak lurus dan menunjuk arah tertentu menyatakan arah \mathbf{L} .

Momentum sudut merupakan besaran vektor yang arahnya mengikuti kaidah tangan kanan. Jika ditinjau secara skalar, **Persamaan 5.24** dapat dituliskan sebagai berikut (sudut $\theta = 90^\circ$).

$$L = r p = r m v = r m \omega r = m r^2 \omega$$

Oleh karena $m r^2 = I$, **Persamaan (5-24)** menjadi

$$\mathbf{L} = I \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (5-25)$$

Oleh karena besar $\tau = I \alpha$ dan besar $L = I \omega$ maka diperoleh

$$\frac{dL}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} = I \alpha$$

sehingga

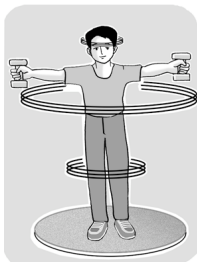
$$\frac{dL}{dt} = \alpha \quad (5-26)$$

Persamaan (5-25) menyatakan bahwa jumlah torsi eksternal sama dengan laju perubahan momentum sudut. **Persamaan (5-26)** sebenarnya didapat dari penurunan persamaan torsi dan gaya dalam bentuk momentum. Dapatkah Anda menurunkan persamaan tersebut? Jika $\tau_{\text{eksternal}} = 0$, nilai L akan konstan sehingga vektor momentum sudut total sistem partikel tetap konstan. Pernyataan tersebut merupakan Hukum Kekekalan Momentum Sudut, yaitu jika $\tau = 0$, momentum sudutnya konstan.

Dengan mengubah susunan bagian-bagiannya, kelembaman rotasi I benda tersebut akan berubah. Jika tidak ada torsi eksternal, perubahan kelembaman rotasi I akan diimbangi oleh kecepatan sudut ω benda agar saling meniadakan. Oleh karena itu, Hukum Kekekalan Momentum Sudut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$L_1 = L_2 \text{ atau } I_1 \omega_1 = I_2 \omega_1 \quad (5-27)$$

Pada **Gambar 5.14**, seseorang berdiri di atas piringan yang sedang berputar, pada kedua tangannya masing-masing memegang sebuah beban. Jika sumbu putar diambil berimpit dengan sumbu tubuh orang itu dan massa beban yang dipegangnya terletak jauh dari sumbu putar, yaitu sejauh panjang rentangan tangannya, momen inersia beban akan bernilai besar. Hal tersebut terjadi karena beban terletak jauh dari sumbu putar.



Gambar 5.14

Momentum sudut ketika kedua tangan direntangkan adalah $I_a \omega_a$.

Ketika putaran sedang berlangsung dan kedua tangan yang memegang beban dirapatkan mendekati tubuh, seperti pada **Gambar 5.15**, maka momen inersianya akan berkurang karena jarak beban ke sumbu putarnya berkurang. Mengingat persamaan $I = m r^2 \omega$, kecepatan sudut yang dialami akan bertambah besar. Hal ini disebabkan karena adanya penurunan momen inersia. Dengan demikian, berlaku hubungan

$$I_a \omega_a = I_b \omega_b; I_a < I_b \text{ dan } \omega_a > \omega_b \quad (5-28)$$

Keterangan:

- I_a = momen inersia keadaan a (kgm^2)
- ω_a = besar kecepatan sudut keadaan a (rad/s)
- I_b = besar momen inersia keadaan b (kgm^2)
- ω_b = kecepatan sudut keadaan b (rad/s)

Aplikasi lain dari Hukum Kekekalan Momentum Sudut adalah gerak planet dalam mengelilingi Matahari. Johannes Kepler menyatakan bahwa dalam selang waktu Δt yang sama, sebuah planet akan menyapu luas daerah yang sama. Perhatikan **Gambar 5.16**. Sebuah planet bergerak dari posisi A ke posisi B sehingga luas daerah yang dilaluinya adalah A_1 (gambar yang diarsir). Luas daerah A_1 adalah

$$A_1 = \frac{1}{2} (\text{alas})(\text{tinggi}) = \frac{1}{2} (r)(r \Delta \theta) = \frac{1}{2} r^2 \Delta \theta$$

$$\frac{A_1}{\Delta t} = \frac{1}{2} r^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{2} r^2 \omega = \frac{mr^2 \omega}{2m} = \frac{L}{2m}$$

$$A_1 = \frac{L}{2m} \Delta t \quad (5-29)$$

Menurut Hukum II Kepler, luas bidang A_1 sama dengan luas bidang A_2 . Jika hal ini dikaitkan dengan Hukum Kekekalan Momentum Sudut, momentum sudut (L) planet dalam keadaan 1 (lintasan AB) dan pada keadaan 2 (lintasan CD) adalah sama. Konsekuensi logis dari hal ini adalah kelajuan planet dalam mengelilingi Matahari tidak konstan. Pada titik perihelion (titik paling dekat dengan Matahari) kelajuannya paling besar, dan pada titik aphelion (titik paling jauh dengan Matahari) kelajuannya paling kecil.

Contoh 5.2

Seorang perenang bermassa 50 kg melompat meninggalkan papan tumpu dalam konfigurasi lurus dengan kecepatan sudut 0,25 putaran per sekon terhadap pusat massanya. Kemudian, perenang menggulungkan tubuhnya dan gulungan tersebut berjari-jari kira-kira 30 cm. Dengan menganggap perenang sebagai sebuah batang homogen dengan panjang 1,6 m sesaat setelah melompat, dan mirip sebuah bola homogen saat bergulung, perkirakan kecepatan sudutnya saat bergulung.

Jawab:

Diketahui: $M = 50 \text{ kg}$; $\omega_1 = 0,25 \text{ putaran/s}$; $R = 30 \text{ cm}$; $L = 1,6 \text{ m}$.

Pada saat awal, perenang berbentuk batang dengan poros di titik tengah sehingga momen inersianya adalah

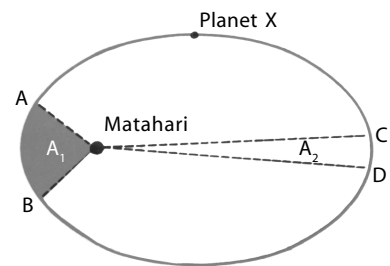
$$I_1 = \frac{1}{12} ML^2 = \frac{1}{12} (50 \text{ kg})(1,6 \text{ m})^2 = 10,67 \text{ kgm}^2$$

Pada saat menggulung, perenang berbentuk bola dengan momen inersianya adalah

$$I_1 = \frac{2}{5} MR^2 = \frac{2}{5} (50 \text{ kg})(0,3 \text{ m})^2 = 1,8 \text{ kgm}^2$$



Gambar 5.15
Momentum sudut ketika kedua tangan dirapatkan ($I_b \omega_b$).



Gambar 5.16
Lintasan sebuah planet mengelilingi Matahari berbentuk elips.

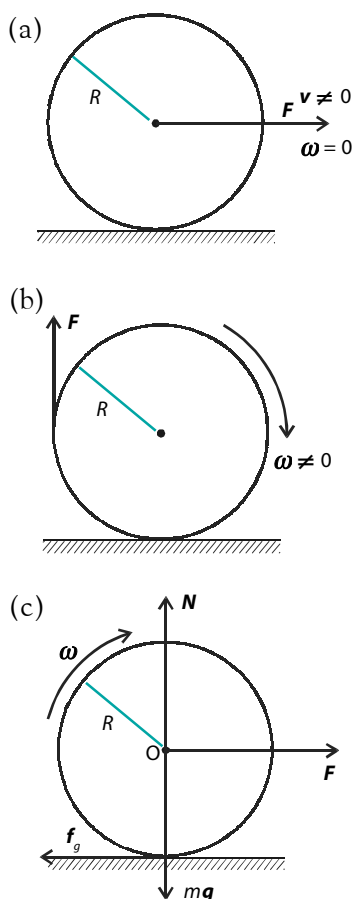


Hukum Kekekalan Momentum Sudut berlaku jika tidak ada momen gaya luar yang bekerja pada sistem.

Kecepatan sudut saat mengguling dihitung dengan persamaan

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2 \text{ atau } \omega_2 = \frac{I_1}{I_2} \omega_1, \text{ sehingga}$$

$$\omega_2 = \frac{10,67 \text{ kg m}^2}{1,8 \text{ kg m}^2} \times 0,25 \text{ putaran/s} = 1,48 \text{ putaran/s.}$$



Gambar 5.17
 (a) Benda bergerak translasi.
 (b) Benda bergerak rotasi.
 (c) Benda mengguling pada bidang yang permukaannya kasar.

5. Gerak Mengguling

Anda pasti sering menjumpai benda yang bergerak mengguling, misalnya sebuah bola yang dilemparkan di atas lantai mendatar, atau roda-roda sebuah kendaraan yang melaju di jalan raya. Mengguling adalah peristiwa bergeraknya sebuah benda secara translasi dan rotasi (**Gambar 5.17(a)** dan **5.17(b)**). Pada saat mengguling, apabila tidak terjadi selip maka kedua gerak berlangsung secara bersamaan dan jarak yang ditempuh dalam satu putaran sama dengan keliling benda.

a. Mengguling pada Bidang Datar

Sebuah benda (silinder) terletak di atas bidang datar dan diberi gaya F seperti pada **Gambar 5.17(c)**. Agar silinder dapat mengguling maka bidang datar atau lantai harus dibuat kasar. Jika lantai dibuat licin maka silinder hanya melakukan gerak translasi dan tidak disertai dengan gerak rotasi sehingga silinder dikatakan tidak mengguling, karena silinder dalam keadaan selip. Jadi, pada bidang datar kasar, benda mengalami translasi dan gerak rotasi. Besarnya gerak translasi menurut Hukum II Newton adalah

$$F - f_g = m a$$

Untuk gerak rotasi dari semua gaya yang bekerja pada benda, hanya gaya gesek yang menghasilkan momen gaya. Jadi, momen gaya akan menyebabkan silinder bergerak rotasi terhadap porosnya, yaitu di titik O . Persamaan momen gayanya dapat dituliskan $\tau = I\alpha$ dan $\tau = f_g R$.

Dari persamaan tersebut akan diperoleh

$$f_g = \frac{I\alpha}{R}$$

Jika gaya gesek f_g yang bekerja pada silinder bernilai konstan dan disubstitusikan ke dalam persamaan gerak translasi ($F - f_g = ma$) maka akan diperoleh

$$a = \frac{F}{m + \frac{1}{R^2}} \quad (5-30)$$

Untuk silinder pejal yang memiliki momen inersia $I = \frac{1}{2} mR^2$ (dari **Tabel 5.1**), persamaan percepatan gerak translasi akan menjadi

$$a = \frac{2F}{3m} \quad (5-31)$$

Keterangan:

F = besar gaya yang bekerja (N)

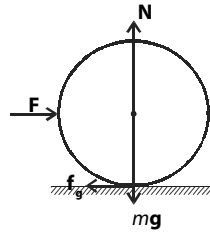
a = besar percepatan translasi (m/s^2)

m = massa benda (kg)

Contoh 5.3

Sebuah silinder pejal bermassa 15 kg memiliki jari-jari 20 cm. Silinder tersebut didorong oleh gaya sebesar 30 N seperti pada gambar. Tentukanlah percepatan yang dialami silinder tersebut, jika:

- tidak ada gaya gesek antara silinder dan lantai (silinder meluncur/selip);
- terdapat gesekan sehingga silinder menggelinding.



Jawab:

Diketahui: $m = 15 \text{ kg}$; $F = 30 \text{ N}$; $R = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$.

- Silinder meluncur (selip); $a = \frac{F}{m} = \frac{30 \text{ N}}{15 \text{ kg}} = 2 \text{ m/s}^2$.
- Saat silinder menggelinding, gunakan **Persamaan (5-23)** dengan $I = \frac{1}{2}mR^2$, maka $a = \frac{2F}{3m} = \frac{2(30 \text{ N})}{3(15 \text{ kg})} = \frac{4}{3} \text{ m/s}^2$.

Sekarang, coba tentukan percepatan sudutnya (α).

b. Menggelinding pada Bidang Miring

Anda telah mengetahui bahwa silinder akan menggelinding jika terdapat gaya gesek antara silinder dan bidang sentuh. Demikian halnya pada bidang miring, agar silinder dapat menggelinding maka harus ada gaya gesek antara silinder dan bidang miring.

Untuk gerak translasi, berlaku persamaan $mg \sin \theta - f_g = ma$ dan $N = mg \cos \theta$. Silinder akan bergerak rotasi jika silinder ini memiliki percepatan sebesar $a = a_t$ sehingga akan diperoleh percepatan sudut α . Percepatan sudut dari gerak rotasi pada sebuah silinder disebabkan adanya momen gaya dari gaya gesek. Persamaan gaya gesek untuk benda yang menggelinding pada bidang miring adalah $f_g = I \frac{a}{R^2}$.

Gaya lain yang bekerja pada silinder, tetapi tidak menimbulkan momen gaya, seperti gaya berat tidak diperhitungkan. Hal ini dikarenakan gaya tersebut bekerja dari pusat rotasi. Dengan melakukan eliminasi dari dua persamaan di atas, diperoleh persamaan

$$mg \sin \theta - I \frac{a}{R^2} = ma \Rightarrow a = \frac{mg \sin \theta}{m + \frac{I}{R^2}} \quad (5-32)$$

Untuk silinder pejal ($I = \frac{1}{2}mR^2$), persamaan percepatannya adalah

$$a = \frac{mg \sin \theta}{m + \frac{\frac{1}{2}mR^2}{R^2}} = \frac{mg \sin \theta}{m + \frac{1}{2}m} = \frac{2}{3}g \sin \theta \quad (5-33)$$

Contoh 5.4

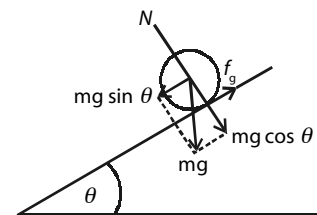
Sebuah silinder pejal homogen bermassa 2 kg memiliki jari-jari 3 cm. Kemudian, silinder tersebut ditempatkan pada bidang miring dengan sudut kemiringan 53° . Tentukanlah percepatan yang dialami silinder jika:

- tidak ada gesekan (lantai licin);
- silinder menggelinding.

Ingatlah



Gaya gesek akan menyebabkan silinder menggelinding. Gaya gesek ini berperan dalam menghasilkan momen gaya untuk silinder.



Gambar 5.18

Sebuah benda yang menggelinding pada bidang miring.

Jawab:

Diketahui: $m = 2 \text{ kg}$; $R = 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$; $\theta = 53^\circ$

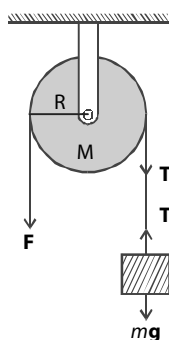
a. Oleh karena bidang licin, silinder pejal bergerak sepanjang bidang dengan cara meluncur (menggelincir).

$$\Sigma F = m a \Rightarrow mg \sin \theta = m a$$

$$a = g \sin \theta = 10 \text{ m/s}^2 \sin 53^\circ = 10 \text{ m/s}^2 (0,8) = 8 \text{ m/s}^2$$

b. Saat silinder pejal menggelinding, gunakan **Persamaan (5-22)** dengan

$$I = \frac{1}{2} m R^2, \text{ sehingga diperoleh } a = \frac{2F}{3m} = \frac{2mg \sin \theta}{3m} = \frac{(2)(10 \text{ m/s}^2)(\sin 53^\circ)}{3} = 5\frac{1}{3} \text{ ms}^2.$$



Gambar 5.19
Beban dihubungkan dengan katrol.

c. Beban Dihubungkan Melalui Katrol

Di Kelas X, Anda telah mempelajari tentang beban atau benda yang diikat oleh seutas tali dan dihubungkan dengan katrol. Akan tetapi, massa katrol diabaikan karena Anda belum mempelajari konsep momen inersia. Sekarang, Anda telah mempelajari momen inersia. Dengan demikian, Anda dapat menggunakan konsep momen inersia sehingga dapat memperhitungkan massa katrol pada sistem katrol ini.

Perhatikan **Gambar 5.19**. Sebuah beban bermassa m dihubungkan dengan seutas tali tidak bermassa melalui sebuah katrol yang dapat bergerak rotasi. Katrol memiliki massa M dan berjari-jari R , serta memiliki momen inersia I . Tali ditarik oleh gaya F sehingga beban bergerak ke atas dan mengalami percepatan translasi sebesar a . Persamaan gerak translasi pada benda adalah $\Sigma F = ma$.

$$T - mg = m a \Rightarrow T = mg + m a \quad (5-34)$$

Persamaan gerak rotasi pada katrol adalah

$$\Sigma \tau = I \alpha; \quad \alpha = \frac{a}{R}$$

$$FR - TR = I \frac{a}{R}$$

$$a = \frac{(F - T)R^2}{I} \quad (5-35)$$

Jika tegangan tali pada **Persamaan (5-34)** disubstitusikan ke **Persamaan (5-35)** akan diperoleh persamaan

$$a = \frac{(F - mg - ma)R^2}{I}$$

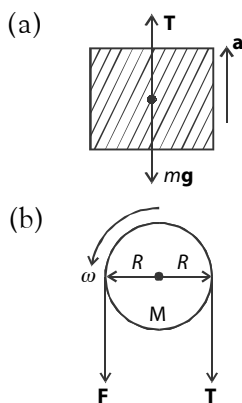
$$a = \frac{F - mg}{\frac{I}{R^2} + m} \quad (5-36)$$

atau

$$a = \frac{F - mg}{\frac{M}{2} + m} \quad (5-37)$$

Jika katrol berupa silinder pejal dengan massa M , momen inersia $I = \frac{1}{2} MR^2$. **Persamaan (5-36)** menjadi

$$a = \frac{F - mg}{\frac{M}{2} + m} \quad (5-37)$$



Gambar 5.20
(a) Gaya-gaya pada benda m .
(b) Gaya-gaya pada katrol.

Keterangan:

a = besar percepatan linear (m/s^2)

F = besar gaya tarik (N)

m = massa benda (kg)

M = massa katrol (kg)

Contoh 5.5

Perhatikan gambar di samping. Dua buah benda yang massanya $m_1 = 2 \text{ kg}$ dan $m_2 = 3 \text{ kg}$ dihubungkan dengan seutas tali melalui sebuah katrol dengan jari-jari 10 cm dan massa katrol 6 kg . Tentukanlah:

- percepatan linear sistem;
- tegangan tali T_1 dan T_2 .

Jawab:

- Sistem mula-mula dalam keadaan diam.

Ketika dilepas, sistem mulai bergerak ke arah m_2 sehingga benda m_1 naik dan m_2 turun

$$T_1 - m_1 g = m_1 a \quad m_2 g - T_2 = m_2 a$$

$$T_1 = m_1 g + m_1 a \quad T_2 = m_2 g - m_2 a$$

Perlu diketahui bahwa tali dianggap homogen.

Tinjau katrol:

$$\Sigma \tau = I \alpha; I = \frac{1}{2} m_k R^2; I \alpha = T_2 R - T_1 R$$

$$I \frac{a}{R} = (T_2 - T_1) R \Rightarrow \frac{1}{2} m_k R a = (T_2 - T_1) R$$

$$\frac{1}{2} m_k a = (T_2 - T_1)$$

Substitusikan harga T_1 dan T_2 dari gerak translasi ke dalam persamaan gerak rotasi maka diperoleh

$$\frac{1}{2} m_k a = [(m_2 g - m_2 a) - (m_1 g + m_1 a)]$$

$$\left(\frac{1}{2} m_k + m_2 + m_1 \right) a = (m_2 - m_1) g$$

$$a = \frac{(m_2 - m_1) g}{\frac{1}{2} m_k + m_2 + m_1}$$

$$= \frac{(3 \text{ kg} - 2 \text{ kg}) 10 \text{ m/s}^2}{\left(\frac{1}{2} 6 \text{ kg} \right) + 3 \text{ kg} + 2 \text{ kg}} = \frac{10 \text{ kg m/s}^2}{8 \text{ kg}} = 1,25 \text{ m/s}^2$$

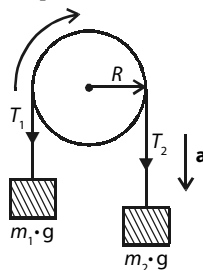
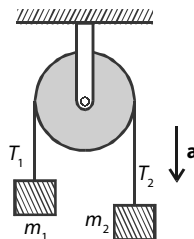
Jadi, percepatan linear sistem adalah $1,25 \text{ m/s}^2$.

- Tegangan tali T_1 dan T_2 :

$$T_1 = m_1 g + m_1 a = (2 \text{ kg}) (10 \text{ m/s}^2) + (2 \text{ kg}) (1,25 \text{ m/s}^2) = 22,5 \text{ N.}$$

$$T_2 = m_2 g - m_2 a = (3 \text{ kg}) (10 \text{ m/s}^2) - (3 \text{ kg}) (1,25 \text{ m/s}^2) = 26,25 \text{ N.}$$

Jadi, tegangan tali T_1 dan T_2 berturut-turut adalah $22,5 \text{ N}$ dan $26,25 \text{ N}$.



Tantangan untuk Anda

Dengan kecepatan yang sama, mobil manakah di antara mobil yang bergerak di atas jalan kasar dan mobil yang bergerak di atas jalan licin, yang terlebih dahulu sampai? Mengapa demikian?

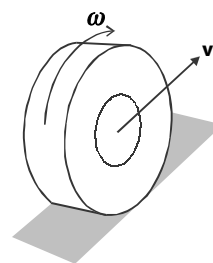
6. Energi dalam Gerak Rotasi

a. Energi Kinetik Rotasi

Setiap benda yang bergerak memiliki energi kinetik. Sama halnya dengan benda yang melakukan gerak rotasi, benda tersebut akan memiliki energi kinetik rotasi. Diketahui energi kinetik translasi adalah

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (5-38)$$

Mengingat $v = r \omega$ maka $E_k = \frac{1}{2} m (r \omega)^2 = \frac{1}{2} m r^2 \omega^2$.



Gambar 5.21

Benda bergerak translasi dengan kecepatan v sambil berotasi dengan kecepatan sudut ω .

Diketahui bahwa mr^2 adalah momen inersia maka untuk gerak rotasi menjadi

$$E_{k \text{ rotasi}} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (5-39)$$

Keterangan:

E_k = energi kinetik translasi (joule)

$E_{k \text{ rotasi}}$ = energi kinetik rotasi (joule)

I = momen inersia benda (kgm^2)

ω = kelajuan sudut (rad/s)

b. Energi Kinetik Translasi dan Rotasi

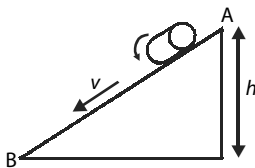
Telah Anda ketahui bahwa sebuah benda yang bergerak menggelinding akan memiliki dua gerakan, yaitu gerak linear dan gerak rotasi. Gabungan gerak linear dan jarak rotasi disebut gerak translasi. Gerak translasi memiliki kecepatan linear v , sedangkan gerak rotasinya memiliki kecepatan sudut ω . Benda yang menggelinding memiliki energi kinetik translasi dan energi kinetik rotasi. Secara matematis, memenuhi persamaan

$$E_{k \text{ total}} = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$E_{k \text{ total}} = E_k + E_{k \text{ rotasi}} \quad (5-40)$$

Keterangan:

$E_{k \text{ total}}$ = energi kinetik total



Gambar 5.22

Silinder yang mula-mula diam bergerak menggelinding.

c. Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada Gerak Rotasi

Perhatikan **Gambar 5.22**. Sebuah silinder yang mula-mula diam, menggelinding dari A ke B. Jika diasumsikan selama bola berotasi tidak ada energi yang hilang dan berubah menjadi energi kalor, berlaku Hukum Kekekalan Energi.

$$E_{pA} + E_{kA} = E_{pB} + E_{kB}$$

$$mgh + 0 = 0 + \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (\text{untuk silinder pejal, } I = \frac{1}{2} mr^2)$$

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{4} mr^2 \left(\frac{v}{r} \right)^2$$

$$gh = \frac{3}{4} v^2$$

Dari persamaan tersebut, kecepatan silinder pejal ketika sampai di dasar bidang miring dapat diketahui, yaitu

$$v = \sqrt{\frac{3}{4} gh} \quad (5-41)$$

Persamaan (5-41) dapat dituliskan dalam bentuk umum, yaitu

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+k}} \quad (5-42)$$

Pada persamaan tersebut, k merupakan konstanta geometri yang dimiliki oleh benda dan dalam bidang teknik sering disebut sebagai jari-jari girasi. Nilai k ini bergantung pada jenis bendanya. Untuk silinder pejal $k = \frac{1}{2}$, untuk bola pejal $k = \frac{2}{5}$, dan untuk bola berongga $k = \frac{2}{3}$.

Contoh 5.6

Sebuah bola pejal bermassa m dan berjari-jari R menggelinding terhadap porosnya pada bidang miring seperti pada gambar. Tentukanlah kelajuan bola ketika sampai di dasar bidang jika dilepas dari ketinggian h (dari keadaan diam).

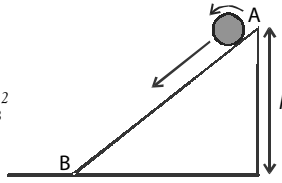
Jawab:

Bola bergerak menggelinding

$$E_{pA} + E_{kA} = E_{pB} + E_{kB}$$

$$mgh_A + \frac{1}{2}I\omega_A^2 + \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh_B + \frac{1}{2}I\omega_B^2 + \frac{1}{2}mv_B^2$$

$$mgh + 0 + 0 = 0 + \left(\frac{1}{2}I\omega_B^2 + \frac{1}{2}mv_B^2\right)$$



Untuk bola pejal, $I = \frac{2}{5}mR^2$ dan $v = R\omega$, sehingga

$$mgh = \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}mR^2\right)\left(\frac{v}{R}\right)^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

$$gh = \frac{1}{5}v^2 + \frac{1}{2}v^2$$

$$gh = \frac{7}{10}v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{10}{7}gh}$$

Kelajuan bola ketika bergerak meluncur dengan bidang dianggap licin:

$$E_{pA} + E_{kA} = E_{pB} + E_{kB}$$

$$mgh_A + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

Bandingkan oleh Anda. Kelajuan ketika bola bergerak menggelinding adalah

$v = \sqrt{\frac{10}{7}gh}$ dan kelajuan ketika bola bergerak meluncur adalah $v = \sqrt{2gh}$. Dapat disimpulkan bahwa bola yang bergerak menggelinding lebih lambat daripada bola yang bergerak meluncur. Hal tersebut disebabkan gerak rotasi pada bola menjadi penghambat terhadap laju bola.

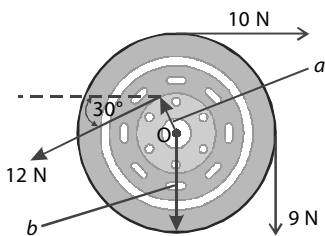
Kata Kunci

- lengan torsi
- momen inersia

Tes Kompetensi Subbab B

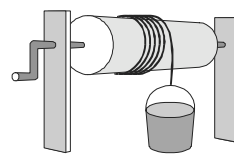
Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Perhatikan gambar berikut ini.

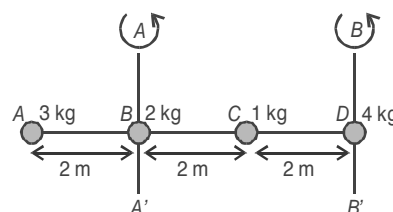


Tentukanlah momen gaya total yang bekerja pada roda terhadap poros O, jika $a = 10$ cm dan $b = 25$ cm.

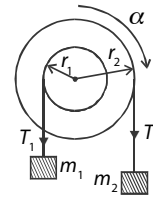
- Sebuah silinder pejal dengan jari-jari R dan bermassa M digunakan sebagai katrol untuk mengambil air sumur dengan sebuah ember. Massa ember m dan batang silinder dianggap licin. Tentukan percepatan ember saat jatuh ke sumur.



- Empat buah partikel masing-masing massanya $m_a = 3$ kg, $m_b = 2$ kg, $m_c = 1$ kg, dan $m_d = 4$ kg seperti tampak pada gambar. Tentukan momen inersia sistem jika sumbu putarnya:
 - melalui sumbu AA' ;
 - melalui sumbu BB' .



4. Sebuah silinder pejal bermassa 2 kg diletakkan pada sebuah bidang miring dengan sudut kemiringan 60° . Tentukanlah percepatan yang dialaminya, jika:
- tidak ada gesek;
 - silinder menggelinding.
5. Massa benda $m_1 = 1,8$ kg dan $m_2 = 2$ kg dihubungkan dengan katrol seperti gambar. Momen inersia sistem katrol adalah $I = 1,7$ kg m_2 , dengan $r_1 = 20$ cm dan $r_2 = 50$ cm.



Tentukan:

- percepatan sudut katrol;
- tegangan tali T_1 dan T_2 .

C. Kesetimbangan Benda Tegar

Anda telah mengetahui bahwa sebuah partikel dikatakan dalam keadaan setimbang jika partikel tersebut tidak mengalami percepatan, artinya jumlah vektor dari gaya-gaya yang bekerja pada partikel tersebut adalah nol, $\sum F = 0$. Hal yang sama berlaku pula untuk benda atau sistem partikel, yaitu pusat massa untuk benda memiliki percepatan nol jika resultan vektor dari seluruh gaya luar yang bekerja pada benda adalah nol. Hal tersebut dikenal sebagai syarat pertama untuk kesetimbangan. Dalam bentuk komponen-komponennya dinyatakan dengan persamaan

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum F_z = 0 \quad (5-43)$$

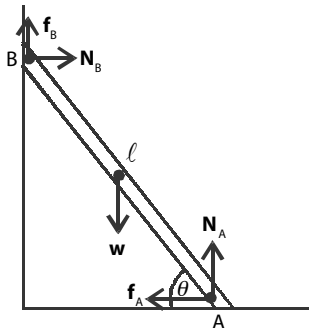
Adapun syarat kedua yang harus dipenuhi agar benda setimbang adalah benda tidak memiliki kecenderungan untuk berotasi. Syarat tersebut didasari oleh dinamika gerak rotasi. Dengan demikian, benda tegar berada dalam kesetimbangan. Jadi resultan torsi luar yang bekerja pada benda harus sama dengan nol. Hal tersebut adalah syarat kedua untuk kesetimbangan.

$$\sum \tau = 0 \quad (5-44)$$

Dengan demikian, suatu benda tegar dikatakan setimbang jika $\sum F = 0$ dan $\sum \tau = 0$.

Salah satu contoh kejadian kesetimbangan benda tegar, misalnya sebuah tangga yang bersandar pada dinding. Perhatikan **Gambar 5.23**. Sebuah batang AB bersandar pada dinding. Ujung bawah A berada pada lantai yang kasar dan bagian atas B bersandar pada dinding vertikal yang juga kasar. Jika panjang batang ℓ , berat batang w , lantai dan dinding saling tegak lurus, serta batang membentuk sudut terhadap alasnya maka Anda dapat menurunkan persamaan gaya dan momen gaya yang memengaruhi batang tersebut. Batang AB dalam keadaan setimbang sehingga syarat kesetimbangan akan memenuhi persamaan berikut ini.

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ N_B - f_A &= 0 \\ N_B &= f_A \end{aligned} \quad (5-45)$$



Gambar 5.23

Sebuah tangga bersandar pada dinding yang kasar dengan lantai yang kasar pula.

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ f_B + N_A - w &= 0 \\ \boxed{f_B + N_A} &= w \end{aligned} \quad (5-46)$$

Jika diasumsikan titik A menjadi poros, persamaan momen gayanya adalah $\sum \tau = 0$.

Lengan torsi $N_B \Rightarrow l \sin \theta$.

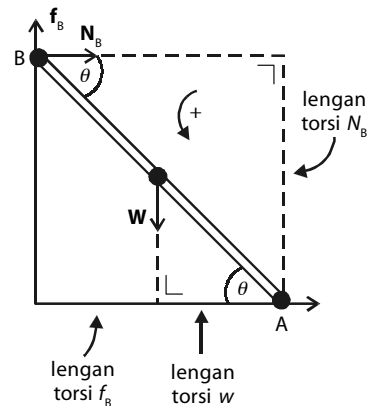
Lengan torsi $w \Rightarrow \frac{1}{2} l \cos \theta$.

Lengan torsi $f_B \Rightarrow l \cos \theta$.

Jadi,

$$\boxed{N_B l \sin \theta + f_B l \cos \theta = \frac{1}{2} w l \cos \theta} \quad (5-47)$$

Dari ketiga persamaan tersebut, Anda dapat mengetahui nilai dari gaya gesek antara lantai dan batang AB, gaya normal lantai, dan gaya normal dinding.



Gambar 5.24
Lengan torsi dari setiap gaya yang bekerja pada tangga.

Contoh 5.7

Sebuah batang AB yang panjangnya 4 meter bersandar pada dinding licin di titik B. Sudut yang dibentuk batang AB dari alasnya 53° , sedangkan berat batang w . Jika pada saat batang AB tepat akan tergelincir, tentukanlah koefisien gesek antara batang dan alasnya.

Jawab:

Diketahui: $AB = l = 4 \text{ m}$; $\theta = 53^\circ$; berat benda $= w$

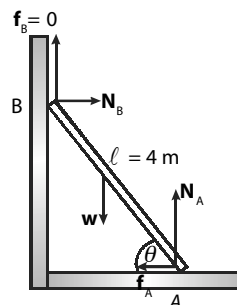
- $\sum F_x = 0 \rightarrow N_B - f_a = 0 \rightarrow N_B = f_a$
 $N_B = \mu_s N_A$ (tepat akan tergelincir)(1)
- $\sum F_y = 0 \Rightarrow N_A - w = 0 \rightarrow N_A = w$ (2)
- $\sum \tau = 0$, pusat di A

$$N_B \cos \theta - w \frac{1}{2} l \cos \theta = 0 \Rightarrow N_B \cos \theta = \frac{1}{2} w \cos \theta$$

$$N_B \cos 53^\circ \Rightarrow 0,6 N_B = \frac{1}{2} w (0,6) \Rightarrow N_B = \frac{3}{6} w \text{(3)}$$

Substitusikan Persamaan (2) dan (3) ke persamaan (1), diperoleh

$$\frac{1}{2} w = \mu_s w \Rightarrow \mu_s = \frac{1}{2}. \text{ Jadi, koefisien geseknya } = \frac{1}{2}.$$

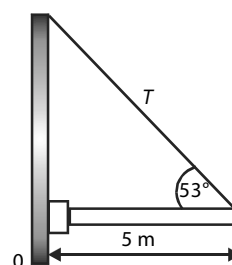


Ingatlah

Keadaan setimbang berarti
 $\sum \mathbf{F} = 0$ dan $\sum \tau = 0$.

Contoh 5.8

Sebuah batang horizontal dengan berat 300 N dan panjang 5 m diberi engsel pada sebuah dinding. Ujung yang satunya ditopang dengan seutas kawat dan membentuk sudut 53° terhadap horizontal (lihat gambar). Apabila seseorang yang beratnya 500 N berdiri pada jarak 2 m dari dinding, tentukan tegangan kawat dan gaya reaksi pada batang.



Kata Kunci

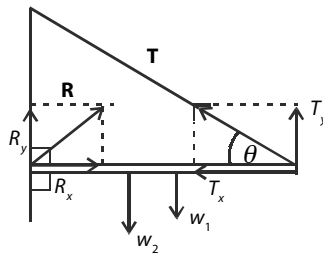
- momen gaya
- lengan torsi



Batang homogen adalah batang yang letak titik beratnya tepat di tengah-tengah.

Jawab:

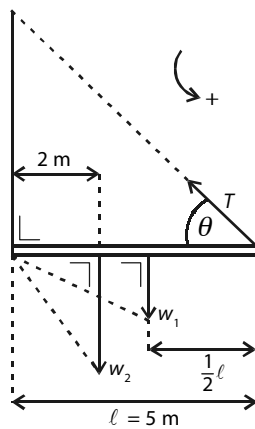
Gaya-gaya translasi:



$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 &\Rightarrow R_x - T_x = 0 \\ &\Rightarrow R \cos \theta - T \cos \theta = 0 \\ &\Rightarrow R \cos \theta - T \cos 53 = 0 \\ &\Rightarrow R \cos \theta = 0,6 T \quad \dots(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow R_y + T_y - w_1 - w_2 = 0 \\ &\Rightarrow R \sin \theta + T \sin 53 = 500 + 300 \\ &\Rightarrow R \sin \theta + 0,8 T = 800 \quad \dots(2) \end{aligned}$$

Gaya-gaya rotasi:



$$\begin{aligned} f_{\text{gesek engsel}} &= 0 \\ &\Rightarrow \text{lengan momen } T; l \sin \theta \Rightarrow \theta = 53 \\ &\quad \text{lengan momen } w_1; l \sin \theta \Rightarrow \theta = 90 \\ &\quad \text{lengan momen } w_2; l \sin \theta \Rightarrow \theta = 90 \\ \sum \tau &= 0 \\ &\quad l \sin (53) T - l \sin \theta w_1 - l \sin \theta w_2 = 0 \\ &\Rightarrow (5) (0,8 T) - (2,5) (1) (300) - (2) (1) (500) = 0 \\ &\Rightarrow 4T = 1.750 \\ &\Rightarrow T = 437,5 \text{ N} \dots(3) \end{aligned}$$



Pembahasan Soal

Jarak sumbu roda depan dan sumbu roda belakang sebuah truk yang bermassa 1.500 kg adalah 2 m. Pusat massa truk 1,5 m di belakang roda depan. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$. Beban yang diterima roda depan adalah

- 1.250 N
- 2.500 N
- 3.750 N
- 5.000 N
- 6.250 N

Soal UMPTN Tahun 1995

Pembahasan:

$$\sum \tau = 0$$

$$mg (\overline{AP}) - N_B (\overline{AB}) = 0$$

$$\begin{aligned} N_B &= \frac{mg(\overline{AP})}{\overline{AB}} \\ &= \frac{(1.500)(10)(0,5)}{2 \text{ m}} \\ &= 3.750 \text{ N} \end{aligned}$$

Jawaban: c

Substitusikan (3) ke (1) dan (2), diperoleh

$$R \cos \theta = 0,6 (437,5) = 262,5 \text{ N}$$

$$R \sin \theta + 0,8 (437,5) = 800$$

$$R \sin \theta = 450 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{R \sin \theta}{R \cos \theta} \\ &= \frac{450 \text{ N}}{262,5 \text{ N}} = 1,71 \\ \theta &= 59,74 \end{aligned}$$

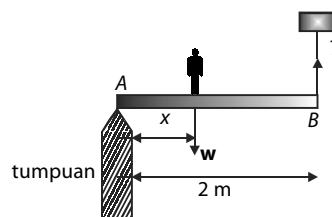
Jadi, gaya reaksi engsel adalah

$$\begin{aligned} R &= \frac{450 \text{ N}}{\sin 59,74} \\ &= \frac{450 \text{ N}}{0,86} \\ &= 523 \text{ N}. \end{aligned}$$

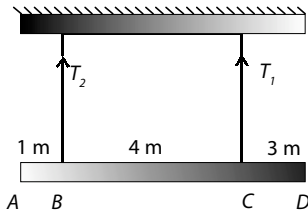
Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

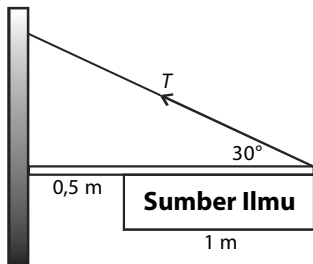
- Sebuah batang AB panjangnya 2 m dan beratnya diabaikan. Ujung B diikat dengan kawat yang batas tegangan maksimumnya 400 N. Seseorang yang beratnya 1.000 N berdiri di atas batang sejauh x, seperti gambar di samping. Berapakah jarak maksimum dari titik A sebelum kawat putus?



2. Sebatang balok yang panjangnya 8 m dan beratnya 200 N digantungkan seperti pada gambar. Jika jarak $AB = 1$ m, $BC = 4$ m, dan $CD = 3$ m, tentukanlah nilai perbandingan tegangan tali T_1 dan T_2 .

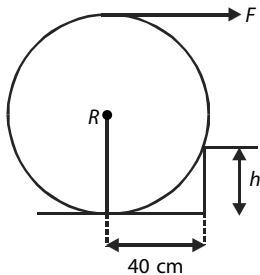


3. Sebuah papan iklan bermassa 32 kg menempel pada sebatang pipa yang beratnya diabaikan, dan panjangnya 1,5 m. Salah satu ujungnya diikat dengan tali, sedangkan ujung yang lain menempel pada dinding seperti tampak pada gambar.



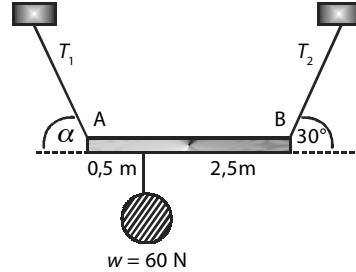
Tentukanlah tegangan yang dimiliki tali.

4. Sebuah roda bermassa 20 kg hendak dinaikkan ke sebuah undakan setinggi 20 cm.



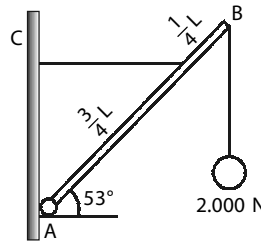
Hitunglah gaya minimum yang harus diberikan agar roda dapat naik, jika jari-jari roda 50 cm dan percepatan gravitasi 10 m/s^2 .

5. Sebuah batang AB panjangnya 3 m dan beratnya sebesar 120 N. Ujung-ujungnya diikat oleh tali seperti pada gambar.



Pada jarak $\frac{1}{2}$ meter dari A digantungkan sebuah beban yang beratnya 60 N. Tentukan masing-masing gaya tegang tali dan besar sudut α .

- 6.



Sebuah batang AB beratnya 400 N. Sebuah engsel ditempatkan di titik A, dan di titik C diikat pada tembok dengan seutas tali tak bermassa. Jika sistem seimbang, hitunglah:

- tegangan tali;
- besar gaya engsel ($\sin 53^\circ = 0,80$).

Rangkuman

1. Posisi sudut benda tegar yang bergerak rotasi dinyatakan dengan persamaan

$$\theta = \frac{s}{r}$$

2. Kecepatan sudut rata-rata benda tegar yang bergerak rotasi dinyatakan dengan persamaan

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Adapun kecepatan sudut sesaatnya:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$$

3. Percepatan sudut sesaat benda tegar yang berotasi dinyatakan dengan persamaan:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

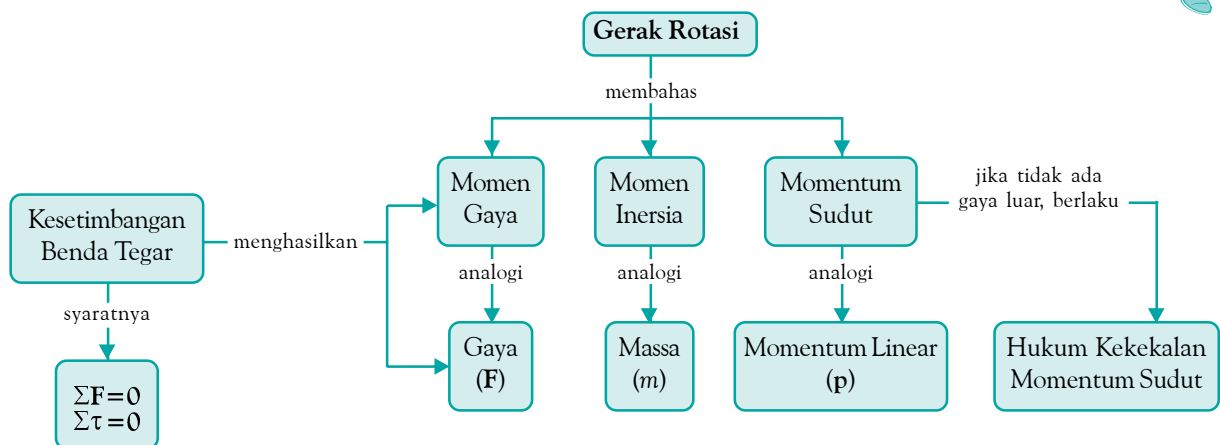
4. Momen gaya atau torsi merupakan besaran yang menyebabkan sebuah benda tegar cenderung untuk berotasi terhadap porosnya.

$$\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = rF \sin \theta = Fd$$

dengan $d = r \sin \theta =$ momen lengan.

- Pasangan dua buah gaya yang sejajar, sama besar, dan berlawanan arah disebut kopel. Besarnya sebuah kopel dinyatakan dengan momen kopel, yaitu $M = Fd$, dengan d = jarak antara dua gaya.
 $M_{\text{resultan}} = \sum M$
- Momen inersia adalah ukuran kecenderungan suatu benda untuk melakukan gerak rotasi. Momen inersia ditentukan oleh massa dan pola distribusi massa terhadap sumbu putar.
 $I = \sum m r^2$
 Untuk sebuah benda yang memiliki distribusi massa yang kontinu, berlaku persamaan
 $I = \int r^2 dm$
- Momen inersia beberapa bentuk benda dengan sumbu putar berada pada pusat massanya adalah sebagai berikut.
 Batang: $I = \frac{1}{12} ML^2$, L = panjang batang.
 Silinder tipis berongga: $I = MR^2$, R = jari-jari silinder.
 Silinder pejal: $I = \frac{1}{4} MR^2 + \frac{1}{12} ML^2$, R = jari-jari silinder.
 Bola pejal: $I = \frac{2}{5} MR^2$, R = jari-jari bola.
 Bola berongga: $I = \frac{2}{3} MR^2$, R = jari-jari bola.
- Percepatan tangensial yang dialami benda bermassa karena pengaruh gaya menurut Hukum II Newton adalah
 $F_t = m a_t$
 Persamaan momen gaya sebesar
 $\tau = I \alpha$
- Besar momentum sudut terhadap pusat lingkaran dari sebuah benda bertitik massa m yang bergerak melingkar memenuhi persamaan
 $L = r \times p$ atau $L = I \cdot \omega$
- Menggelinding adalah peristiwa bergeseknya sebuah benda secara translasi dan rotasi. Apabila tidak terjadi selip, kedua gerak benda berlangsung secara bersamaan dan jarak yang ditempuh dalam satu putaran sama dengan keliling benda. Energi kinetik gerak menggelinding adalah
 $E_k = E_{k \text{ translasi}} + E_{k \text{ rotasi}} = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$
- Suatu benda tegar berada dalam keadaan setimbang jika resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol.
 $\sum F = 0 \Rightarrow \sum F_x = 0$ dan $\sum F_y = 0$
 $\sum \tau = 0$

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, tentu Anda dapat mengetahui konsep momen gaya dan momen inersia serta pengaruhnya terhadap gerak rotasi. Selain itu, Anda juga dapat mengetahui konsep momentum sudut, gerak rotasi, dan gerak translasi. Dari keseluruhan materi, bagian manakah yang sulit dipahami? Coba diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Membuka mur dengan kunci bertangan panjang lebih mudah dibanding dengan kunci bertangan pendek. Pengetahuan ini diperoleh dengan mempelajari bab ini. Nah, coba Anda sebutkan manfaat lain mempelajari bab ini.

Tes Kompetensi Bab 5

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

1. Sebuah benda yang berbentuk silinder pejal berjari-jari R dan bermassa m . Kemudian, benda tersebut diputar pada sumbunya dengan periode T . Besar energi kinetik rotasinya adalah

a. $\pi^2 MR^2 T^2$ d. $\frac{\pi^2 MR^2}{T^2}$
 b. $\frac{\pi^2 MR^2}{24T^2}$ e. $\frac{\pi^2 MT^2}{R^2}$
 c. $\frac{\pi^2 MR^2}{2T^2}$

2. Sebuah cincin dengan massa 0,003 kg dan jari-jari 0,5 cm menggelinding di atas permukaan bidang miring yang membentuk sudut 30° terhadap bidang horizontal. Cincin tersebut dilepaskan dari keadaan diam pada ketinggian 5 m secara tegak lurus dari bidang horizontal. Kecepatan linear cincin tersebut sewaktu mencapai kaki bidang miring adalah

a. 10 m/s d. 5 m/s
 b. $5\sqrt{3}$ m/s e. 2,5 m/s
 c. $5\sqrt{2}$ m/s

3. Sebuah bola pejal bertranslasi dan berotasi dengan kecepatan linear dan kecepatan sudut masing-masing v dan ω . Energi kinetik total bola pejal tersebut adalah

a. $\frac{1}{2} mv^2$ d. $\frac{9}{10} mv^2$
 b. $\frac{2}{5} mv^2$ e. $\frac{5}{2} mv^2$
 c. $\frac{7}{10} mv^2$

4. Sebuah batang yang panjangnya l dan massanya M dapat berputar bebas pada salah satu ujungnya. Jika batang tersebut dilepas dari keadaan diam dengan posisi mendatar, besar percepatan sudut batang adalah

a. $\frac{3g}{4}$ d. $\frac{3g}{\pi l}$
 b. $\frac{l}{3g}$ e. $\frac{3g}{2l}$
 c. $\frac{3g}{l^2}$

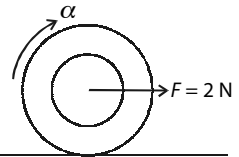
5. Sebuah silinder pejal yang massanya m dan jari-jarinya R dilepas tanpa kecepatan awal dari puncak bidang miring yang kasar, dengan sudut kemiringan θ terhadap bidang horizontal. Jika percepatan gravitasi bumi adalah g , silinder tersebut akan

- a. meluncur dengan percepatan $g \sin \theta$
 b. meluncur dengan percepatan $\frac{3}{2} g \sin \theta$
 c. menggelinding dengan percepatan $g \sin \theta$
 d. menggelinding dengan percepatan $\frac{1}{2} g \sin \theta$
 e. menggelinding dengan percepatan $\frac{2}{3} g \sin \theta$

6. Dua benda A dan B masing-masing massanya 5 kg, dihubungkan oleh batang yang panjangnya 1 m (massa batang diabaikan). Jika pusat batang digunakan sebagai sumbu putar, momen inersia pada pusat batang tersebut adalah

a. 2,5 kgm² d. 4,0 kgm²
 b. 3,0 kgm² e. 5,0 kgm²
 c. 3,5 kgm²

7. Sebuah roda dapat menggelinding tanpa selip pada sebuah bidang datar yang kasar. Massa roda 0,5 kg dan jari-jarinya 20 cm. Roda ditarik dengan gaya $F = 2$ N sehingga bergerak dengan percepatan sudut konstan seperti tampak pada gambar. Besar momen gaya yang bekerja pada roda adalah

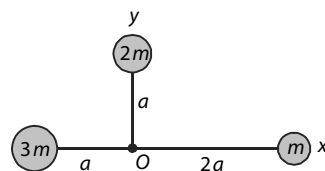


- a. nol d. 0,5 Nm
 b. 0,2 Nm e. 0,8 Nm
 c. 0,4 Nm

8. Sebuah roda berbentuk silinder berongga memiliki jari-jari 20 cm dan massa 5 kg. Pada roda bekerja momen gaya sebesar 16 Nm. Besar percepatan sudut roda tersebut adalah

a. 0,6 rad/s² d. 24 rad/s²
 b. 6 rad/s² e. 80 rad/s²
 c. 12 rad/s²

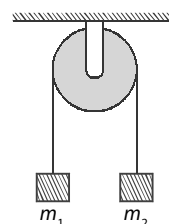
9. Perhatikan gambar berikut.



Tiga buah partikel dengan massa m , $2m$, dan $3m$ dipasang pada ujung kerangka yang massanya diabaikan. Sistem terletak pada bidang xy . Jika sistem diputar terhadap sumbu- y , momen inersia sistem di titik O adalah

- a. $7 ma$ d. $6 ma^2$
 b. $5 ma$ e. $7 ma^2$
 c. $5 ma^2$

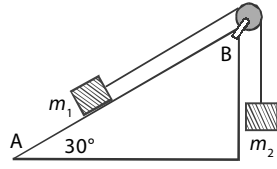
10. Perhatikan gambar berikut.



Dua buah benda yang masing-masing memiliki massa $m_1 = 4 \text{ kg}$ dan $m_2 = 2 \text{ kg}$ dihubungkan dengan katrol pejal bermassa 4 kg . Jika percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, percepatan yang dialami m_1 dan m_2 adalah

- 10 m/s^2
- 5 m/s^2
- $3,33 \text{ m/s}^2$
- $2,5 \text{ m/s}^2$
- 2 m/s^2

11. Dua benda, masing-masing bermassa $m_1 = 4 \text{ kg}$ dan $m_2 = 4 \text{ kg}$ dihubungkan dengan katrol pejal yang massanya 4 kg seperti tampak pada gambar. Jika permukaan bidang miring AB licin dan katrol tidak selip, besar percepatan benda m_1 , dan m_2 adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)



- $1,0 \text{ m/s}^2$
- $1,5 \text{ m/s}^2$
- $2,0 \text{ m/s}^2$
- $2,2 \text{ m/s}^2$
- $2,5 \text{ m/s}^2$

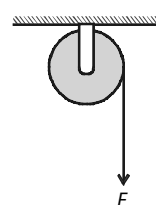
12. Jika dua roda masing-masing berjari-jari R_1 dan R_2 diputar dengan tali di titik singgungnya, kecepatan sudut (ω), periode (T), frekuensi (f), dan kecepatan linear (v) memiliki hubungan dengan jari-jari R sebagai berikut, kecuali

- $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}$
- $\frac{T_1}{T_2} = \frac{R_2}{R_1}$
- $\frac{f_1}{f_2} = \frac{R_2}{R_1}$
- $\frac{v_1}{v_2} = \frac{R_1}{R_2}$
- $\frac{\omega_1}{R_2} = \frac{\omega_2}{R_2}$

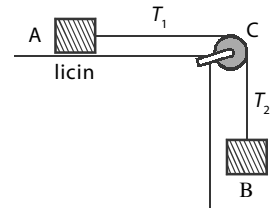
B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

- Sebuah roda bermassa 500 g dengan momen inersia $0,015 \text{ kg m}^2$ mula-mula berputar dengan besar kecepatan 30 putaran/sekon. Setelah roda menempuh 163 putaran, roda tersebut berhenti. Berapakah besar torsi yang menghentikan putaran roda tersebut?
- Sebuah roda yang massanya 180 kg dan jari-jarinya $1,2 \text{ m}$ melakukan 5 putaran/s. Berapakah energi kinetik rotasi roda tersebut?
- Sebuah cincin tebal R luarnya 50 cm dan R dalamnya 40 cm , sedangkan massanya 5 kg . Jika cincin tersebut berotasi pada sumbunya, berapakah momen inersianya?
- Suatu titik materi melakukan gerak rotasi dengan percepatan sudut $\alpha = 6t \text{ rad/s}^2$. Jika jari-jari lingkarannya 4 cm , hitunglah:
 - percepatan tangensial pada saat $t = 2 \text{ s}$;
 - kecepatan linear pada saat $t = 2 \text{ s}$;
 - panjang lintasan yang ditempuh pada saat $t = 2 \text{ s}$.

5. Sebuah katrol yang berupa roda pejal homogen, digantung pada sumbunya. Pada tepi roda dililitkan tali, kemudian ujung tali itu ditarik dengan besar gaya $F = 6 \text{ N}$ vertikal ke bawah, seperti pada gambar.



13. Pada gambar di samping, massa balok A, massa beban B, dan massa roda katrol berongga C masing-masing adalah 2 kg , 7 kg , dan 1 kg . Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tegangan tali T_1 adalah



- 30 N
 - 20 N
 - 14 N
 - 8 N
 - 7 N
14. Sebuah cakram dengan jari-jari R berputar beraturan melalui sumbu horizontal. Titik P terletak pada tepi cakram dan Q pada pertengahan antara pusat dan titik P . Pernyataan berikut yang tidak benar adalah
- kecepatan sudutnya sama
 - percepatan sudut keduanya sama dengan nol
 - kecepatan linear P dua kali kecepatan linear Q
 - percepatan tangensial keduanya sama dengan nol
 - kecepatan linear keduanya sama

15. Sebuah bola pejal menggelinding tanpa selip pada bidang miring dengan sudut kemiringan (θ). Percepatan linear bola tersebut jika diketahui percepatan gravitasinya g adalah

- $\frac{2}{3}g \sin \theta$
- $\frac{1}{4}g \sin \theta$
- $\frac{1}{3}g \sin \theta$
- $\frac{5}{7}g \sin \theta$
- $g \sin \theta$

Jika massa katrol 5 kg dan jari-jarinya 12 cm , hitunglah:

- percepatan tali;
 - momentum sudutnya pada saat $t = 0,5$ sekon;
 - panjang tali yang tertarik selama 2 s .
- Sebuah silinder berlubang bermassa 6 kg dan jari-jarinya 45 cm berputar dengan kecepatan 200 rpm (*rotation per minute*). Tentukanlah momen inersia dan energi kinetik rotasi roda tersebut?
 - Sebuah roda gila dengan momen inersia $3,8 \text{ kgm}^2$ oleh suatu torsi dipercepat hingga dalam 6 putaran saja. Kecepatan sudutnya berubah dari 2 putaran/s menjadi 5 putaran/s. Berapakah besar torsi roda tersebut?
 - Tentukanlah torsi yang harus diberikan agar dalam waktu 10 detik dapat memberi kecepatan sudut sebesar 300 rpm pada roda gila 50 kg dengan jari-jari 40 cm . ($I = MR^2$)
 - Sebuah roda bermassa 4 kg dengan jari-jari 20 cm berputar dengan kecepatan 360 rpm . Pada roda tersebut bekerja gaya gesek yang menyebabkan torsi sebesar $0,12 \text{ Nm}$. Berapa lama roda akan berhenti? ($I = MR^2$)
 - Sebuah roda bermassa 25 kg dengan jari-jari 22 cm berputar dengan kecepatan 6 putaran/detik. Berapakah energi kinetik rotasi roda tersebut?

Bab 6



Sumber: www.cherz.com

Pesawat dapat terbang karena mengalami gaya angkat yang bebas pada sayapnya.

Fluida

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep dan prinsip mekanika klasik sistem kontinu dalam menyelesaikan masalah.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

menganalisis hukum-hukum yang berhubungan dengan fluida statis dan dinamis serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

Pernahkah Anda bertanya, mengapa pesawat dapat terbang? Pesawat dapat terbang karena mengalami gaya angkat yang besar. Gaya angkat pada pesawat disebabkan oleh konstruksi sayap pesawat yang menyebabkan adanya perbedaan kecepatan alir dari fluida udara di atas sayap dengan di bawah sayap. Prinsip tersebut merupakan aplikasi dari persamaan Bernoulli.

Dalam bab ini, Anda akan belajar tentang fluida statis dan fluida dinamis. Konsep tentang fluida banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari.

- A. Fluida Statis**
- B. Viskositas Fluida**
- C. Fluida Dinamis**

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Fluida, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Pernahkah Anda datang ke tempat cuci mobil? Hukum apakah yang diterapkan dalam alat pengangkat mobil di sana? Bagaimana cara kerja alat pengangkat mobil tersebut?
2. Percayakah Anda jika ada teman Anda yang menyatakan bahwa dia bisa menentukan keaslian logam mulia emas hanya dengan mencelupkannya ke dalam air?
3. Mengapa nyamuk dapat berjalan di atas permukaan air?
4. Jelaskan dengan bahasam Anda sendiri cara kerja dari venturimeter dan pipa pitot.

A. Fluida Statis

Fluida merupakan zat yang dapat mengalir. Contoh fluida di antaranya air, minyak, susu, bensin, solar, uap, gas, dan asap. Fluida terdiri atas dua macam, yaitu fluida yang dapat dimampatkan atau *kompresibel* dan yang tidak dapat dimampatkan atau *inkompresibel*.

1. Tekanan



Gambar 6.1
Tekanan yang dilakukan seorang anak terhadap meja.

Coba Anda tekan sebuah pulpen ke dalam tanah, kemudian bandingkan tingkat kesukarannya dengan jarum yang ditekan ke dalam tanah. Pulpen akan lebih sukar masuk ke dalam tanah daripada jarum yang dimasukkan ke dalam tanah. Mengapa demikian?

Tingkat kesulitan seseorang dalam menekan suatu benda, berhubungan dengan luas daerah yang ditekan. Semakin luas daerah yang ditekan, semakin kecil tekanan yang dihasilkan. *Tekanan merupakan besar gaya yang bekerja pada suatu permukaan dibagi dengan luas permukaan tersebut.* Jika gaya F bekerja tegak lurus pada permukaan benda seluas A , besarnya tekanan secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$p = \frac{F}{A} \quad (6-1)$$

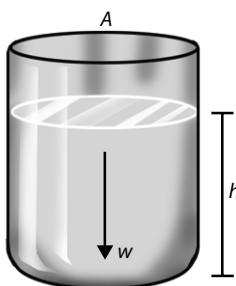
Keterangan:

p = tekanan ($\text{N/m}^2 = \text{pascal}$)

F = gaya (N)

A = luas bidang tekan (m^2)

2. Tekanan Hidrostatik



Gambar 6.2
Tekanan hidrostatik pada dasar tabung.

Perhatikan **Gambar 6.2**. Pada gambar tersebut terlihat sebuah tabung berisi zat cair bermassa jenis ρ , kedalaman h , dan luas penampang A . Zat cair yang berada di dalam bejana memiliki gaya berat w yang menekan dasar tabung. Semakin tinggi permukaan zat cair, semakin besar tekanan yang dihasilkan pada dasar tabung. Secara matematis, hubungan antara besar tekanan yang dihasilkan dan ketinggian zat cair dituliskan sebagai berikut.

$$p = \frac{w}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{(\rho V)g}{A} = \frac{\rho ghA}{A} = \rho gh \quad (6-2)$$

Berdasarkan **Persamaan (6-2)**, dapat disimpulkan bahwa persamaan tekanan hidrostatik adalah

$$p = \rho gh \quad (6-3)$$

Keterangan:

p = tekanan hidrostatik (N/m^2) atau Pa

ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)

h = kedalaman zat cair (m)
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Dari persamaan tersebut, dapat dipelajari bahwa tekanan hidrostatik sangat dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan kedalaman zat cair.

Perhatikan **Gambar 6.3**. Pada kasus seperti ini (untuk zat cair yang sejenis), tekanan zat cair tidak bergantung pada luas penampang dan bentuk bejana, tetapi bergantung pada kedalaman zat cair. Jadi, tekanan hidrostatik pada titik A, B, dan C adalah sama besar. Oleh karena itu, berdasarkan **Persamaan (6-2)** akan didapat

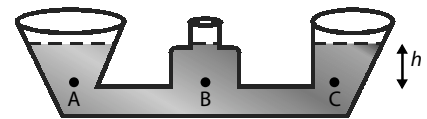
$$p_A = p_B = p_C = \rho gh \quad (6-4)$$

Perhatikan **Gambar 6.4**. Mula-mula bejana pada gambar tersebut diisi zat cair pertama yang bermassa jenis ρ_1 . Kemudian, ke dalam mulut bejana sebelah kanan dimasukkan zat cair kedua yang bermassa jenis ρ_2 . Titik B berada pada perbatasan kedua zat cair tersebut dan ditekan oleh zat cair kedua setinggi h_2 . Titik A berada pada zat cair pertama dan ditekan oleh zat cair pertama setinggi h_1 . Titik A dan B berada pada satu garis. Sesuai dengan Hukum Hidrostatika, kedua titik tersebut memiliki tekanan yang sama. Akan tetapi, tekanan pada titik C dan D tidak sama karena jenis zat cair di kedua titik tersebut berbeda.

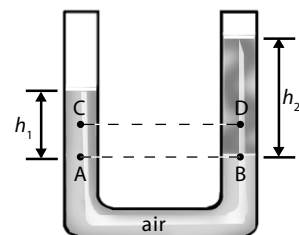
$$p_A = p_B$$

$$\rho_1 h_1 g = \rho_2 h_2 g \quad (6-5)$$

Untuk lebih memahami tentang tekanan hidrostatika, lakukanlah Aktivitas Fisika berikut ini.



Gambar 6.3
 Tekanan hidrostatik pada titik A, B, dan C adalah sama.



Gambar 6.4
 Pipa U diisi dua zat cair berbeda, tekanan di A sama dengan tekanan di B.



Aktivitas Fisika 6.1

Tekanan Hidrostatik

Tujuan Percobaan

Memahami tekanan hidrostatika

Alat-Alat Percobaan

1. Sebuah ember
2. dua buah gelas plastik bening

Langkah-Langkah Percobaan

1. Isilah ember dengan air.
2. Jawablah pertanyaan berikut sebelum melakukan percobaan.
 - a. Apa yang akan terjadi jika sebuah gelas plastik dicelupkan perlahan ke dalam air dalam keadaan terbalik? Jelaskan apa yang akan terjadi, berikut alasannya.
 - b. Lakukan hal yang sama, namun dengan gelas yang diberi lubang pada dasar gelasnyanya. Jelaskan apa yang akan terjadi, berikut alasannya.
3. Buktikanlah jawaban Anda dengan melakukan percobaan.
4. Buatlah hukum tentang tekanan menurut versi Anda, berdasarkan jawaban dan hasil percobaan yang Anda peroleh.
5. Bandingkanlah dengan hukum hidrostatika yang telah Anda pelajari.
6. Buatlah kesimpulan dari percobaan tersebut.

Contoh 6.1

Sebuah tempat air berbentuk kubus memiliki panjang rusuk 60 cm diisi 180 liter air (massa jenis air = 10^3 kg/m^3). Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukanlah:

- a. tekanan hidrostatik pada dasar kubus;
- b. gaya hidrostatik pada dasar kubus; dan
- c. gaya hidrostatik pada titik B yang berjarak 0,25 m dari permukaan air.

Jawab:

Diketahui:

$$V = 180 \text{ liter} = 0,18 \text{ m}^3; \quad \rho = 10^3 \text{ kg/m}^3;$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2; \quad A = 0,36 \text{ m}^2;$$

$$s = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}.$$

$$h_A = \frac{V}{A} = \frac{0,18 \text{ m}^3}{0,36 \text{ m}^2} = 0,5 \text{ m}$$

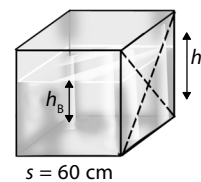
$$\begin{aligned} \text{a. } p_A &= \rho g h_A \\ &= 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 10 \text{ m/s}^2 \times 0,5 \text{ m} = 5.000 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } F_A &= p_A A \\ &= 5.000 \text{ Pa} \times 0,36 \text{ m}^2 = 1.800 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. } p_B &= \rho g h_B \\ &= 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 10 \text{ m/s}^2 \times 0,25 \text{ m} = 2.500 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$F_B = p_B A = 2.500 \text{ Pa} \times 0,25 \text{ m} = 900 \text{ N}$$

Jadi, besar tekanan hidrostatis pada dasar kubus adalah $p_A = 5.000 \text{ Pa}$, gaya hidrostatis pada dasar kubus adalah $F_A = 1.800 \text{ N}$, dan gaya hidrostatis pada titik B adalah $F_B = 900 \text{ N}$.



Contoh 6.2

Pada gambar berikut, sebuah pipa berbentuk huruf U diisi dengan air, $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$. Kaki pipa sebelah kiri diisi bensin dengan $\rho_{\text{bensin}} = 0,7 \text{ g/cm}^3$ setinggi 4 cm. Sebelah kanan diisi minyak tanah dengan $\rho_{\text{minyak}} = 0,8 \text{ g/cm}^3$ setinggi 8 cm. Hitunglah perbedaan tinggi air antara pipa kanan dan pipa kiri.

Jawab:

Diketahui:

$$\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{bensin}} = 0,7 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{minyak}} = 0,8 \text{ g/cm}^3$$

$$h_2 = 4 \text{ cm}$$

$$h_3 = 8 \text{ cm}$$

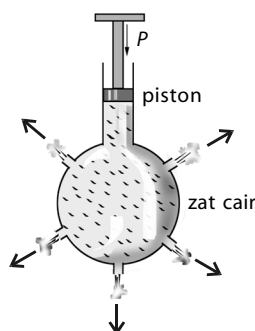
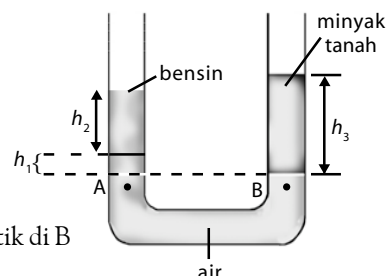
Tekanan hidrostatis di A = tekanan hidrostatis di B

$$(\rho_{\text{air}} h_1) + (\rho_{\text{bensin}} h_2) = \rho_{\text{minyak}} h_3$$

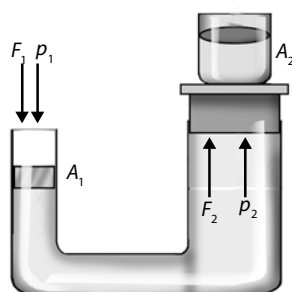
$$(1 \times h_1) + (0,7 \times 4) = 0,8 \times 8$$

$$h_1 = \frac{6,4 - 2,8}{1} = 1,6 \text{ cm}$$

Jadi, perbedaan tinggi air pada kedua pipa adalah 1,6 cm.



Gambar 6.5
Tabung Pascal



Gambar 6.6
Prinsip kerja dongkrak hidrolik.

3. Hukum Pascal

Perangkat kerja Hukum Pascal diperlihatkan pada **Gambar 6.5**. Perangkat tersebut terdiri atas tabung yang diberi lubang dengan diameter yang sama. Piston bekerja sebagai pengisap dan tangkai piston berfungsi sebagai pendorong. Pada tabung tersebut diisi penuh dengan zat cair, kemudian piston diberi gaya tekan melalui tangkai piston. Ketika tekanan diberikan, zat cair akan memancar keluar melalui lubang dengan kecepatan sama.

Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa *tekanan yang diberikan pada suatu zat cair dalam ruang tertutup diteruskan sama besar ke segala arah*. Pernyataan tersebut dikenal sebagai *Hukum Pascal*.

Pada **Gambar 6.6**, diperlihatkan proses kerja dongkrak hidrolik yang bekerja berdasarkan Hukum Pascal. Dongkrak hidrolik terdiri atas bejana dengan dua kaki yang masing-masing diberi pengisap. Kedua pengisap ini memiliki dua penampang berbeda, yaitu A_1 dan A_2 , di mana $A_1 < A_2$.

Jika pengisap 1 ditekan dengan gaya F_1 , zat cair akan meneruskan tekanan tersebut ke segala arah. Besarnya tekanan pada pengisap 1 dinyatakan dengan persamaan

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1} \quad (6-6)$$

Jika di atas pengisap 2 diletakkan beban, gaya angkat ke atas pada pengisap 2 adalah F_2 , yang dinyatakan dengan persamaan

$$p_2 = \frac{F_2}{A_2} \quad (6-7)$$

Menurut Hukum Pascal, tekanan yang diteruskan ke segala arah adalah sama besar sehingga

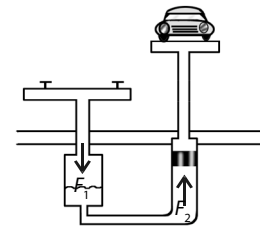
$$p_1 = p_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (6-8)$$

Jika bentuk penampang tabung berupa lingkaran dengan jari-jari r_1 dan r_2 , akan diperoleh persamaan

$$\frac{F_1}{r_1^2} = \frac{F_2}{r_2^2} \text{ atau } \frac{F_1}{d_1^2} = \frac{F_2}{d_2^2} \quad (6-9)$$

Diameter penampang pada **Persamaan (6-9)** adalah d_1 dan d_2 . Jadi, dengan gaya yang kecil, Anda dapat mengangkat beban yang besar. Prinsip Pascal tersebut sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti dongkrak mobil dan pompa hidrolik.



Gambar 6.7
Pengangkat hidrolik menerapkan Konsep Hukum Pascal.



Tokoh

Douglas Dean Osheroff
(1945 – sekarang)



Sumber: *Republika*, 19 November 2005

Douglas Dean Osheroff dilahirkan pada tahun 1945. Setelah menyelesaikan pendidikan sarjananya di **California Institute Of Technology**, ia pindah ke **Cornell University** untuk mengambil gelar doktor. Di sana, ia bertemu dengan **David M. Lee** dan **Robert C. Richardson**. Bersama dua koleganya tersebut, ia melakukan penelitian selama bertahun-tahun sampai menemukan satu fenomena yang menghebohkan dunia ilmiah, yaitu **superfluiditas**. Superfluiditas tersebut terjadi ketika helium-3 didinginkan mendekati suhu nol mutlak ($-273,15^\circ\text{C}$). Pada suhu tersebut, helium-3 tidak lagi memiliki viskositas dan friksi sehingga dapat meluap dari sebuah cangkir datar melalui pori-pori yang teramat kecil. Fenomena lainnya adalah helium-3 ini dapat melawan gaya gravitasi Bumi. Atas penemuannya ini, Osheroff bersama kedua rekannya mendapat hadiah Nobel pada tahun 1996.

Contoh 6.3

Sebuah pompa hidrolik memiliki pipa kecil berjari-jari 2 cm, sedangkan pipa besar berjari-jari 20 cm. Agar beban yang beratnya 4.000 N naik setinggi 5 cm, tentukanlah:

- gaya yang dikerjakan pada pipa kecil;
- jarak yang ditempuh pengisap pipa kecil.

Jawab:

Diketahui:

$$r_1 = 2 \text{ cm};$$

$$r_2 = 20 \text{ cm};$$

$$F_2 = 4.000 \text{ N};$$

$$h_2 = 5 \text{ cm}.$$

$$\text{a. } \frac{F_1}{r_1^2} = \frac{F_2}{r_2^2} \rightarrow \frac{F_1}{(4)^2} = \frac{4.000}{(20)^2}$$

$$400 F_1 = 64.000$$

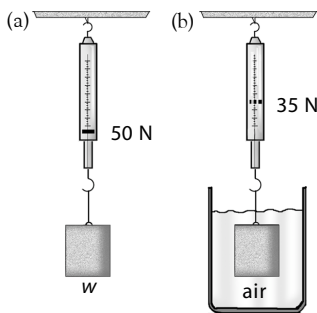
$$F_1 = 160 \text{ N}$$

$$\text{b. } W_1 = W_2 \rightarrow F_1 \times h_1 = F_2 \times h_2$$

$$160 \times h_1 = 4.000 \times 4$$

$$h_1 = 100 \text{ cm}$$

Jadi, dibutuhkan gaya sebesar 400 N dan jarak pengisap 100 cm pada pipa kecil.



Gambar 6.8
Berkurangnya berat benda di dalam zat cair disebabkan oleh gaya ke atas yang dikerjakan oleh zat cair.

4. Hukum Archimedes

Sebuah balok ditimbang dengan neraca pegas seperti pada **Gambar 6.8a**. Misalkan balok tersebut memiliki berat 50 N, kemudian balok dimasukkan ke dalam bejana yang berisi air (**Gambar 6.8b**). Berat balok akan berkurang, misalnya menjadi 35 N. Menurut Anda, apakah yang menyebabkan berkurangnya berat balok tersebut? Berkurangnya berat balok ketika dimasukkan ke dalam air disebabkan oleh adanya gaya tekan ke atas dari air. Gaya ke atas dari air kali pertama diketahui oleh **Archimedes** sehingga gaya tersebut dinamakan gaya Archimedes.

Hukum Archimedes berbunyi, *benda yang tercelup ke dalam fluida, baik sebagian ataupun seluruhnya, akan mengalami gaya ke atas sebesar berat zat cair yang dipindahkan oleh benda tersebut*. Besarnya gaya Archimedes tersebut dinyatakan dengan persamaan

$$F_A = m_c g = \rho_c V_c g \tag{6-10}$$

Keterangan:

F_A = gaya Archimedes (N)

ρ_c = massa jenis fluida (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

V_c = volume fluida yang dipindahkan/volume benda yang tercelup (m^3)

Contoh 6.4

Sebuah batu yang volumenya 2.000 cm^3 berada di dalam air. Jika massa jenis air 1 g/cm^3 , tentukan gaya tekan ke atas pada batu.

Jawab:

Diketahui:

$$\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3 = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

Volume batu = volume zat cair yang dipindahkan

$$V_B = 2.000 \text{ cm}^3 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

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

Gaya ke atas = gaya Archimedes

$$F_A = \rho_{\text{air}} g V_B = (1.000 \text{ kg/m}^3) (10 \text{ m/s}^2) (2 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 20 \text{ N}.$$

Adanya gaya ke atas (gaya Archimedes) pada sebuah benda yang masuk ke dalam zat cair, menyebabkan benda dapat mengapung, melayang, atau tenggelam.

a. Benda Mengapung

Jika hanya sebagian benda yang tercelup ke dalam zat cair, benda disebut mengapung. Dalam keadaan ini, berat benda < gaya ke atas dari zat cair. Secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} w &< F_A \\ m_B g &< \rho_c g V_c \\ \rho_B V_B g &< \rho_c V_c g \\ \rho_B V_B &< \rho_c V_c \end{aligned} \tag{6-11}$$

Keterangan:

V_c = volume benda yang tercelup (m^3)

V_B = volume benda seluruhnya (m^3)

Persamaan (6-11) menunjukkan bahwa supaya benda mengapung, massa jenis benda harus lebih kecil daripada massa jenis zat cair ($\rho_B < \rho_c$).



Gambar 6.9
Perahu dapat terapung di atas air karena massa jenisnya lebih kecil dari massa jenis air.

b. Benda Melayang

Jika seluruh bagian benda berada di dalam zat cair, namun benda tersebut tidak sampai menyentuh dasar tabung maka benda dikatakan melayang. Dalam keadaan seimbang, berat benda sama dengan gaya tekan ke atas oleh zat cair. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} w &= F_A \\ m_B g &= \rho_C g V_C \\ \rho_B V_B g &= \rho_C V_C g \\ \rho_C V_C &= \rho_B V_B \end{aligned} \quad (6-12)$$

Seperti pada Gambar 6.10, seluruh benda masuk ke dalam zat cair sehingga volume benda sama dengan volume zat cair yang dipindahkan. Oleh karena itu, untuk kasus melayang, massa jenis benda dan massa jenis zat cair adalah sama.

c. Benda Tenggelam

Benda tenggelam terjadi karena gaya berat benda yang lebih besar daripada gaya tekan ke atas. Benda yang tenggelam akan menyentuh dasar tabung, seperti yang terlihat pada Gambar 6.11. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} w &> F_A \\ m_B g &> F_A \\ \rho_B g V_B &> \rho_C g V_C \end{aligned}$$

Oleh karena volume benda yang tenggelam sama dengan volume zat cair yang dipindahkan, yaitu $V_B = V_C$, dapat dituliskan bahwa

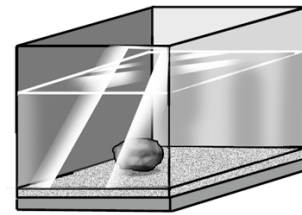
$$\rho_B > \rho_C \quad (6-13)$$

Jadi, jika massa jenis benda lebih besar daripada massa jenis zat cair, benda akan tenggelam.



Gambar 6.10

Penyelam dan ikan-ikan dapat melayang di air. Tahukah Anda, mengapa ikan dan penyelam dapat melayang dalam air?



Gambar 6.11

Batu tenggelam dalam air karena massa jenis batu lebih besar daripada massa jenis air.

Contoh 6.5

Sebuah benda jika berada di udara beratnya 60 N. Jika ditimbang di dalam air, berat benda tersebut seolah-olah menjadi 36 N. Jika massa jenis air = 1 g/cm^3 , tentukanlah massa jenis benda tersebut ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

Jawab:

Berat benda di udara = $w_{\text{udara}} = 60 \text{ N}$; Berat benda di air = $w_{\text{air}} = 36 \text{ N}$.

$$\rho_{\text{air}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Gaya tekan ke atas yang bekerja pada benda adalah

$$F_A = w_{\text{udara}} - w_{\text{air}} = 60 \text{ N} - 36 \text{ N} = 24 \text{ N}$$

Gaya Archimedes:

$$F_A = \rho_C V_C g \rightarrow V_C = \frac{F_A}{\rho_C g} = \frac{24 \text{ N}}{10^3 \text{ kg/m}^3 \times 10 \text{ m/s}^2} = 24 \times 10^{-4} \text{ m}^3 = 2.400 \text{ cm}^3$$

Massa benda:

$$m_B = \frac{w_{\text{udara}}}{g} = \frac{60 \text{ N}}{10 \text{ m/s}^2} = 6 \text{ kg} = 6.000 \text{ g}$$

sehingga massa jenis benda adalah

$$\rho_B = \frac{m_B}{V_B} = \frac{6.000 \text{ g}}{2.400 \text{ cm}^3} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

Jadi, massa jenis benda tersebut adalah $2,5 \text{ g/cm}^3$.



$\rho_{\text{benda}} < \rho_{\text{fluida}} \Rightarrow$ mengapung
 $\rho_{\text{benda}} = \rho_{\text{fluida}} \Rightarrow$ melayang
 $\rho_{\text{benda}} > \rho_{\text{fluida}} \Rightarrow$ tenggelam

5. Penerapan Hukum Archimedes

Penerapan Hukum Archimedes dapat Anda jumpai dalam kehidupan sehari-hari. Contohnya rakit, perahu, kapal laut, dan balon udara. Pada dasarnya, semua jenis kendaraan laut menggunakan prinsip hukum Archimedes. Badan kapal dibuat berongga agar dapat memindahkan volume air laut lebih besar sehingga massa jenis kapal menjadi lebih kecil dan gaya angkat oleh air laut semakin besar. Dari keterangan ini, dapat diketahui penyebab kapal laut yang memiliki massa sangat besar dapat terapung pada permukaan air.

Prinsip Hukum Archimedes juga digunakan pada penerbangan balon udara. Balon udara dapat terangkat jika massa jenis dari keseluruhan balon udara tersebut lebih kecil daripada massa jenis udara. Volume gas dalam balon udara harus diperbesar atau menggunakan gas yang massa jenisnya lebih kecil daripada massa jenis udara luar agar balon tersebut dapat terangkat.

Ketinggian balon ketika terbang dapat diatur dengan menambahkan gas ke dalam balon udara. Massa beban yang dapat diangkat oleh balon udara adalah

$$m = V_B(\rho_u - \rho_g) \quad (6-14)$$

Keterangan:

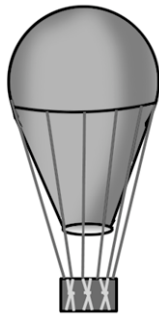
m = massa benda (kg)

V_B = volume benda (m^3)

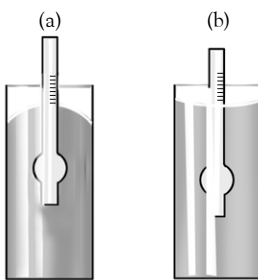
ρ_u = massa jenis udara (kg/m^3)

ρ_g = massa jenis gas (kg/m^3)

Hukum Archimedes juga dimanfaatkan pada hidrometer, yaitu alat untuk mengukur massa jenis zat cair. **Gambar 6.13** menunjukkan sebuah hidrometer yang terapung dalam zat cair. Volume hidrometer sama dengan volume zat cair yang dipindahkan oleh bagian hidrometer yang tercelup. Melalui persamaan hukum Archimedes dapat diukur massa jenis zat cair tersebut dengan langsung melihat skala pada hidrometer.



Gambar 6.12
Balon udara merupakan salah satu penerapan Hukum Archimedes.



Gambar 6.13
(a) Hidrometer di dalam raksa.
(b) Hidrometer di dalam air.

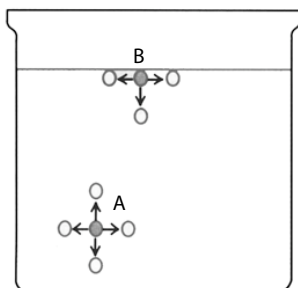


Gambar 6.14
Serangga dapat berjalan di atas air karena adanya tegangan permukaan.

6. Tegangan Permukaan

Tahukah Anda yang dimaksud dengan tegangan permukaan zat cair? Pernahkah Anda melihat serangga yang dapat berjalan di atas air? Mengapa serangga tersebut dapat melakukannya? Tegangan permukaan zat cair terjadi karena adanya kohesi, yaitu gaya tarik-menarik antarpartikel sejenis. Contoh yang menggambarkan adanya tegangan permukaan adalah balon yang terbuat dari air sabun. Anda bisa membuktikannya dengan cara mencelupkan tangan Anda ke dalam air sabun tersebut, lalu buatlah lingkaran dengan jari jempol dan telunjuk Anda, maka akan terlihat air sabun yang membentuk bidang datar.

Perhatikan **Gambar 6.15**. Gambar tersebut menunjukkan gaya kohesi yang bekerja pada molekul A dan molekul B. Molekul A mengalami gaya kohesi dari segala arah yang sama besar sehingga dapat dinyatakan bahwa molekul tersebut berada dalam keseimbangan. Berbeda dengan molekul B yang terletak pada permukaan zat cair. Molekul ini hanya mengalami gaya kohesi oleh partikel-partikel yang berada di bawah dan di sampingnya saja. Akibatnya, pada permukaan air terjadi tarikan ke bawah sehingga permukaan zat cair seperti selaput tipis. Amatilah jika pisau silet ditempatkan secara melintang pada permukaan air. Walaupun massa jenisnya lebih besar dibandingkan massa jenis air, silet tersebut dapat terapung karena adanya tegangan pada permukaan air.



Gambar 6.15
Dua molekul zat cair yang berbeda posisi memiliki gaya kohesi yang berbeda.

Perhatikan sejumlah tetesan embun pagi yang jatuh di atas rumput. Tetesan tersebut akan berbentuk seperti bola-bola kecil. Gaya kohesi molekul-molekul yang terletak pada permukaan air ke arah dalam akan sama besar sehingga tetesan air tersebut akan berbentuk bola. Telah diketahui bahwa bola merupakan bangun ruang yang memiliki luas permukaan terkecil. Permukaan air ini menyerupai selaput tegang yang elastis.

Untuk mengetahui besar tegangan permukaan tersebut, perhatikanlah contoh berikut. Ambillah sepotong kawat, kemudian bentuklah menyerupai bentuk U seperti pada **Gambar 6.17**. Kedua kaki kawat U dihubungkan dengan kawat AB dengan panjang ℓ dan berat w_1 . Jika kawat U dicelupkan ke dalam bejana yang berisi air sabun, kemudian pada batang AB diberi sebuah beban seberat w_2 , akan diperoleh gaya tegangan permukaan F , yaitu

$$F = w_1 + w_2 \quad (6-15)$$

Oleh karena sisi kawat yang kontak dengan permukaan air ada dua sisi, sisi luar ℓ_1 dan sisi dalam ℓ_2 dengan panjang dianggap sama. Jadi, panjang sisi kawat total yang kontak dengan air sepanjang 2ℓ sehingga tegangan permukaan pada larutan sabun adalah

$$\gamma = \frac{F}{2\ell} \quad (6-16)$$

Keterangan:

γ = tegangan permukaan (N/m), dapat dianggap sebagai gaya setiap satuan panjang

ℓ = panjang kawat (m)

Jika s adalah perpindahan kawat, **Persamaan (6-16)** dapat ditulis sebagai berikut.

$$\gamma = \frac{Fs}{2\ell s} = \frac{\text{usaha}}{\text{luas}} \quad (6-17)$$

Jadi, tegangan permukaan dapat pula diartikan sebagai usaha setiap satuan luas, dan satuannya adalah joule/meter² (J/m²). Untuk lebih memahami fenomena tentang tegangan permukaan, lakukanlah Aktivitas Fisika berikut ini.



Aktivitas Fisika 6.2

Tegangan Permukaan

Tujuan Percobaan

Memahami fenomena tegangan permukaan

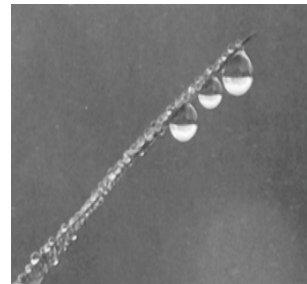
Alat-Alat Percobaan

1. Panci berisi air
2. Jarum
3. Kertas tisu
4. Minyak pelumas
5. Detergen



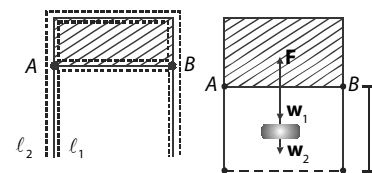
Langkah-Langkah Percobaan

1. Ambil jarum yang sudah diolesi minyak pelumas, kemudian simpan jarum tersebut di atas kertas tisu.
2. Letakkan jarum dan kertas tisu secara perlahan-lahan di atas permukaan air.
3. Amati yang terjadi pada jarum dan kertas tisu tersebut.
4. Taburkan detergen secara perlahan-lahan di sekitar jarum yang terapung, kemudian amati yang terjadi pada jarum tersebut.
5. Dari hasil **Aktivitas Fisika 6.2**, lakukanlah diskusi tentang hasil kegiatan tersebut bersama teman dan guru Fisika Anda. Kemudian, presentasikan hasil diskusi tersebut.



Gambar 6.16

Tetesan air yang jatuh ke atas rumput.



Gambar 6.17

Tegangan permukaan air sabun pada kawat.



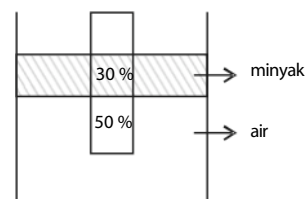
Pembahasan Soal

Sebuah benda terapung di atas permukaan air yang berlapis minyak. Sebanyak 50 % volume benda berada di dalam air dan 30 % di dalam minyak. Jika massa jenis minyak = 0,8 g/cm³ maka massa jenis benda tersebut adalah

- a. 0,62 g/cm³
- b. 0,68 g/cm³
- c. 0,74 g/cm³
- d. 0,78 g/cm³
- e. 0,82 g/cm³

Soal UMPTN Tahun 1993

Pembahasan:



Benda dalam keadaan setimbang, maka gaya berat benda sama dengan gaya angkat Archimedes oleh air dan minyak.

$$m_b g = F_A(\text{air}) + F_A(\text{minyak})$$

$$\rho_b V_b g = \rho_a V_a g +$$

$$\begin{aligned} \rho_b &= \rho_a \frac{V_a}{V_b} + \rho_m \frac{V_m}{V_b} \\ &= (1 \text{ g/cm}^3)(50 \%) + \\ &\quad (0,8 \text{ g/cm}^3)(30 \%) \\ &= 0,74 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

Jawaban: c

Tugas Anda 6.1

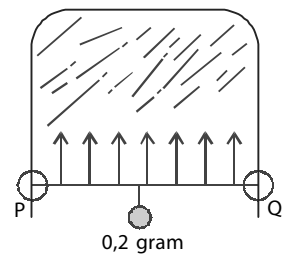
Tegangan permukaan dapat dikatakan sebagai kecenderungan permukaan zat cair untuk berkontraksi (mengerut). Menurut Anda, bagaimanakah sifat tegangan permukaan zat cair ketika zat cair tersebut dipanaskan?

Ketika jarum yang berada di atas kertas tisu di letakkan secara perlahan-lahan di atas permukaan air, jarum dan tisu awalnya akan terapung di atas permukaan air. Sesaat kemudian, kertas tisu akan menyerap air sehingga menjadi basah dan tenggelam, sedangkan jarum tetap terapung akibat adanya tegangan permukaan.

Jarum akan tenggelam ketika bubuk detergen ditaburkan di sekitar jarum yang terapung. Hal tersebut disebabkan mengecilnya tegangan permukaan air karena detergen bereaksi dengan minyak pelumas pada jarum. Akibatnya, jarum menjadi basah dan tenggelam.

Contoh 6.6

Sebatang kawat dibengkokkan seperti huruf U. Kemudian, kawat kecil PQ yang bermassa 0,3 g dipasang pada kawat tersebut seperti pada gambar. Selanjutnya, kawat-kawat ini dicelupkan dalam lapisan sabun dan diangkat vertikal sehingga terbentang satu lapisan sabun. Tampak kawat kecil PQ mengalami gaya tarik ke atas. Agar terjadi kesetimbangan maka pada kawat kecil PQ digantungkan massa seberat 0,2 gram.



Jika panjang kawat PQ = 10 cm, hitunglah tegangan permukaan lapisan sabun tersebut. (Ingat, lapisan sabun memiliki 2 permukaan yaitu depan dan belakang)

Jawab:

Pada keadaan setimbang, gaya-gaya yang bekerja sama besar. Gaya ke bawah adalah berat kawat dan berat beban. Adapun gaya ke atas adalah gaya tegang permukaan.

$$F = w_k + w_b$$

$$2\gamma\ell = (m_k + m_b)g \Rightarrow \gamma = \frac{m_k + m_b}{2\ell}g$$

Diketahui:

$$m_k = 0,3 \text{ g} = 0,3 \times 10^{-3} \text{ kg}; m_b = 0,2 \text{ g} = 0,2 \times 10^{-3} \text{ kg};$$

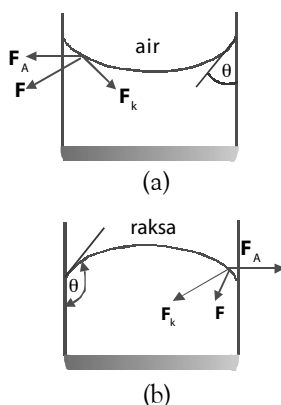
$$g = 9,8 \text{ m/s}^2; \ell = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}.$$

Maka diperoleh,

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{m_k + m_b}{2\ell}g \\ &= \frac{(0,3 \times 10^{-3} \text{ kg} + 0,2 \times 10^{-3} \text{ kg})9,8 \text{ m/s}^2}{2 \times 0,1 \text{ m}} = 0,0245 \text{ N/m}. \end{aligned}$$

Kata Kunci

- gaya Archimedes
- kapilaritas
- melayang
- mengapung
- meniskus cekung
- meniskus cembung
- tegangan permukaan
- tekanan hidrostatik
- tenggelam



Gambar 6.18

- (a) Meniskus cekung
(b) Meniskus cembung

a. Meniskus Cembung dan Meniskus Cekung

Gaya tarik menarik antara partikel-partikel yang sejenis dalam suatu zat disebut gaya *kohesi*, sedangkan gaya *adhesi* adalah gaya tarik menarik antara partikel-partikel yang tidak sejenis. Contoh gaya *adhesi* adalah tetesan air pada permukaan kaca yang lama-lama akan meluas. Hal tersebut terjadi karena gaya adhesi partikel kaca dan air lebih besar daripada gaya kohesi. Berbeda dengan air, jika raksa ditetaskan pada permukaan kaca maka raksa tersebut akan menggumpal. Penggumpalan raksa terjadi karena gaya kohesi lebih besar daripada gaya adhesinya.

Akibat fenomena tersebut, jika kedua cairan tersebut dimasukkan ke dalam tabung kaca, akan terlihat seperti pada **Gambar 6.18**. Diketahui F_k adalah gaya kohesi dan F_A adalah gaya adhesi. **Gambar 6.18(a)** menunjukkan *meniskus cekung* yang terjadi karena gaya adhesi lebih besar daripada gaya kohesi. Adapun **Gambar 6.18(b)** merupakan *meniskus*

cembung yang terjadi karena gaya kohesi yang lebih besar daripada gaya adhesi. Sudut kontak θ pada meniskus cekung adalah sudut lancip ($<90^\circ$). Sebaliknya, sudut kontak pada meniskus cembung adalah sudut tumpul ($>90^\circ$).

b. Kapilaritas

Gejala kapilaritas adalah peristiwa naik atau turunnya permukaan zat cair melalui lubang-lubang kecil atau kapiler. Alat yang dapat digunakan untuk mengamati gejala kapilaritas adalah pipa kapiler. Jika pipa kapiler dimasukkan ke dalam tabung yang berisi air, permukaan air di dalam pipa kapiler akan naik, seperti terlihat pada **Gambar 6.19**. Akan tetapi, jika pipa kapiler dimasukkan ke dalam tabung raksa, permukaan raksa di dalam tabung tersebut akan turun. Tahukah Anda, mengapa hal tersebut terjadi?

Perhatikan **Gambar 6.20**. Bentuk pipa kapiler yang menyerupai tabung akan menyebabkan zat cair menyentuh dinding sebelah dalam sehingga permukaan zat cair menarik pipa dengan gaya sebesar

$$F_y = 2\pi r\gamma$$

Adapun keliling dinding pipa kapiler = $2\pi r$

Dinding pipa kapiler memberikan gaya reaksi terhadap zat cair sebesar

$$F_y = 2\pi r\gamma \cos\theta$$

Gaya ini diimbangi oleh berat zat cair setinggi y dalam pipa, yaitu sebesar

$$\begin{aligned} w &= mg \\ &= \rho Vg \\ 2\pi r\gamma \cos\theta &= \rho\pi r^2yg \end{aligned}$$

sehingga diperoleh tinggi zat cair di dalam pipa kapiler, yaitu

$$y = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r} \quad (6-18)$$

Keterangan:

y = tinggi zat cair (m)

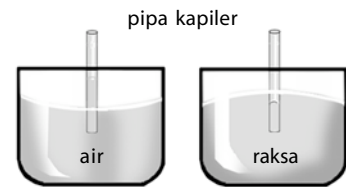
γ = tegangan permukaan dalam pipa kapiler (N/m)

θ = sudut kontak

ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)

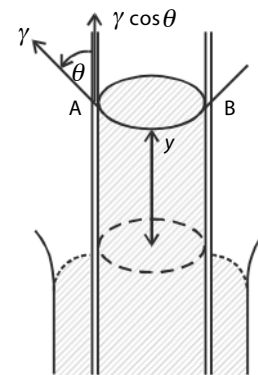
g = percepatan gravitasi (m/s^2)

r = jari-jari pipa kapiler (m)



Gambar 6.19

Gejala kapilaritas pada pipa kapiler.



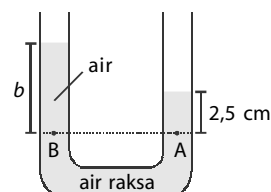
Gambar 6.20

Pada keadaan setimbang, gaya tegangan permukaan di titik A sama dengan di titik B.

Tes Kompetensi Subbab A

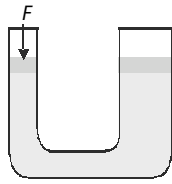
Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Sebuah drum berisi minyak yang memiliki massa jenis 800 kg/m^3 dan tingginya 152 cm . Berapakah:
 - tekanan hidrostatis pada dasar drum;
 - tekanan hidrostatis di titik yang berada 100 cm di atas dasar drum.
- Sebuah pipa berbentuk huruf U diisi dengan air. Kemudian, kaki sebelah kiri diisi minyak hingga air terdesak sejauh 3 cm dari kedudukan setimbangnya. Jika $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{minyak}} = 0,8 \text{ g/cm}^3$, dan luas penampang pipa = 2 cm^2 , hitunglah banyak minyak yang dimasukkan ke dalam pipa.
- Dua bejana yang berhubungan, berisi air dan raksa ($\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3$).



- Berapakah panjang lajur air supaya jarak antara kedua permukaan raksa dalam bejana tersebut $2,5 \text{ cm}$?
- Berapa cm^3 alkohol ($\rho = 0,8 \text{ g/cm}^3$) harus dituangkan di atas raksa agar permukaan air naik 1 cm ? (luas penampang bejana = 5 cm^2)

4. Gambar berikut melukiskan sebuah pompa hidrolis.



Penampang kecil luasnya = 20 cm² dan luas penampang besar = 500 cm². Jika pada penampang yang kecil diberi gaya 100 N, berapakah gaya yang bekerja pada penampang besar?

5. Sebuah balok yang volumenya 4 m³ dan massa jenisnya = 600 kg/m³, dimasukkan ke dalam minyak yang massa jenisnya = 800 kg/m³.

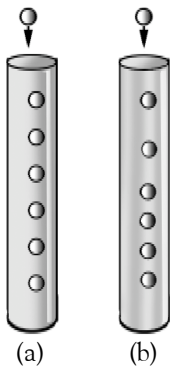
- Bagaimanakah posisi benda?
- Hitung volume benda pada permukaan minyak.
- Hitung gaya Archimedes yang bekerja pada benda tersebut.

Tabel 6.1

Koefisien Viskositas untuk Berbagai Macam Fluida

Fluida	Temperatur (°C)	η (Pas)
Air	0	$1,8 \times 10^{-3}$
	20	$1,0 \times 10^{-3}$
	100	$0,3 \times 10^{-3}$
Darah	37	$\approx 4 \times 10^{-3}$
		$\approx 1,5 \times 10^{-3}$
Ethil alkohol	20	$1,2 \times 10^{-3}$
Oli (SAE 10)	30	200×10^{-3}
Gliserin	20	1.500×10^{-3}
Udara	20	$0,018 \times 10^{-3}$
Hidrogen	0	$0,009 \times 10^{-3}$
Uap air	100	$0,0013 \times 10^{-3}$

Sumber: Physics, 1993



Gambar 6.21

- Sebuah kelereng dijatuhkan ke dalam fluida ideal.
- Sebuah kelereng dijatuhkan ke dalam fluida tak ideal.

B. Viskositas Fluida

Viskositas atau kekentalan merupakan gesekan yang dimiliki oleh fluida. Gesekan dapat terjadi antarpartikel zat cair, atau gesekan antara zat cair dan dinding permukaan tempat zat cair tersebut berada.

Setiap zat cair memiliki viskositas yang berbeda. Pada Tabel 6.1, dapat dilihat koefisien viskositas beberapa fluida pada berbagai suhu. Keadaan suhu dicantumkan dalam tabel tersebut karena viskositas bergantung pada suhu. Semakin besar suhu maka semakin kecil viskositasnya, begitu pula sebaliknya. Satuan viskositas dalam sistem SI adalah Ns/m^2 , sedangkan dalam sistem cgs adalah *poise*.

1. Hukum Stokes

Fluida ideal adalah fluida yang tidak memiliki viskositas (kekentalan). Jika sebuah benda bergerak di dalam fluida ideal, benda tersebut tidak akan mengalami gaya gesekan. Jadi, tekanan fluida sebelum dan sesudah melewati suatu penghalang tidak akan berubah, atau besarnya tetap. Resultan gaya yang bekerja pada setiap titik aliran fluida adalah nol.

Jika benda bergerak dalam fluida yang memiliki viskositas, akan terjadi gaya gesek antara benda dan fluida. Gaya tersebut dinamakan *gaya Stokes*. Jika benda yang bergerak dalam fluida tersebut berbentuk bola, besarnya gaya Stokes dirumuskan sebagai berikut.

$$F_s = 6\pi\eta rv \quad (6-19)$$

Keterangan:

F_s = gaya Stokes (N)

η = koefisien viskositas (Ns/m^2)

r = jari-jari bola (m)

v = kecepatan relatif bola terhadap fluida (m/s)

Perhatikan Gambar 6.21. Sebuah kelereng dijatuhkan di dalam tabung yang berisi suatu fluida. Jika kelereng tersebut dijatuhkan ke dalam tabung yang berisi fluida ideal, Gambar 6.21(a), tidak akan terjadi perubahan resultan gaya akibat gesekan fluida. Akan tetapi, jika kelereng dijatuhkan ke dalam tabung yang berisi fluida tidak ideal, Gambar 6.21(b), akan terjadi perubahan resultan gaya yang bekerja. Hal tersebut dikarenakan adanya pengaruh gaya gesekan.

Pada **Gambar 6.21 (b)**, gaya-gaya yang bekerja pada kelereng adalah gaya berat kelereng yang diimbangi oleh gaya Stokes dan gaya Archimedes.

Pengimbangan gaya tersebut terus berlanjut seiring dengan gerak kelereng. Pada saat tertentu, gaya yang bekerja seimbang sehingga resultan seluruh gaya tersebut akan sama dengan nol. Jika benda bergerak dengan kecepatan maksimum yang tetap, kecepatannya ini disebut *kecepatan terminal*. Secara matematis, kecepatan terminal dapat diturunkan dari rumus-rumus berikut.

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{F} &= 0 \\ mg - \mathbf{F}_A - \mathbf{F}_s &= 0 \\ \mathbf{F}_s &= mg - \mathbf{F}_A \end{aligned} \quad (6-20)$$

Untuk gaya ke atas (Archimedes):

$$\mathbf{F}_A = V_b \rho_f \mathbf{g}$$

Untuk gaya Stokes:

$$\mathbf{F}_s = 6\pi\eta r v_t$$

Berat benda, $w = mg = \rho_b V_b g$

Adapun kecepatan terminal benda setelah gaya-gaya yang bekerja seimbang adalah

$$v_t = \frac{g v_b (\rho_b - \rho_f)}{6\pi\eta r} \quad (6-21)$$

Untuk benda berbentuk bola dengan jari-jari r maka volume benda

$$V_b = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Jadi,

$$v_t = \frac{2}{9} \frac{g r^2 (\rho_b - \rho_f)}{\eta} \quad (6-22)$$

sedangkan viskositasnya adalah

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{v_t} (\rho_b - \rho_f) \quad (6-23)$$

Keterangan:

ρ_b = massa jenis benda/bola (kg/m^3)

ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3)

V_b = volume benda (m^3)

v_t = kecepatan terminal benda (m/s)

η = koefisien viskositas (Ns/m^2)

Contoh 6.7

Sebuah kelereng yang berjari-jari 0,5 cm dijatuhkan ke dalam minyak pelumas yang berada dalam tabung. Tentukanlah kecepatan terminal yang dicapai kelereng, jika massa jenis minyak 800 kg/m^3 , koefisien viskositas minyak $3,0 \times 10^{-2} \text{ Pas}$, massa jenis kelereng $2,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, dan percepatan gravitasi 10 m/s^2 .

Jawab:

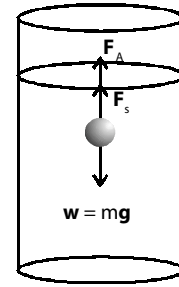
$$r = 0,5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-3} \text{ m};$$

$$\rho_f = 800 \text{ kg/m}^3;$$

$$\eta = 3,0 \times 10^{-2} \text{ Pas}$$

$$\rho_b = 2,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

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



Gambar 6.22

Gaya-gaya yang bekerja pada kelereng di dalam fluida.

Kata Kunci

- gaya stokes
- kecepatan terminal
- viskositas

$$v_t = \frac{2}{9} \frac{gr^2(\rho_b - \rho_f)}{\eta} = \frac{2}{9} \frac{(5 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{(3,0 \times 10^{-2} \text{ Pas})} \times 10 \text{ m/s}^2 \times (2.600 \text{ kg/m}^3 - 800 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 3,33 \text{ m/s}$$

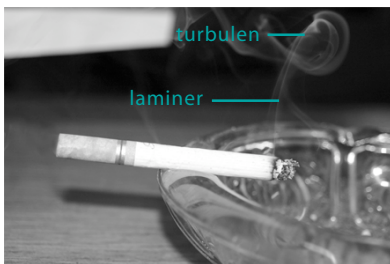
Jadi, kecepatan terminal kelereng adalah 3,33 m/s.

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Kecepatan terminal yang dicapai oleh setetes minyak ($\rho_m = 821,3 \text{ kg/m}^3$) yang jatuh di udara ($\rho_{\text{udara}} = 1,3 \text{ kg/m}^3$) adalah 0,15 mm/s. Hitunglah jari-jari tetesan minyak tersebut jika $\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$.
- Hitunglah kecepatan maksimum (kecepatan terminal) dari sebuah bola baja berdiameter 2 mm yang dijatuhkan dalam sejenis minyak ($\rho = 965 \text{ kg/m}^3$) yang memiliki koefisien viskositas 1,2 kg/m·s. Massa jenis baja = 1.800 kg/m³.

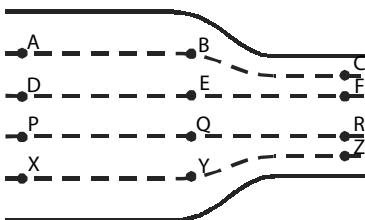
C. Fluida Dinamis



Sumber: Dokumentasi Penerbit

Gambar 6.23

Aliran laminar dan aliran turbulen pada asap rokok.



Gambar 6.24

Garis aliran A-B-C, D-E-F, P-Q-R, dan X-Y-Z merupakan garis aliran laminar.

Dalam fluida yang bergerak (fluida dinamis), setiap partikel pada fluida tersebut memiliki kecepatan untuk setiap posisinya. Oleh karena itu, fluida dinamis dapat digambarkan sebagai medan kecepatan $v(r)$.

Jika lintasan partikel (titik) pada fluida digambarkan, akan diperoleh suatu lintasan yang dinamakan garis aliran. Dalam fluida dinamis ada dua garis aliran, yaitu *aliran laminar* dan *aliran turbulen*. Aliran laminar adalah aliran fluida yang kecepatan aliran pada setiap titik pada fluida tersebut tidak berubah terhadap waktu. Adapun aliran turbulen adalah aliran fluida yang kecepatan aliran setiap titik pada fluida tersebut dapat berubah.

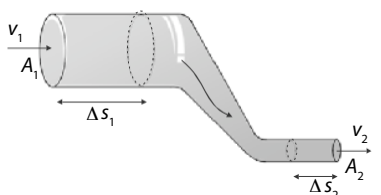
Gambar 6.23 menggambarkan aliran asap rokok. Aliran asap rokok bagian bawah berbentuk aliran sejajar. Aliran seperti ini disebut *aliran laminar* atau aliran yang mengikuti garis arus. Adapun asap pada bagian atas berputar-putar dan seterusnya menyebar ke segala arah. Aliran tersebut dinamakan *aliran turbulen*.

Perhatikan **Gambar 6.24**. Pada gambar tersebut dilukiskan empat garis aliran partikel-partikel fluida. Partikel-partikel fluida pada setiap garis aliran hanya mengikuti garis aliran tersebut dan tidak berpindah ke garis aliran yang lain. Hal tersebut merupakan suatu gambaran dari aliran fluida ideal yang dinamakan aliran stasioner.

Dalam fluida ideal, setiap aliran fluida memiliki kecepatan aliran yang sama, juga tidak ada gaya gesek antara lapisan aliran fluida yang terdekat dengan dinding tabung atau tempat fluida mengalir. Dengan demikian, *fluida ideal* adalah fluida yang tidak terpengaruh oleh gaya tekan yang diterimanya. Artinya, volume dan massa jenisnya tidak berubah meskipun ada tekanan.

1. Persamaan Kontinuitas

Perhatikan **Gambar 6.25**. Pada gambar tersebut, zat cair melalui sebuah pipa pada penampang A_1 dengan kecepatan aliran v_1 menuju ke penampang yang lebih sempit A_2 dengan kecepatan aliran v_2 . Dengan asumsi bahwa fluida yang mengalir tidak kompresibel maka dalam selang waktu yang sama, jumlah zat cair yang mengalir melalui penampang A_1 akan sama dengan jumlah zat cair yang mengalir melalui penampang A_2 . Volume zat cair pada penampang A_1 sama dengan volume zat cair pada penampang A_2 .



Gambar 6.25

Fluida mengalir pada penampang yang berbeda.

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 \Delta s_1 = A_2 \Delta s_2$$

$$A_1(v_1 \Delta t) = A_2(v_2 \Delta t)$$

Untuk selang waktu yang sama, akan diperoleh

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (6-24)$$

atau

$$Q_1 = Q_2 \quad (6-25)$$

Keterangan:

A_1 = luas penampang 1 (m^2)

A_2 = luas penampang 2 (m^2)

v_1 = kecepatan zat cair pada penampang 1 (m/s)

v_2 = kecepatan zat cair pada penampang 2 (m/s)

$Q_1 = A_1 v_1$ = debit zat cair di penampang 1 (m^3/s)

$Q_2 = A_2 v_2$ = debit zat cair di penampang 2 (m^3/s)

Persamaan (6-24) dan Persamaan (6-25) dinamakan *persamaan kontinuitas*.

Contoh 6.8

Sebuah pipa yang luas penampangnya 12 cm^2 dan 18 cm^2 dialiri air. Pada penampang yang besar, laju aliran airnya adalah 4 m/s . Berapakah laju aliran air pada penampang yang kecil?

Jawab:

Diketahui:

$$A_1 = 18 \text{ cm}^2 = 18 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_2 = 12 \text{ cm}^2 = 12 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v_1 = 4 \text{ m/s}$$

Dengan menggunakan persamaan debit air, diperoleh

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{18 \times 10^{-4}}{12 \times 10^{-4}} \times 4 \text{ m/s} = 6 \text{ m/s}$$



Aktivitas Fisika 6.3

Persamaan Kontinuitas

Tujuan Percobaan

Mengamati dan memahami persamaan kontinuitas

Alat-Alat Percobaan

1. Dua buah selang yang berdiameter 1 cm atau lebih dengan panjang masing-masing 2 meter
2. Dua buah ember
3. Plastik tebal.

Langkah-Langkah Percobaan

1. Tutuplah salah satu ujung selang dengan plastik tebal yang telah dilubangi. Diameter lubang plastik $\pm 0,5 \text{ cm}$.
2. Sambungkan kedua selang pada kran yang aliran airnya sama besar.
3. Jawablah pertanyaan berikut.
 - a. Untuk posisi kedua selang sama, semburan air pada selang manakah yang paling jauh?
 - b. Apa yang akan terjadi jika dalam selang waktu yang sama, setiap air selang dialirkan pada ember yang berukuran sama?
4. Tulislah kesimpulan dari percobaan tersebut.
5. Buatlah Hukum Kontinuitas menurut versi Anda berdasarkan percobaan yang telah Anda lakukan.
6. Bandingkan dengan Hukum Kontinuitas yang sudah Anda pelajari.



Ingatlah

Prinsip utama dari persamaan kontinuitas adalah pada selang waktu yang sama, debit fluida akan sama.



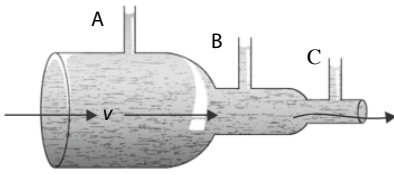
Informasi untuk Anda

Seorang penyelam pemula sedang menarik napas pada kedalaman L untuk berenang ke atas. Dia mengabaikan instruksi untuk mengeluarkan napas secara perlahan-lahan selama menuju ke permukaan. Selama perjalanan ke atas, tekanan udara luar pada tubuhnya berkurang hingga mencapai tekanan atmosfer. Tekanan darahnya juga berkurang sampai normal kembali. Oleh karena ia tidak membuang napas, ketika sampai ke permukaan terdapat perbedaan antara tekanan udara di dadanya dengan di dalam paru-parunya. Perbedaan tekanan ini dapat mengakibatkan paru-parunya pecah. Selain itu, tekanan darahnya turun drastis sehingga udara pun masuk ke dalam jantungnya. Hal ini dapat mengakibatkan kematian bagi penyelam tersebut.

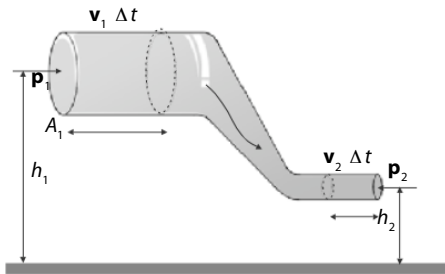
Information for You

A novice scuba diver takes enough air from his tank to fully expand his lung at depth L and swimming to the surface. He ignores instructions and fails to exhale during his ascent. As he ascends, the external pressure on him decreases, until it reaches the atmosphere pressure at the surface. His blood pressure also decreases, until it become normal again. However, because he does not exhale the air pressure in his lungs remain at the value it had at depth L . This pressure difference can explode his lungs. Besides that, his blood pressure decrease drastically which then carries the air to the heart. This two things can kill that novice diver.

Sumber: *Fundamentals of Physics*, 2001



Gambar 6.26
Fluida mengalir.



Gambar 6.27
Perbedaan ketinggian fluida mengalir.



Tokoh

Daniel Bernoulli
(1700–1782)



Sumber: World Book Encyclopedia

Daniel Bernoulli adalah putra dari Johan Bernoulli, lahir di kota Basel dan bekerja sebagai dosen Matematika di Universitas Basel. Pamannya seorang matematikawan di Universitas tersebut yang pernah menciptakan materi baru dalam teori probabilitas, analisis geometri, dan kalkulus variasi. Bernoulli berhasil menciptakan prinsip hidrodinamika dan perhitungan aliran fluida. Selain itu, Bernoulli sangat berperan dalam mengembangkan teori probabilitas, kalkulus, dan persamaan diferensial.

2. Hukum Bernoulli

Pada bejana berhubungan, permukaan zat cair pada setiap tempat akan sama tinggi. Hal tersebut berlaku pada zat cair yang diam. Jadi, jika zat cair tersebut bergerak, keadaan tersebut tidak akan terjadi.

Perhatikan **Gambar 6.26**. Jika zat cair dalam tabung tidak bergerak maka tinggi permukaan zat cair pada pipa A, pipa B, dan pipa C akan sama. Namun, tinggi permukaan zat cair pada setiap pipa akan berbeda jika zat cair tersebut mengalir ke kanan.

Anda telah mengetahui bahwa kelajuan zat cair paling besar terdapat pada pipa yang sempit, namun apakah hal tersebut berlaku pula pada tekanannya? Untuk mengetahui jawaban tersebut, perhatikan **Gambar 6.27**.

Secara matematis, persamaan yang menggambarkan aliran fluida pada gambar tersebut adalah

$$\begin{aligned} \text{usaha} &= \text{gaya} \times \text{jarak} \\ W &= Fs \\ &= pAvt \end{aligned} \quad (6-26)$$

Usaha total yang digunakan untuk mengalirkan fluida dari keadaan 1 ke keadaan 2 sama dengan perubahan energi mekanik fluida. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$W_{\text{total}} = E_m \quad \dots (*)$$

$$W_1 - W_2 = \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$p_1 v_1 A_1 t - p_2 v_2 A_2 t = \left(\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \right) + (mgh_2 - mgh_1)$$

$$p_1 v_1 A_1 t + \frac{1}{2} m v_1^2 + mgh_1 = p_2 v_2 A_2 t + \frac{1}{2} m v_2^2 + mgh_2 \quad \dots (**)$$

Perhatikan **Persamaan (*)**. W_2 bertanda negatif karena arah gaya F_2 berlawanan arah dengan arah gerak fluida.

Menurut hukum kontinuitas, jumlah fluida yang mengalir pada pipa 1 sama dengan jumlah fluida yang mengalir pada pipa 2 sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$A_1 v_1 t = A_2 v_2 t = V \quad \dots (***)$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan (***)** ke **Persamaan (**)** akan dihasilkan persamaan

$$p_1 V + \frac{1}{2} m v_1^2 + mgh_1 = p_2 V + \frac{1}{2} m v_2^2 + mgh_2 \quad (6-27)$$

Jika Anda mensubstitusikan $V = \frac{m}{\rho}$ ke **Persamaan (6-27)**, akan diperoleh

$$p_1 \frac{m}{\rho} + \frac{1}{2} m v_1^2 + mgh_1 = p_2 \frac{m}{\rho} + \frac{1}{2} m v_2^2 + mgh_2 \quad (6-28)$$

Kemudian, jika Anda mengalikan **Persamaan (6-28)** dengan ρ , akan diperoleh

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (6-29)$$

Persamaan (6-29) disebut juga *Persamaan Bernoulli*, yang secara umum dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{konstan} \quad (6-30)$$

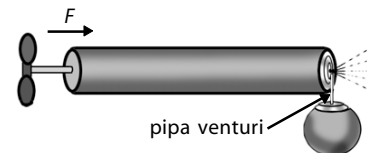
Berdasarkan persamaan Bernoulli, diketahui bahwa tekanan di dalam fluida yang bergerak dipengaruhi oleh kecepatan aliran fluida tersebut.

3. Penerapan Hukum Bernoulli

a. Alat Penyemprot Nyamuk

Perhatikanlah Gambar 6.28 yang memperlihatkan sebuah alat penyemprot nyamuk. Alat tersebut menggunakan prinsip Hukum Bernoulli. Jika pengisap pompa ditekan, udara akan mengalir dengan kecepatan tinggi dan keluar melalui lubang sempit pada tabung udara.

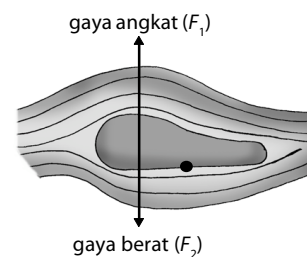
Kecepatan udara yang tinggi menyebabkan tekanan pada permukaan pipa venturi menjadi rendah. Hal tersebut menyebabkan cairan obat nyamuk dapat naik ke atas melalui pipa venturi dan menyembur keluar bercampur udara.



Gambar 6.28
Alat penyemprot nyamuk.

b. Daya Angkat pada Sayap Pesawat Terbang

Tahukah Anda yang menyebabkan pesawat dapat terbang? Pesawat dapat terbang karena adanya daya angkat pada sayap. Daya angkat pada pesawat terbang, juga menggunakan prinsip Hukum Bernoulli. Bentuk bagian atas sayap pesawat yang cembung menyebabkan adanya perbedaan laju udara pada bagian atas dan bagian bawahnya, seperti digambarkan oleh garis-garis gaya pada Gambar 6.29. Aliran udara pada bagian atas sayap bergerak lebih cepat daripada bagian bawahnya. Menurut Hukum Bernoulli, tekanan pada bagian atas pesawat menjadi lebih kecil daripada tekanan pada bagian bawah sayap. Perbedaan tekanan inilah yang membuat adanya gaya angkat ke atas, yang besarnya dapat dituliskan sebagai berikut.



Gambar 6.29
Garis arus fluida ideal pada sayap pesawat terbang.

$$F_1 - F_2 = (p_1 - p_2) A$$

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{2} (\rho v_1^2 - \rho v_2^2) A$$

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{2} \rho A (v_2^2 - v_1^2) \quad (6-31)$$

Berdasarkan Persamaan (6-31), dapat dianalisis bahwa jika pesawat bergerak lebih cepat maka akan menghasilkan gaya angkat yang lebih besar pula. Dengan demikian, semakin luas penampang sayap, semakin besar pula gaya angkatnya.

Contoh 6.9

Sebuah pesawat terbang dengan luas penampang sayap 40 m^2 bergerak sehingga menghasilkan perbedaan kecepatan aliran udara pada bagian atas sayap pesawat dan bagian bawahnya, yang masing-masing besarnya 240 m/s dan 200 m/s . Berapakah besar gaya angkat pada sayap, jika massa jenis udara $1,3 \text{ kg/m}^3$?

Jawab:

Diketahui:

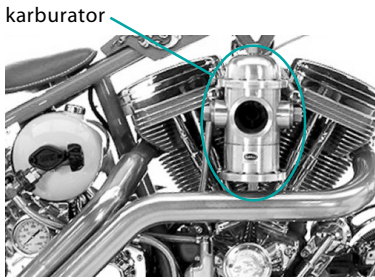
$$A = 40 \text{ m}^2; v_2 = 240 \text{ m/s}$$

$$v_1 = 200 \text{ m/s}; \rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$$

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{2} \rho A (v_2^2 - v_1^2)$$

$$= \frac{1}{2} \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 40 \text{ m}^2 \times [(240 \text{ m/s})^2 - (200 \text{ m/s})^2] = 457.600 \text{ N}$$

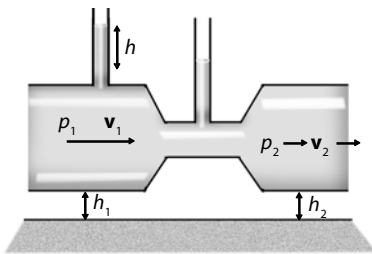
Jadi, gaya angkat pada sayap pesawat tersebut adalah 457.600 N .



Sumber: www.firetrucks.uw.hu

Gambar 6.30

Karburator pada motor.



Gambar 6.31

Pipa venturi.

c. Karburator

Karburator merupakan alat pencampur bahan bakar dan udara. Pencampuran tersebut bertujuan untuk mempermudah pembakaran. Karburator terdiri atas tangki karburator, pelampung, pipa venturi, dan penyemprot udara (*nozle*). Udara yang masuk ke dalam karburator memiliki kecepatan yang tinggi sehingga menyebabkan tekanan pada ujung pipa venturi menjadi rendah. Tekanan yang rendah pada ujung pipa venturi menyebabkan bahan bakar cair keluar dari tabung bahan bakar melalui pipa venturi menuju *nozle*. Semburan bahan bakar cair yang bercampur dengan udara dapat menghasilkan gas yang disebut *manzel* yang bersifat mudah terbakar. Gas *manzel* inilah yang dibakar sehingga memiliki tekanan yang tinggi dan menekan piston. Demikian seterusnya sehingga roda akan bergerak seiring dengan gerakan naik turun piston tersebut.

d. Pipa Venturi

Selain dimanfaatkan dalam karburator, pipa venturi juga dimanfaatkan untuk menentukan kelajuan zat cair dalam sebuah pipa. Perhatikan **Gambar 6.31**. Gambar tersebut memperlihatkan aliran fluida dari posisi 1 ke posisi 2. Untuk menentukan kelajuan aliran fluida tersebut, venturimeter harus diletakkan mendatar sehingga $h_1 = h_2$. Dengan menggunakan hukum Bernoulli, diperoleh

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (6-32)$$

Dari persamaan kontinuitas diperoleh

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} \quad (6-33)$$

Jika **Persamaan (6-33)** disubstitusikan ke **Persamaan (6-32)**, diperoleh

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right) \quad (6-34)$$

Tampak dari **Gambar 6.30**, selisih ketinggian zat cair pada pipa venturi adalah h . Hal tersebut disebabkan adanya perbedaan tekanan Δp . Menurut hukum hidrostatis, perbedaan tekanan tersebut adalah $\Delta p = \rho gh$. Dengan memasukkan perbedaan tekanan ini ke dalam **Persamaan (6-34)**, diperoleh

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}} \quad (6-35)$$

Keterangan:

- v_1 = kecepatan zat cair yang diukur (m/s)
- ρ = massa jenis zat cair yang diukur (kg/m³)
- A_1 = luas penampang pipa besar (m²)
- A_2 = luas penampang pipa kecil (m²)
- h = perbedaan tinggi raksa (m)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)

e. Venturimeter dengan Manometer

Gambar 6.32 menunjukkan venturimeter yang dilengkapi manometer dan diisi dengan zat cair yang memiliki massa jenis ρ' . Dengan menggunakan persamaan Bernoulli, kecepatan fluida yang mengalir melalui penampang besar venturi meter dapat diukur sebagai berikut.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

Oleh karena ketinggian pipa kecil dengan pipa besar sama ($h_1 = h_2$), diperoleh

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) \tag{6-36}$$

Tekanan hidrostatik di A = tekanan hidrostatik di B sehingga

$$\rho gh_1 + p_1 = \rho' gh_2 + p_2$$

$$p_1 - p_2 = \rho' gh_2 - \rho gh_1 \tag{6-37}$$

Persamaan kontinuitas:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{6-38}$$

Dengan melakukan substitusikan dari Persamaan (6-37) dan Persamaan (6-38) ke dalam Persamaan (6-36), didapatkan persamaan

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh(\rho' - \rho)}{\rho(A_1 - A_2)}} \tag{6-39}$$

Keterangan:

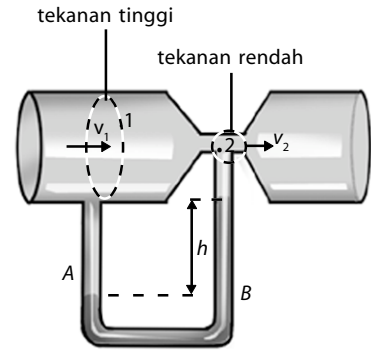
- v_1 = kecepatan zat cair yang diukur (m/s)
- ρ' = massa jenis raksa (kg/m^3)
- ρ = massa jenis zat cair yang diukur (kg/m^3)
- A_1 = luas penampang pipa besar (m^2)
- A_2 = luas penampang pipa kecil (m^2)
- h = perbedaan tinggi raksa (m)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)

f. Pipa Pitot

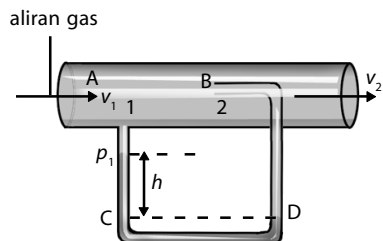
Pipa pitot adalah alat untuk mengukur kelajuan gas atau udara. Perhatikan Gambar 6.33. Pipa pitot terdiri atas pipa venturi yang berisikan raksa. Ujung A terbuka ke atas, sedangkan ujung B terbuka memanjang searah dengan datangnya udara. Perbedaan tinggi raksa dalam pipa disebabkan oleh perbedaan tekanan di A dan B.

Aliran udara yang masuk ke dalam tabung diteruskan ke dalam pipa melalui ujung B, dengan kecepatan berkurang hingga mencapai nol. Pada keadaan tersebut, tekanan di B sama dengan tekanan di titik D dan gas dalam keadaan diam.

Dengan menggunakan persamaan Bernoulli, dengan $h_A = h_B$ dan kecepatan gas di B sama dengan nol, akan didapat



Gambar 6.32
Venturimeter yang dilengkapi manometer.



Gambar 6.33
Pipa pitot

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2$$

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (6-40)$$

Beda tekanan antara titik 1 dan titik 2 ($p_2 - p_1$) sama dengan tekanan hidrostatik zat cair di dalam manometer, yaitu

$$p_2 - p_1 = \rho' gh \quad (6-41)$$

Dengan melakukan substitusi **Persamaan (6-40)** ke **Persamaan (6-41)**, diperoleh

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 = \rho' gh$$

$$v_1^2 = \frac{2\rho' gh}{\rho}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\rho' gh}{\rho}} \quad \text{atau} \quad v = \sqrt{\frac{2\rho' gh}{\rho}} \quad (6-42)$$

Kata Kunci

- aliran turbulen
- aliran laminer
- hukum Bernoulli
- manometer
- persamaan kontinuitas
- venturimeter

Keterangan:

- v = kecepatan alir gas/udara (m/s)
 ρ' = massa jenis air raksa (kg/m^3)
 ρ = massa jenis gas/udara (kg/m^3)
 h = perbedaan tinggi air raksa (m)

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

- Berat sebuah pesawat yang memiliki luas total sayap 20 m^2 adalah 15.000 N . Kecepatan aliran udara pada bagian bawah sayap 80 m/s . Berapakah kecepatan aliran udara pada bagian atas sayap jika gaya angkat dinamiknya sama dengan berat pesawat tersebut? (pesawat dalam keadaan seimbang). Massa jenis udara saat itu $1,2 \text{ kg/m}^3$.
- Sebuah bak terbuka berisi air setinggi 5 m . Berapakah kecepatan keluarnya air pada sebuah lubang yang terletak di dasar bak, jika luas permukaan lubang tersebut $0,5 \text{ cm}^2$? Hitung banyaknya air yang dapat ditampung dalam waktu 1 jam .
- Berapakah gaya ke atas yang dialami oleh sebuah pesawat yang memiliki lebar sayap total 15 m^2 , jika kecepatan aliran udara di atas dan di bawah sayap 60 m/s dan 50 m/s ? Massa jenis udara pada ketinggian itu $1,1 \text{ kg/m}^3$.
- Sebuah pesawat mendapat tekanan ke atas sebesar $93,6 \text{ N/m}^2$. Jika kecepatan aliran udara pada bagian atas sayap pesawat 40 m/s , berapakah kecepatan aliran udara pada bagian bawah sayap pesawat tersebut jika massa jenis udara $1,2 \text{ kg/m}^3$?
- Perbedaan tinggi raksa dalam sebuah manometer suatu venturimeter ialah 4 cm . Berapakah kecepatan air pada penampang yang lebih besar, jika luas penampang yang besar dan kecil masing-masing 50 cm^2 dan 30 cm^2 ? Diketahui massa jenis raksa $13,6 \text{ gr/cm}^3$.
- Kecepatan aliran pada bagian pipa yang besar dari suatu venturimeter 20 cm/s . Berapakah perbedaan tinggi raksa (massa jenis $13,6 \text{ g/cm}^3$) pada manometer jika perbandingan antara luas penampang besar dan kecil adalah $3 : 1$?

Rangkuman

1. Tekanan merupakan besar gaya yang bekerja pada suatu permukaan dibagi dengan luas gaya.

$$p = \frac{F}{A}$$

Tekanan hidrostatis merupakan tekanan yang dialami zat cair pada kedalaman tertentu. Tekanan hidrostatis sangat dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan kedalaman air.

$$p = \rho gh$$

2. Hukum Pascal menyatakan bahwa tekanan yang diberikan pada suatu zat cair dalam ruang tertutup diteruskan sama besar ke segala arah. Prinsip kerja dongkrak hidrolik dan pengangkat hidrolik bekerja berdasarkan Hukum Pascal.

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

3. Hukum Archimedes berbunyi, benda yang tercelup ke dalam fluida zat cair baik sebagian ataupun seluruhnya akan mengalami gaya ke atas sebesar berat zat cair yang dipindahkan oleh benda tersebut. Gaya ke atas ini disebut gaya Archimedes yang besarnya dinyatakan sebagai berikut.

$$F_A = m_C g = \rho_C V_C g$$

Akibat adanya gaya Archimedes pada benda yang masuk ke dalam zat cair, ada tiga kemungkinan yang akan terjadi pada benda, yaitu

- a. benda mengapung jika $w < F_A$
 - b. benda melayang jika $w = F_A$
 - c. benda tenggelam jika $w > F_A$
4. Hukum Archimedes diterapkan pada kendaraan laut dan udara, seperti perahu, dan balon udara.
 5. Tegangan permukaan zat cair terjadi karena adanya kohesi/gaya tarik-menarik antarpartikel sejenis.

$$\gamma = \frac{F}{2\ell}$$

Gejala kapilaritas adalah peristiwa naik atau turunnya permukaan zat cair melalui lubang-lubang kecil atau kapiler. Tinggi zat cair di dalam pipa kapiler adalah

$$y = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho gr}$$

6. Viskositas atau kekentalan adalah gesekan yang dimiliki oleh fluida.

Hukum Stokes menyatakan bahwa fluida ideal adalah fluida yang tidak memiliki viskositas sehingga benda yang bergerak di dalamnya tidak mengalami gaya gesek. Sebaliknya, pada fluida yang memiliki viskositas, akan terjadi gaya gesek yang dinamakan gaya Stokes.

$$F_s = 6\pi\eta rv$$

Kecepatan terminal yang dialami benda ketika bergerak dalam fluida yang memiliki viskositas adalah

$$v_t = \frac{g v_b (\rho_b - \rho_f)}{6\pi\eta r}$$

7. Pada fluida yang bergerak, berlaku:

- a. Persamaan Kontinuitas:

$$Q_1 = Q_2$$

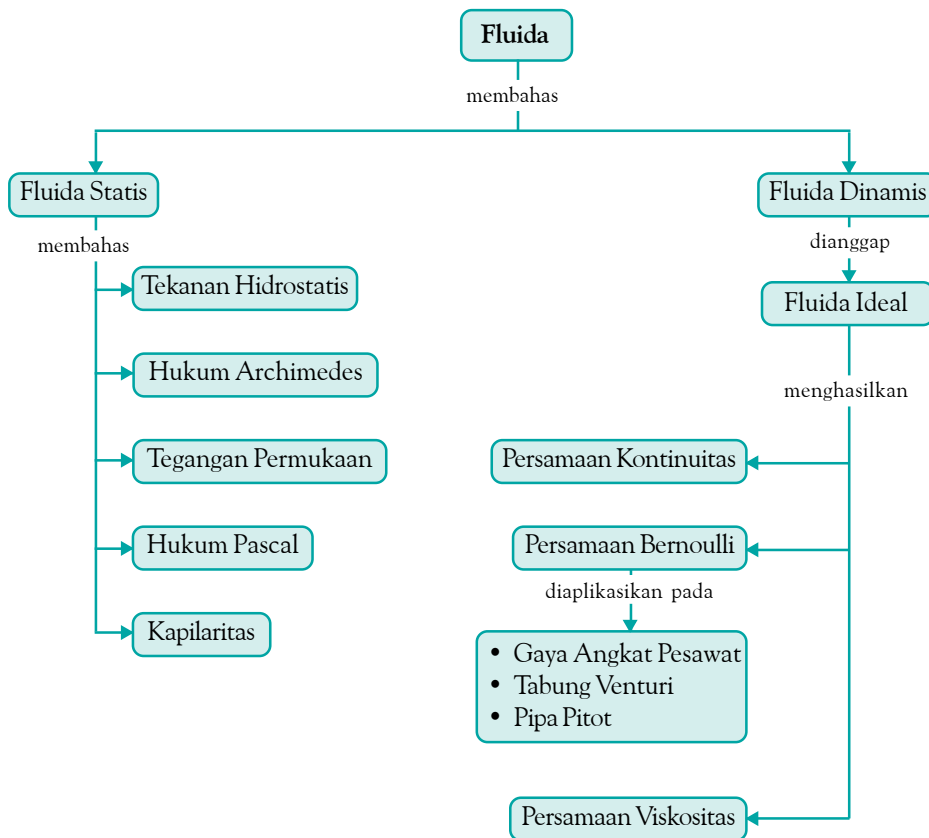
- b. Hukum Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{konstan}$$

8. Hukum Bernoulli dimanfaatkan pada:

- a. alat penyemprot obat nyamuk
- b. daya angkat pada sayap pesawat terbang;
- c. karburator;
- d. pipa venturi;
- e. venturimeter dengan manometer; dan
- f. pipa pitot.

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu dapat mengetahui konsep tekanan pada zat cair, hukum-hukum yang berlaku baik pada zat cair yang diam maupun pada zat cair yang bergerak. Dari materi-materi yang ada pada bab ini, bagian manakah yang menurut Anda paling sulit

dipahami? Coba Anda diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Dalam bab ini, dijelaskan pula beberapa manfaat dari konsep yang dibahas. Coba sebutkan manfaat yang Anda peroleh setelah mempelajari materi pada bab ini.

Tes Kompetensi Bab 6

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

1. Sekeping mata uang logam jika dicelupkan dalam fluida A dengan $\rho_A = 0,8 \text{ g/cm}^3$ mengalami gaya ke atas sebesar F_A . Jika dicelupkan dalam fluida B dengan $\rho_B = 0,7 \text{ g/cm}^3$, mengalami gaya Archimedes sebesar F_B . Perbandingan kedua gaya tersebut, yaitu $F_A : F_B$ bernilai

- a. $\frac{8}{14}$ d. $\frac{7}{8}$
 b. $\frac{4}{7}$ e. $\frac{8}{7}$
 c. $\frac{7}{6}$

2. Hidrometer adalah alat untuk mengukur
 a. kecepatan zat cair d. kedalaman zat cair
 b. kecepatan gas e. massa jenis zat cair
 c. kekentalan zat cair

3. Sepotong kayu terapung pada permukaan air. Jika $\frac{2}{5}$ bagian volumenya timbul di atas permukaan air ($\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$), massa jenis kayu tersebut adalah

- a. 500 kg/m^3 d. 1.000 kg/m^3
 b. 600 kg/m^3 e. 1.200 kg/m^3
 c. 750 kg/m^3

4. Pipa U mula-mula diisi air raksa yang memiliki massa jenis $13,6 \text{ g/cm}^3$. Kaki kiri pipa U tersebut diisi dengan cairan setinggi 20 cm sehingga perbedaan permukaan air raksa kedua kaki 10 cm. Massa jenis cairan tersebut adalah

- a. $7,8 \text{ g/cm}^3$ d. $0,68 \text{ g/cm}^3$
 b. $6,8 \text{ g/cm}^3$ e. $0,58 \text{ g/cm}^3$
 c. $5,8 \text{ g/cm}^3$

5. Besarnya gaya ke atas yang dialami oleh sepotong tembaga bervolume 200 cm^3 dan berada di dalam minyak yang massa jenisnya $0,8 \text{ g/cm}^3$ adalah

- a. 20 N d. 1,2 N
 b. 16 N e. 1,6 N
 c. 12 N

6. Pengisap P memiliki luas penampang $7,5 \text{ m}^2$ yang bergerak bebas tanpa gesekan sehingga dapat menekan pegas sejauh x . Jika nilai konstanta pegas = 7.500 N/m dan massa jenis zat cair 500 kg/m^3 , panjang x =

- a. 0,4 m d. 0,7 m
 b. 0,5 m e. 1 m
 c. 0,6 m

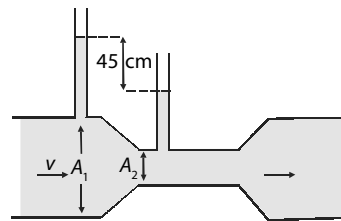
7. Sebuah akuarium diisi air melalui sebuah keran yang debitnya $0,5 \text{ liter per sekon}$. Ternyata, ada lubang yang luasnya $1,25 \text{ cm}^2$ tepat di dasar kaca akuarium. Tinggi air maksimum dalam akuarium tersebut adalah

- a. 20 cm d. 80 cm
 b. 40 cm e. 100 cm
 c. 60 cm

8. Sebuah benda terapung di atas permukaan air yang dilapisi minyak. Sebanyak 50 % volume benda berada di dalam air, 30% di dalam minyak, dan sisanya berada di atas permukaan minyak. Jika massa jenis minyak = $0,8 \text{ g/cm}^3$, massa jenis benda tersebut adalah

- a. $0,62 \text{ g/cm}^3$ d. $0,78 \text{ g/cm}^3$
 b. $0,68 \text{ g/cm}^3$ e. $0,82 \text{ g/cm}^3$
 c. $0,74 \text{ g/cm}^3$

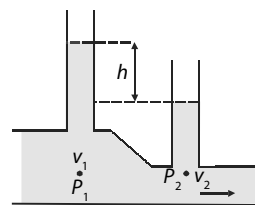
9. Air mengalir melewati pipa venturimeter seperti pada gambar berikut ini.



Jika luas penampang A_1 dan A_2 masing-masing 5 cm^2 dan 4 cm^2 , dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, kecepatan air (v) yang memasuki pipa venturimeter adalah

- a. 3 m/s d. 9 m/s
 b. 4 m/s e. 25 m/s
 c. 5 m/s

10. Perhatikan gambar berikut ini.



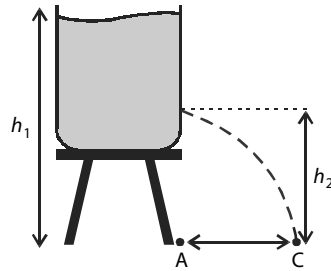
Tekanan di pipa 1 dan pipa 2 berturut-turut p_1 dan p_2 . Adapun v_1 dan v_2 merupakan kecepatan aliran air pada pipa 1 dan 2. Jika selisih tinggi permukaan air pada pipa 1 dan 2 sebesar h dan massa jenis air sebesar ρ , diperoleh hubungan

- a. $v_1 - v_2 = \rho gh$ d. $p_1 + p_2 = \rho gh$
 b. $p_1 - p_2 = \rho gh$ e. $v_2 - v_1 = \rho gh$
 c. $p_2 - p_1 = \rho gh$

11. Sebuah pipa kapiler yang berdiameter $0,66 \text{ mm}$ dimasukkan tegak lurus ke dalam bejana yang berisi raksa (massa jenis $\rho = 13,62 \text{ g/cm}^3$). Sudut kontak antara raksa dengan pipa adalah 143° ($\sin 37^\circ = 0,6$). Jika tegangan permukaan zat cair adalah $0,48 \text{ N/m}$, penurunan ketinggian raksa dalam pipa kapiler dihitung dari permukaan zat cair dalam bejana ($g = 10 \text{ m/s}^2$) adalah

- a. 120 cm d. 2,27 cm
 b. 1,66 cm e. 3,00 cm
 c. 2,00 cm

12. Sebuah logam berbentuk bola berjari-jari 0,8 cm bergerak vertikal ke bawah dengan kelajuan tetap sebesar 0,5 cm/s. Jika massa jenis fluida 700 kg/m³, massa jenis bola $1,4 \times 10^3$ kg/m³, dan percepatan gravitasi Bumi 10 m/s², koefisien viskositas fluida tersebut adalah
- 18,8 Pa s
 - 19,9 Pa s
 - 199 Pa s
 - 1,99 Pa s
 - 0,199 Pa s
13. Diketahui garis tengah tetes air hujan 0,5 mm, massa jenis udara 1,30 kg/m³, dan koefisien viskositas udara $1,80 \times 10^{-5}$ Pas. Jika $g = 10$ m/s², kecepatan terminal setelah air hujan yang jatuh adalah
- 2,5 m/s
 - 5 m/s
 - 7,7 m/s
 - 7,7 m/s
 - 15 m/s
14. Sebuah neraca pegas dipakai untuk menimbang benda A. Di udara, neraca menunjukkan skala 12 N. Setelah benda dimasukkan ke dalam air ($\rho = 1$ g/cm³), neraca menunjukkan angka 8 N. Volume benda tersebut adalah
- 4×10^{-4} m³
 - 5×10^{-4} m³
 - 6×10^{-4} m³
 - 7×10^{-4} m³
 - 8×10^{-4} m³
15. Serangga dapat berdiri di atas permukaan air akibat adanya
- gaya Archimedes
 - gaya Pascal
 - tegangan permukaan
 - gaya regangan
 - sifat kapilaritas
16. Pesawat terbang dapat mengangkasa karena
- gaya angkat mesin pesawat terbang
 - titik berat pesawat terbang di belakang
 - perbedaan tekanan aliran udara di atas dengan di bawah pesawat terbang
 - perubahan momentum pesawat terbang
 - berat udara yang dipindahkan lebih besar daripada berat pesawat terbang
17. Sebuah pesawat terbang dengan luas penampang sayap 20 m² bergerak sehingga menghasilkan perbedaan kecepatan aliran udara pada bagian atas sayap pesawat dan bagian bawahnya, masing-masing besarnya 250 m/s dan 200 m/s. Besarnya gaya angkat pesawat jika massa jenis udara 1,3 kg/m³ adalah
- 292,5 N
 - 2.925 N
 - 29.250 N
 - 292.500 N
 - 2.925.000 N
18. Luas penampang keran pada sebuah bak adalah 4 cm². Dalam 10 detik, air yang tertampung di bak tersebut adalah 100 liter. Kecepatan rata-rata air yang keluar dari keran tersebut adalah
- 5 m/s
 - 10 m/s
 - 15 m/s
 - 20 m/s
 - 25 m/s
19. Perhatikan gambar berikut.



Jika $h_1 = 1,6$ m, $h_2 = 0,8$ m, dan air jatuh di C, jarak antara titik A dan C = ... m

- 1,6
 - 1,8
 - 2,0
 - 2,2
 - 2,4
20. Sebuah pipa yang luas penampangnya masing-masing 10 cm² dan 16 cm² dialiri air. Laju aliran air pada penampang yang besar adalah 5 m/s, laju aliran pada penampang yang kecil adalah
- 0,3125 m/s
 - 3,125 m/s
 - 31,25 m/s
 - 312,5 m/s
 - 3125 m/s

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

- Suatu sistem penyediaan air harus mampu menyuplai air sampai pada ketinggian 50 m secara tegak lurus. Berapakah tekanan yang diperlukan untuk mencapai ketinggian tersebut?
- Berat sebuah benda di udara 3.000 N. Jika ditimbang di dalam air, beratnya 200 N. Kemudian, benda tersebut ditimbang di dalam minyak ($\rho = 0,7$ g/cm³).
 - Berapakah volume benda tersebut?
 - Berapakah berat benda di dalam minyak?
- Pada sebuah kolam yang bagian dasarnya berukuran $0,5 \times 1$ m dituangkan 2 m³ air ($\rho = 1$ g/cm³).
 - Berapakah tinggi air di dalam kolam itu?
 - Berapakah gaya yang bekerja pada dasar kolam?
 - Berapakah gaya yang bekerja pada setiap dinding kolam?
- Perbedaan tinggi air raksa dalam manometer sebuah venturimeter adalah 5 cm. Jika luas penampang pipa besar 100 cm² dan pipa kecil 1 cm², $\rho_{\text{air}} = 10^3$ kg/m³, dan massa jenis air raksa $13,6 \times 10^3$ kg/m³, $g = 10$ m/s², hitunglah kecepatan aliran air saat itu.
- Sebuah kolam dengan volume 5 m³ dalam keadaan kosong dialiri air lewat selang plastik yang berpenampang 4 cm². Jika air mengalir dengan kecepatan 10 m/s, setelah berapa detiklah kolam tersebut penuh?

Bab 7



Sumber: www.dailytimes.com.pk

Balon udara dapat terbang karena di dalamnya berisi udara panas yang lebih ringan daripada udara di sekitarnya.

Teori Kinetik Gas

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep termodinamika dalam mesin kalor.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik.

Lebih dari seabad yang lalu, balon udara dibuat sebagai sarana transportasi. Tahukah Anda, bagaimana prinsip kerja balon udara? Prinsip kerja balon udara agar dapat terbang sangat sederhana, yaitu dengan memanfaatkan massa jenis gas dan energi kinetik yang dimiliki gas.

Pada bab ini, Anda akan mempelajari teori kinetik gas yang menerangkan tentang sifat-sifat gas berdasarkan gerak acak partikel-partikelnya yang berlangsung terus menerus. Adapun gas yang akan dibahas adalah gas ideal, yaitu gas yang secara tepat memenuhi hukum-hukum gas. Selain itu, Anda akan mempelajari prinsip ekuipartisi energi dan kecepatan efektif dari partikel gas.

- A. Gas Ideal**
- B. Prinsip Ekuipartisi Energi**
- C. Kecepatan Efektif Partikel Gas**

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Teori Kinetik Gas, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Sebutkan contoh gas yang terdapat di atmosfer? Apakah gas tersebut termasuk gas ideal?
2. Apakah yang dimaksud dengan molaritas gas?
3. Mengapa balon udara dapat terbang? Bagaimana cara mengendalikan balon udara agar dapat bergerak naik, turun, dan berbelok?
4. Apa pengertian dari energi dalam gas?

A. Gas Ideal

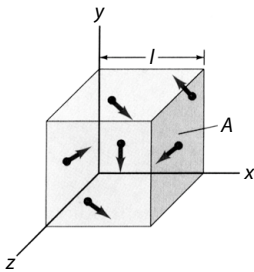
Tahukah Anda yang dimaksud dengan gas ideal? Bagaimanakah bentuk dari persamaan gas ideal? Untuk mengetahuinya, pelajilah uraian berikut secara saksama.

1. Pengertian Gas Ideal

Dalam bab ini, Anda akan mempelajari teori kinetik gas pada gas ideal. Pada kenyataannya, sifat-sifat gas ideal tidak terdapat di alam. Akan tetapi, pada suhu kamar dan tekanan tertentu, gas dapat memiliki sifat yang mendekati gas ideal.

Secara mikroskopis, gas ideal memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

- a. Gas terdiri atas partikel-partikel dalam jumlah yang besar dan tidak terjadi interaksi antarpartikel gas tersebut.
- b. Setiap partikel selalu bergerak ke sembarang arah.
- c. Partikel-partikel gas tersebar merata dalam ruang yang sempit.
- d. Jarak antarpartikel jauh lebih besar daripada ukuran partikel.
- e. Ukuran partikel gas dapat diabaikan.
- f. Tidak terdapat gaya antarpartikel kecuali jika terjadi tumbukan.
- g. Hukum Newton tentang gerak berlaku pada sistem gas tersebut.



Gambar 7.1
Gerak arah partikel-partikel gas dalam ruang tertutup.

2. Persamaan Gas Ideal

Robert Boyle (1627–1691), seorang ilmuwan Prancis, melakukan percobaan dan pengamatan untuk mengetahui hubungan antara tekanan dan volume gas dalam suatu ruang tertutup pada suhu konstan. Hubungan tersebut diungkap pada tahun 1666 dan dikenal dengan Hukum Boyle.

Hukum Boyle menyatakan bahwa jika dalam suatu ruang tertutup terdapat gas ideal yang suhunya diusahakan tetap, tekanan gas akan berbanding terbalik dengan volume gas. Menurut Boyle, persamaan keadaan gas hanya ditentukan oleh tekanan (p) dan volume (V) gas sehingga pada gas akan berlaku persamaan

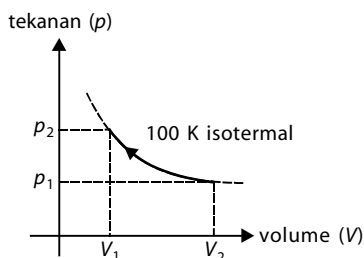
$$pV = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (7-1)$$

Keterangan:

p = tekanan (N/m^2 atau Pa)

V = volume (m^3)

Persamaan (7-1) dikenal sebagai Hukum Boyle dan berlaku untuk hampir semua gas dengan kerapatan rendah. Grafik hubungan antara tekanan dan volume gas tampak pada **Gambar 7.2**. Jika tekanan diturunkan, volume gas akan naik. Sebaliknya, jika tekanan gas dinaikkan, volume gas akan mengecil, dengan syarat suhu gas tetap.



Gambar 7.2
Grafik hubungan tekanan (p) terhadap volume (V) pada suhu konstan.

Charles (1746–1823) dan Joseph Gay Lussac (1778–1850) melakukan pengamatan dengan percobaan tentang hubungan antara suhu dan volume pada tekanan tetap. Mereka mengatakan, jika tekanan gas dalam ruang tertutup dijaga konstan, volume gas sebanding dengan suhu mutlak. Secara matematis, dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (7-2)$$

Keterangan:

V = volume (m^3)

T = suhu mutlak (K)

Jika suhu gas biasanya dinyatakan dalam $t^\circ\text{C}$, suhu mutlak T menggunakan satuan Kelvin (K) dinyatakan dengan persamaan

$$T = t + 273 \quad (7-3)$$

Charles dan Gay Lussac juga berhasil menyelidiki hubungan antara suhu dan tekanan pada volume tetap. Keduanya mengatakan, jika volume gas yang berada dalam ruang tertutup dijaga konstan, tekanan gas sebanding dengan suhu mutlak. Secara matematis, dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{p}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (7-4)$$

Berdasarkan **Persamaan (7-2)** dan **(7-4)**, pada kerapatan rendah, hasil kali pV sebanding dengan temperatur T , sesuai dengan persamaan

$$pV = CT \quad \text{atau} \quad \frac{pV}{T} = C \quad (7-5)$$

dengan C adalah konstanta kesebandingan yang sesuai dengan satu macam gas tertentu.

Jika indeks 1 digunakan untuk nilai p , V , dan T awal, sedangkan indeks 2 digunakan untuk nilai p , V , dan T akhir, diperoleh persamaan berikut.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (7-6)$$

Persamaan (7-5) dan **(7-6)** disebut persamaan **Hukum Boyle-Gay Lussac**.

Hukum Boyle-Gay Lussac berlaku untuk gas ideal yang massa dan jumlah mol gasnya tetap. Jika massa dan jumlah mol gasnya tidak tetap, persamaan keadaan gas ideal berubah menjadi

$$\frac{pV}{T} = C \quad \text{dengan} \quad C = nR$$

$$\frac{pV}{T} = nR \quad \text{atau} \quad pV = n R T \quad (7-7)$$

Keterangan:

n = jumlah mol gas

R = 8,314 J/molK (tetapan umum gas)

Jumlah mol gas (n) merupakan perbandingan antara massa gas dengan massa molekul relatifnya (M). Secara matematis, jumlah mol gas (n) dapat dinyatakan dengan persamaan

$$n = \frac{m}{M} \quad \text{atau} \quad m = nM \quad (7-8)$$



Tokoh

Joseph Louis Gay Lussac (1778–1850)

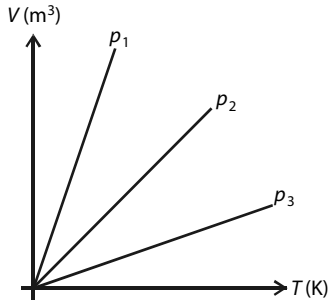


Sumber: *Jendela Iptek* 3, 1997

Ia dilahirkan di Prancis tahun 1778. Setahun setelah lulus dari politeknik Paris, ia ditawarkan pekerjaan oleh Claude-Louis Berthollet, kimiawan Prancis yang terkemuka. Berthollet memiliki laboratorium sendiri dan memimpin sekelompok ilmuwan muda di daerahnya. Gay Lussac mengadakan banyak riset bersama Berthollet dan Pierre Simon Laplace, dua ilmuwan yang dibiayai dan dilindungi oleh Napoleon Bonaparte. Gay-Lussac selamat dari arus revolusi Prancis, tetapi ayahnya tertangkap dan dipenjarakan. Pada 1802, ia mengulangi percobaan Alexander Cesar Charles. Ia menemukan fakta bahwa jika gas dipanaskan pada suhu tetap, volumenya akan bertambah sebanding dengan suhu mutlak. Jika suhunya dinaikkan dua kali lipat, volumenya akan meningkat dua kali. Hukum ini kali pertama ditemukan oleh Charles. Akan tetapi, karena Charles tidak mempublikasikannya, hukum tersebut kadang-kadang disebut hukum Charles, kadang-kadang disebut Hukum Gay-Lussac.

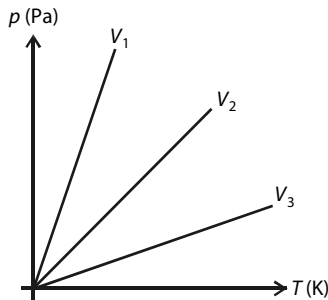
Jika **Persamaan (7-8)** disubstitusikan ke dalam **Persamaan (7-7)**, akan diperoleh persamaan berikut.

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (7-9)$$



Gambar 7.3

Grafik hubungan volume (V) terhadap suhu mutlak (T) secara isobarik dengan $p_1 > p_2 > p_3$.



Gambar 7.4

Grafik hubungan tekanan (p) terhadap suhu mutlak secara isokhorik dengan $V_1 > V_2 > V_3$.



Pada suhu kamar dan tekanan tertentu, gas dapat memiliki sifat yang mendekati gas ideal.

Dari **Persamaan (7-9)**, dapat ditentukan massa jenis (ρ) suatu gas, yaitu

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT} \quad (7-10)$$

Selain dapat dinyatakan dalam jumlah mol, persamaan umum gas ideal juga dapat dinyatakan dalam jumlah partikel gas tersebut (N). Jumlah partikel gas merupakan hasil kali jumlah mol gas tersebut dengan bilangan Avogadro.

$$N = nN_A$$

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (7-11)$$

Jika **Persamaan (7-11)** disubstitusikan ke dalam **Persamaan (7-7)**, akan diperoleh persamaan berikut.

$$pV = \frac{N}{N_A} RT$$

Jika $k = \frac{R}{N_A}$, persamaan tersebut menjadi

$$pV = NkT \quad (7-12)$$

Keterangan:

N = jumlah partikel gas

N_A = bilangan Avogadro = $6,023 \times 10^{23}$ molekul/mol

k = tetapan Boltzman = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

Contoh 7.1

Satu mol gas menempati volume 1 m^3 dan suhu gas pada saat tersebut adalah 127°C . Tentukanlah tekanan gas tersebut.

Jawab:

Diketahui:

$$n = 1 \text{ mol}$$

$$R = 8,314 \text{ J/molK}$$

$$V = 1 \text{ m}^3$$

$$T = 127^\circ\text{C} = (127 + 273) = 400 \text{ K}$$

Dengan menggunakan persamaan $pV = nRT$, diperoleh

$$p(1 \text{ m}^3) = (1 \text{ mol})(8,314 \text{ J/molK})(400 \text{ K}) \Rightarrow p = 3,326 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

Jadi, tekanan gas tersebut adalah $p = 3,324 \times 10^3 \text{ N/m}^2$.

Contoh 7.2

Satu liter gas memiliki tekanan 1 atm pada temperatur -23°C . Berapakah tekanan gas tersebut jika volumenya menjadi 0,5 liter dan temperaturnya menjadi 77°C ?

Jawab:

Diketahui:

$$T_1 = (-23 + 273) = 250 \text{ K}; V_2 = 0,5 \text{ liter}$$

$$T_2 = (77 + 273) = 350 \text{ K}; p_1 = 1 \text{ atm}$$

$$V_1 = 1 \text{ liter}$$

Dengan menggunakan **Persamaan (7-6)**, diperoleh

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{(1 \text{ atm})(1 \text{ L})}{250 \text{ K}} = \frac{p_2 (0,5 \text{ L})}{350 \text{ K}}$$
$$p_2 = 2,8 \text{ atm}$$

Jadi, tekanan gas tersebut adalah 2,8 atm.

Contoh 7.3

Sebuah tabung yang volumenya 1 liter memiliki lubang yang memungkinkan udara keluar dari tabung. Mula-mula suhu udara dalam tabung adalah 27°C. Tabung dipanaskan hingga suhunya menjadi 127°C. Tentukan perbandingan antara massa gas yang keluar dari tabung dan massa awalnya.

Jawab:

Tabung bocor sehingga tekanan tidak berubah (p konstan) meskipun dipanaskan.

$$T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K}, T_2 = 127 + 273 = 400 \text{ K}$$

dengan menggunakan persamaan $pV = \frac{m}{M} RT$ atau $m = \frac{pVM}{R} \times \frac{1}{T}$

Dalam hal ini, $\frac{pVM}{R}$ konstan sehingga $m \sim \frac{1}{T}$

Jika dimisalkan massa awal gas = m_1 dan massa akhir gas dalam tabung adalah m_2 , dapat ditulis

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{300 \text{ K}}{400 \text{ K}} \text{ atau } m_2 = \frac{3}{4} m_1.$$

Oleh karena massa gas yang tersisa $m_2 = \frac{3}{4} m_1$, berarti telah keluar gas sebanyak Δm ,

$$\text{yaitu } \Delta m = m_2 - m_1 = \frac{1}{4} m_1.$$

Dengan demikian, perbandingan antara massa gas yang keluar dan massa gas awalnya

$$\text{adalah } \frac{\Delta m}{m_1} = \frac{1}{4}.$$

Kata Kunci

- gas ideal
- jumlah mol

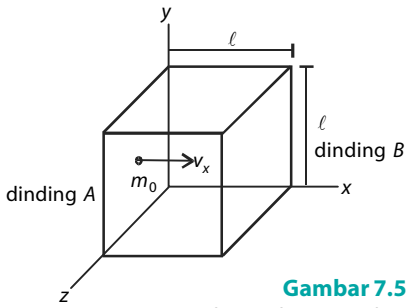
Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Satu mol gas menempati volume 200 dm³. Suhu gas pada saat itu 127°C. Tentukanlah tekanan gas tersebut.
2. Satu liter gas pada tekanan 1 atmosfer memiliki temperatur 27°C. Berapakah tekanan gas tersebut jika volumenya diubah menjadi 0,5 liter dan temperaturnya menjadi 77°C?
3. Berapakah volume 8 gram gas helium pada suhu 15°C dan tekanan 480 mmHg? ($M_r = 4 \text{ kg/kmol}$)
4. Sebuah tangki udara yang berisi 20 kg udara pada tekanan 9 atm disimpan di tempat yang bersuhu 6°C. Pada saat dipindahkan ke bengkel yang bersuhu 37°C, katup pengaman pada tangki membebaskan sejumlah udara. Jika katup bekerja ketika udara dalam tabung melebihi 9,5 atm, tentukan massa udara yang dibebaskan?

B. Prinsip Ekuipartisi Energi

Pada bahasan sebelumnya, telah dijelaskan bahwa setiap partikel gas ideal selalu bergerak sehingga menghasilkan energi kinetik. Oleh karena sifat gas ideal ditinjau secara keseluruhan, energi kinetik setiap partikelnya merupakan energi kinetik rata-rata. Hal tersebut menyebabkan timbulnya prinsip ekuipartisi energi.



Gambar 7.5

Tanda panah menyatakan momentum sebuah molekul setelah menumbuk dinding.

1. Tekanan Gas dalam Ruang Tertutup

Perhatikan **Gambar 7.5**. Suatu gas ideal terkandung dalam sebuah kubus yang memiliki panjang rusuk ℓ . Sebuah partikel dari gas ideal tersebut bergerak dalam arah sumbu- x dengan kecepatan v_x dan melakukan gerak bolak-balik dari dinding A ke dinding B, kemudian kembali lagi ke dinding A. Jarak yang ditempuh partikel tersebut adalah 2ℓ . Kecepatan selama bergerak selalu sama karena tumbukan yang terjadi antarpartikel dan dinding diasumsikan sebagai tumbukan lenting sempurna. Waktu tempuh pada gerak bolak-balik tersebut adalah $t = \frac{2\ell}{v_x}$, sedangkan banyaknya tumbukan per satuan waktu yang dibuat oleh partikel dan dinding B adalah $\frac{v_x}{2\ell}$. Adapun perubahan momentum yang dialami molekul dapat dituliskan sebagai berikut.

perubahan momentum = momentum akhir – momentum awal

$$\Delta p = -m_p v_x - m_p v_x$$

$$\Delta p = -2 m_p v_x \quad (7-13)$$

Tanda negatif pada momentum akhir partikel menunjukkan arah gerak partikel setelah tumbukan, yang berlawanan arah dengan arah gerak awalnya. Dari persamaan perubahan momentum tersebut, dapat dicari gaya yang bekerja pada partikel, yaitu perubahan momentum yang dipindahkan oleh partikel ke dinding per satuan waktu.

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$F = \frac{-2m_p v_x}{\frac{2\ell}{v_x}}$$

$$F = \frac{-m_p v_x^2}{\ell} \quad (7-14)$$

Pada kenyataannya, partikel yang menumbuk dinding tidak hanya satu partikel, tetapi sejumlah N partikel. Oleh karena itu, gaya yang diterima dinding akibat tumbukan N partikel adalah

$$F_x = \frac{-N m_p v_x^2}{\ell} \quad (7-15)$$

Tanda negatif pada **Persamaan (7-15)** hanya menunjukkan arah gayanya saja. Jika Anda hanya ingin mengetahui besarnya, tanda negatif tersebut dapat dihilangkan. Untuk mengetahui tekanan yang dialami dinding tabung, persamaan tersebut dibagi dengan luas permukaan kubus (A). Hal tersebut dikarenakan tekanan merupakan perubahan momentum yang dipindahkan oleh sejumlah partikel ke dinding per satuan waktu untuk setiap satuan luas.

$$p_x = \frac{F_x}{A} = \frac{N m_p v_x^2}{\ell A}$$

Oleh karena $\ell A = \text{volume } (V)$, akan didapatkan persamaan

$$p_x = \frac{N m_p v_x^2}{V} \quad (7-16)$$

p_x adalah tekanan pada dinding untuk sumbu- x . Dengan cara yang sama, tekanan gas pada dinding tegak yang searah sumbu- y dan sumbu- z dirumuskan sebagai berikut.



Tantangan untuk Anda



Sumber: *Fundamentals of Physics*, 2001

Pernahkah Anda minum minuman bersoda? Ketika Anda membuka tutup botolnya, akan terbentuk kabut tipis di sekitar tutup botol tersebut. Mengapa hal ini terjadi?

$$p_y = \frac{Nm_p v_y^2}{V} \quad \text{dan} \quad p_z = \frac{Nm_p v_z^2}{V}$$

Untuk mengetahui resultan dari tekanan p , harus dicari terlebih dahulu resultan kecepatannya. Menurut kaidah vektor, besar resultan kecepatan adalah sebagai berikut.

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad \text{dengan} \quad v_x^2 = v_y^2 = v_z^2$$

maka

$$v^2 = 3 v_x^2$$

$$v_x^2 = \frac{1}{3} v^2$$

Dengan demikian, persamaan tekanan gas pada ruang tertutup adalah

$$p = \frac{1}{3} \frac{Nm_p v^2}{V} \quad (7-17)$$

Keterangan:

p = tekanan gas (N/m² atau Pa)

m_p = massa partikel (kg)

N = jumlah partikel

v = kecepatan gerak partikel (m/s)

V = volume gas (m³)

Persamaan tekanan gas dalam ruang tertutup di atas dapat dinyatakan dalam bentuk energi kinetik rata-rata (\bar{E}_k) dari partikel gas, yaitu

$$\bar{E}_k = \frac{1}{2} m_p \bar{v}^2$$

$$m_p \bar{v}^2 = 2 \bar{E}_k$$

Jadi,

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k \quad (7-18)$$

Keterangan: \bar{E}_k = energi kinetik rata-rata satu partikel gas (joule).

Contoh 7.4

Jika kecepatan partikel gas menjadi dua kali kecepatan semula, tentukanlah besarnya tekanan yang dihasilkan.

Jawab:

Hubungan tekanan (p) terhadap kelajuan (v) adalah $p = \frac{1}{3} \frac{Nm_p v^2}{V}$

Oleh karena nilai $\frac{1}{3} \frac{Nm_p}{V}$ konstan, nilai p sebanding dengan \bar{v}^2 sehingga

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{(2v_1)^2}{v_1^2} = 4$$

Jadi, tekanan gas menjadi empat kali tekanan semula.

Contoh 7.5

Sebuah tabung dengan volume 0,3 m³ mengandung 2 mol Helium pada suhu 27°C. Dengan menganggap Helium sebagai gas ideal, tentukan:

- energi kinetik gas Helium;
- energi kinetik rata-rata setiap mol gas Helium tersebut.

Jawab:

a. Diketahui:

volume tabung $V = 0,3 \text{ m}^3$; $n = 2 \text{ mol}$

$T = (27 + 273) \text{ K}$



Pembahasan Soal

Sebuah ban sepeda memiliki volume 100 cm^3 . Tekanan awal dalam ban sepeda adalah $0,5 \text{ atm}$. Ban tersebut dipompa dengan suatu pompa yang volumenya 50 cm^3 . Jika diasumsikan temperatur tidak berubah, tekanan dalam ban sepeda setelah dipompa 4 kali adalah

- a. $0,1 \text{ atm}$ d. $4,5 \text{ atm}$
 b. $2,5 \text{ atm}$ e. $5,0 \text{ atm}$
 c. $4,0 \text{ atm}$

Soal Tes ITB Tahun 1975

Pembahasan:

Volume ban = $V_1 = 100 \text{ cm}^3$

$p_1 = 0,5 \text{ atm}$

$V_2 = 4 \times 50 \text{ cm}^3 = 200 \text{ cm}^3$

$p_2 = 76 \text{ cmHg} = 1 \text{ atm}$

Setelah pemompaan ban selesai maka akan berlaku:

$$p_{\text{ban}} V_{\text{ban}} = p_1 V_1 + p_2 V_2$$

$$p_{\text{ban}} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_{\text{ban}}}$$

$$= \frac{(0,5 \text{ atm})(100 \text{ cm}^3) + (1 \text{ atm})(200 \text{ cm}^3)}{100 \text{ cm}^3}$$

$$= 2,5 \text{ atm.}$$

Jadi, tekanan ban setelah dipompa sebesar $2,5 \text{ atm}$.

Jawaban: b

Dengan menggunakan **Persamaan (7-18)**, diperoleh

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{E_k} \text{ atau } N \overline{E_k} = \frac{3}{2} pV \Rightarrow N \overline{E_k} = \frac{3}{2} nRT$$

$$N \overline{E_k} = \frac{3}{2} (2 \text{ mol}) (8,314 \text{ J/molK}) (300 \text{ K}) = 7.482,6 \text{ J}$$

Jadi, energi kinetik total gas adalah $7.482,6 \text{ joule}$.

- b. Jumlah molekul gas adalah $N = n N_A$
 $N = (2 \text{ mol}) (6,023 \times 10^{23} \text{ molekul/mol}) = 12,044 \times 10^{23}$

Energi kinetik rata-rata setiap molekul adalah

$$\overline{E_k} = \frac{N \overline{E_k}}{N} = \frac{7.482,6 \text{ J}}{12,044 \times 10^{23}} = 6,23 \times 10^{-21} \text{ joule.}$$

Untuk kasus volume gas tidak diperhitungkan.

2. Energi Kinetik dan Energi Dalam Gas

Dalam tinjauan mikroskopis, partikel-partikel dalam gas selalu bergerak sehingga partikel-partikel tersebut memiliki energi kinetik. Persamaan energi kinetik pada partikel gas ideal dapat diturunkan sebagai berikut.

$$pV = NkT$$

$$p = \frac{1}{3} m v^2 \left(\frac{N}{V} \right)$$

Substitusi dari kedua persamaan tersebut akan menghasilkan persamaan berikut.

$$\frac{NkT}{V} = \frac{1}{3} m v^2 \left(\frac{N}{V} \right)$$

$$\frac{1}{3} m v^2 = kT$$

$$\frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) = kT$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{2}{3} kT$$

$$E_k = \frac{3}{2} kT \quad (7-19)$$

Munculnya faktor pengali 3 pada **Persamaan (7-19)** disebabkan oleh persamaan rata-rata komponen vektor kecepatan.

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad \text{dengan} \quad v_x = v_y = v_z$$

$$v^2 = 3v_x^2.$$

Oleh karena itu, faktor pengali 3 berkaitan dengan derajat kebebasan gerak partikel yang bertranslasi ke arah sumbu-x, y, dan z. **Persamaan (7-19)** berlaku untuk gas monoatomik yang bertekanan rendah. Contoh gas monoatomik adalah helium (He), neon (Ne), dan argon (Ar).

Untuk gas diatomik, seperti H_2 , O_2 , dan N_2 , pada suhu dan tekanan rendah energi kinetiknya $\frac{3}{2} kT$. Akan tetapi, berdasarkan eksperimen, didapatkan bahwa pada suhu sedang energi kinetiknya sebesar $\frac{5}{2} kT$.

Pada suhu dan tekanan tinggi, energi kinetiknya sebesar $\frac{7}{2} kT$. Tahukah Anda, mengapa demikian?

Perhatikan **Gambar 7.6**. Pada gas diatomik, dua atomnya dianggap sebagai bola kecil yang dihubungkan oleh sebuah pegas. Pusat massa partikel melakukan gerak translasi dengan komponen kecepatan pada sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z sehingga memiliki 3 derajat kebebasan untuk gerak translasi (**Gambar 7.6 (a)**).

Pada suhu sedang, partikel gas diatomik, selain melakukan gerak translasi, dapat juga berotasi terhadap sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z, seperti terlihat pada **Gambar 7.6 (b)** dengan energi kinetik E_x , E_y , dan E_z .

Rotasi pada sumbu-x menghasilkan nilai yang sangat kecil karena sumbu rotasi melalui sumbu kedua partikel. Adapun rotasi terhadap sumbu-y dan sumbu-z menghasilkan energi kinetik rata-rata, yaitu $2 \times \frac{1}{2}kT = kT$. Oleh karena itu, pada suhu sedang, partikel gas diatomik melakukan gerak rotasi dan translasi sehingga energi kinetiknya menjadi

$$E_k = \frac{3}{2}kT + kT = \frac{5}{2}kT \quad (7-20)$$

Pada suhu dan tekanan tinggi, partikel gas diatomik dapat melakukan tiga gerakan, yaitu bertranslasi, berotasi, dan bervibrasi. Gerak vibrasi memiliki dua jenis kontribusi energi, yaitu energi kinetik dan energi potensial elastik. Gerak vibrasi tersebut menghasilkan dua derajat kebebasan. Dengan demikian, energi kinetik gas diatomik pada suhu dan tekanan tinggi menjadi

$$E_k = \frac{3}{2}kT + kT + kT = \frac{7}{2}kT \quad (7-21)$$

Dengan demikian, besarnya energi kinetik partikel bergantung pada suhu dan tekanan yang akan memengaruhi gerakan dari partikel tersebut. Pada setiap gerakan (translasi, rotasi, dan vibrasi), setiap partikel memiliki cara untuk menyimpan energinya.

Peninjauan energi kinetik seperti ini dinamakan *prinsip ekuipartisi energi*. Prinsip ini menyatakan bahwa untuk suatu sistem partikel gas pada suhu mutlak T dengan setiap partikelnya memiliki f derajat kebebasan (*degree of freedom*), energi kinetik rata-rata setiap partikel E_k adalah

$$E_k = f \left(\frac{1}{2}kT \right) \quad (7-22)$$

Oleh karena gas terdiri atas N partikel, jumlah seluruh energi kinetik partikel gas dalam suatu ruang tertutup (disebut juga energi dalam gas) dinyatakan dengan persamaan

$$U = NE_k$$

$$U = Nf \left(\frac{1}{2}kT \right) \quad (7-23)$$

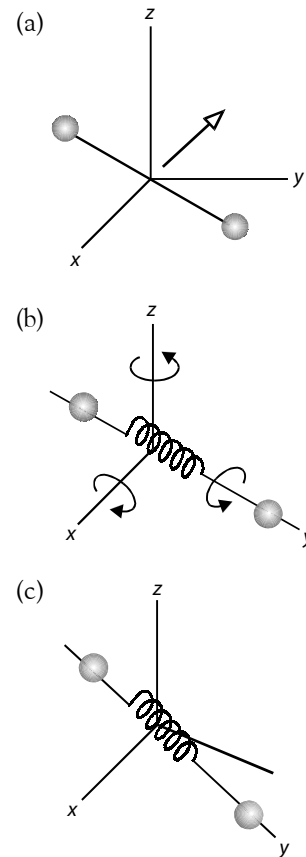
Untuk gas diatomik, seperti gas H_2 , O_2 , dan N_2 memiliki energi dalam (U) sebagai berikut.

1. Pada suhu rendah (>250 K); $f = 3$ (tiga derajat kebebasan)

$$U = NE_k = \frac{3}{2}NkT \quad (7-24)$$

2. Pada suhu sedang (>500 K); $f = 5$ (lima derajat kebebasan)

$$U = NE_k = \frac{5}{2}NkT \quad (7-25)$$



Gambar 7.6
Gerak molekul diatomik:
(a) gerak translasi dari pusat massa;
(b) gerak rotasi terhadap sumbu kartesius; dan
(c) gerak vibrasi sepanjang sumbu molekul.

Ingatlah

- Untuk gas monoatomik, $f = 3$.
- Untuk gas diatomik suhu sedang, $f = 5$.
- Untuk gas diatomik suhu tinggi, $f = 7$.

Kata Kunci

- ekuipartisi energi
- energi dalam gas
- energi kinetik gas
- tekanan gas

3. Pada suhu tinggi ($>1.000\text{ K}$); $f = 7$ (tujuh derajat kebebasan)

$$U = NE_k = \frac{7}{2} N k T \quad (7-26)$$

Jika suatu gas dalam sebuah tabung mengalami perubahan suhu dari T_1 menjadi T_2 , energi dalam gas juga akan mengalami perubahan. Untuk gas monoatomik, berlaku

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R (\Delta T) = \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) \quad (7-27)$$

Secara umum ditulis

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T \quad (7-28)$$

Contoh 7.6

Sebuah tangki berisi 2 mol gas helium bersuhu 20°C . Jika helium dianggap sebagai gas ideal, hitunglah energi total sistem dan juga energi kinetik rata-rata setiap molekul.

Jawab:

Energi total molekul, E , dapat dihitung dengan rumus $\frac{3}{2}nRT$ (karena helium adalah gas monoatomik). Adapun energi rata-rata per molekul, E_k , dapat dihitung dengan rumus $\frac{3}{2}kT$.

Diketahui:

$$n = 2 \text{ mol};$$

$$R = 8,31 \text{ J/molK}$$

$$T = 273 + 20 = 293 \text{ K}$$

$$E = \frac{3}{2} nRT$$

$$= \frac{3}{2} (2 \text{ mol}) (8,314 \text{ J/molK}) (293 \text{ K}) = 7.308 \text{ J}$$

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

$$= \frac{3}{2} (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) (293 \text{ K}) = 6,07 \times 10^{-21} \text{ J}.$$

Contoh 7.7

Tentukan energi dalam dari satu mol gas monoatomik pada suhu 127°C .

Jawab:

Diketahui:

$$n = 1 \text{ mol}$$

$$T = (127 + 273) = 400 \text{ K}$$

$$N_A = 6,023 \times 10^{23} / \text{mol}$$

$$R = 8,314 \text{ J/molK}$$

$$N = n N_A$$

Oleh karena gas monoatomik maka

$$U = \frac{3}{2} nRT = \frac{3}{2} (1 \text{ mol}) (8,314 \text{ J/mol K}) (400 \text{ K})$$

$$U = 4.988,4 \text{ J}.$$

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Dalam suatu ruang, terdapat 4 gram gas O_2 dan 4 gram N_2 . Berat molekul $O_2 = 32$ g/mol dan berat molekul $N_2 = 28$ g/mol. Hitunglah perbandingan energi kinetik translasi rata-rata kedua molekul dan perbandingan antara kecepatan kedua molekul tersebut.
2. Dua mol gas oksigen terdapat pada sebuah bejana bervolume 6 liter dengan tekanan 6 atm. Hitunglah energi kinetik translasi rata-rata dari molekul oksigen pada kondisi tersebut.

(Massa molekul oksigen adalah $5,31 \times 10^{-26}$ kg)

Petunjuk:

Hitung dulu T dengan rumus $pV = nRT$, kemudian gunakan rumus $E_k = \frac{3}{2}kT$. Walaupun oksigen adalah molekul diatomik, di sini digunakan $\frac{3}{2}$, bukan $\frac{5}{2}$ karena yang ditanyakan adalah energi kinetik translasi, bukan energi molekul.

C. Kecepatan Efektif Partikel Gas

Jika dalam suatu ruang tertutup terdapat sebanyak N_1 molekul yang bergerak dengan kecepatan v_1 , N_2 molekul yang bergerak dengan kecepatan v_2 , dan seterusnya, rata-rata kuadrat kecepatan partikel gas v_2 dapat ditulis sebagai berikut.

$$\overline{v^2} = \frac{N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_i v_i^2}{N_1 N_2 + \dots + N_i} = \sum \frac{(N_i v_i^2)}{N_i} \quad (7-29)$$

Kecepatan efektif partikel gas v_{rms} (rms = *root mean square*) didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat kecepatan.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} \text{ atau } v_{\text{rms}}^2 = \overline{v^2} \quad (7-30)$$

Untuk menyatakan kecepatan rata-rata dari partikel gas, tinjaulah hubungan antara energi dalam (U) dan energi kinetik rata-rata partikel gas (E_k), yaitu

$$E_k = \frac{U}{N} \text{ atau } \frac{1}{2} m_p v_{\text{rms}}^2 = \frac{3}{2} kT$$

sehingga diperoleh

$$v_{\text{rms}}^2 = \frac{3kT}{m_p} \text{ atau } v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_p}} \quad (7-31)$$

oleh karena

$$m_p = \frac{M}{N_A} \text{ dan } k = \frac{R}{N_A}$$

Dengan M adalah massa molekul relatif, N_A adalah bilangan Avogadro, dan R adalah konstanta gas. **Persamaan (7-31)** dapat dituliskan sebagai berikut.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (7-32)$$

Jika persamaan $pV = nRT$ disubstitusikan ke **Persamaan (7-32)**, akan didapatkan persamaan berikut.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3pV}{nM}} \quad (7-33)$$

Dengan $m = nM$ sebagai massa total gas dan massa jenis gas $\rho = \frac{m}{V}$ maka **Persamaan (7-33)** dapat ditulis

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \quad (7-34)$$

Pernyataan kecepatan efektif pada **Persamaan (7-34)** menunjukkan bahwa pada suhu tertentu, molekul-molekul gas yang lebih ringan rata-rata bergerak lebih cepat. Gas hidrogen dengan massa molekul 2 g/mol akan bergerak empat kali lebih cepat daripada gas oksigen. Tabel berikut memperlihatkan kecepatan efektif (v_{rms}) beberapa jenis gas pada suhu tertentu.

Tabel 7.1

Kecepatan Efektif Beberapa Gas pada Suhu 20°C

Gas	Massa 1 mol gas (10^{-3} kg/mol)	v_{rms} (m/s)
H ₂	2,02	1.902
He	4,0	1.352
H ₂ O	18	637
Ne	20,1	603
N ₂ atau CO	28	511
NO	30	494
CO ₂	44	408
SO ₂	48	390

Sumber: *Fundamental of Physics*, 2001



Informasi untuk Anda

Energi Matahari berasal dari reaksi fusi nuklir yang berasal dari penggabungan 2 buah proton. Sebenarnya, proton memiliki gaya tolak menolak dengan proton lainnya karena muatannya sejenis. Selain itu, proton tidak memiliki energi kinetik yang cukup besar untuk mengatasi gaya tolak-menolak tersebut. Akan tetapi, ada sebagian proton yang memiliki kecepatan tinggi sehingga memiliki energi kinetik yang cukup besar. Oleh karena itu, Matahari masih bersinar.

Information for You

The suns energy is supplied by nuclear fusion process that starts with the merging of two protons. However, protons have a motion to repel each other because of their electrical charges and protons of average speed do not have enough kinetic energy to overcome the repulsion. Very fast protons with speed can do so, however and for that reason the sun can shine.

Sumber: *Fundamentals of Physics*, 2001

Contoh 7.8

Hitunglah kecepatan efektif gas bermassa jenis 10 kg/m³ yang berada dalam tabung bertekanan 12×10^5 Pa.

Jawab:

Diketahui:

$$\rho = 10 \text{ kg/m}^3; p = 12 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Kecepatan efektif partikel gas dihitung dengan menggunakan **Persamaan (7-34)**.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3(12 \times 10^5 \text{ Pa})}{10 \text{ kg/m}^3}} = \sqrt{36 \times 10^4} \text{ m/s} = 600 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan efektif gas adalah 600 m/s.

Contoh 7.9

Tentukan perbandingan kecepatan efektif antara molekul-molekul gas hidrogen ($M_r = 2$ g/mol) dan gas oksigen ($M_r = 32$ g/mol) pada suhu tertentu.

Jawab:

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

Kecepatan efektif sebanding dengan akar dari kebalikan massa molekul relatifnya. Secara matematis, dituliskan

$$\frac{v_{\text{rms}}(H_2)}{v_{\text{rms}}(O_2)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{M(H_2)}}}{\sqrt{\frac{1}{M(O_2)}}} = \sqrt{\frac{M(O_2)}{M(H_2)}} = \sqrt{\frac{32 \text{ g/mol}}{2 \text{ g/mol}}} = \frac{v_{\text{rms}}(H_2)}{v_{\text{rms}}(O_2)} = 4.$$

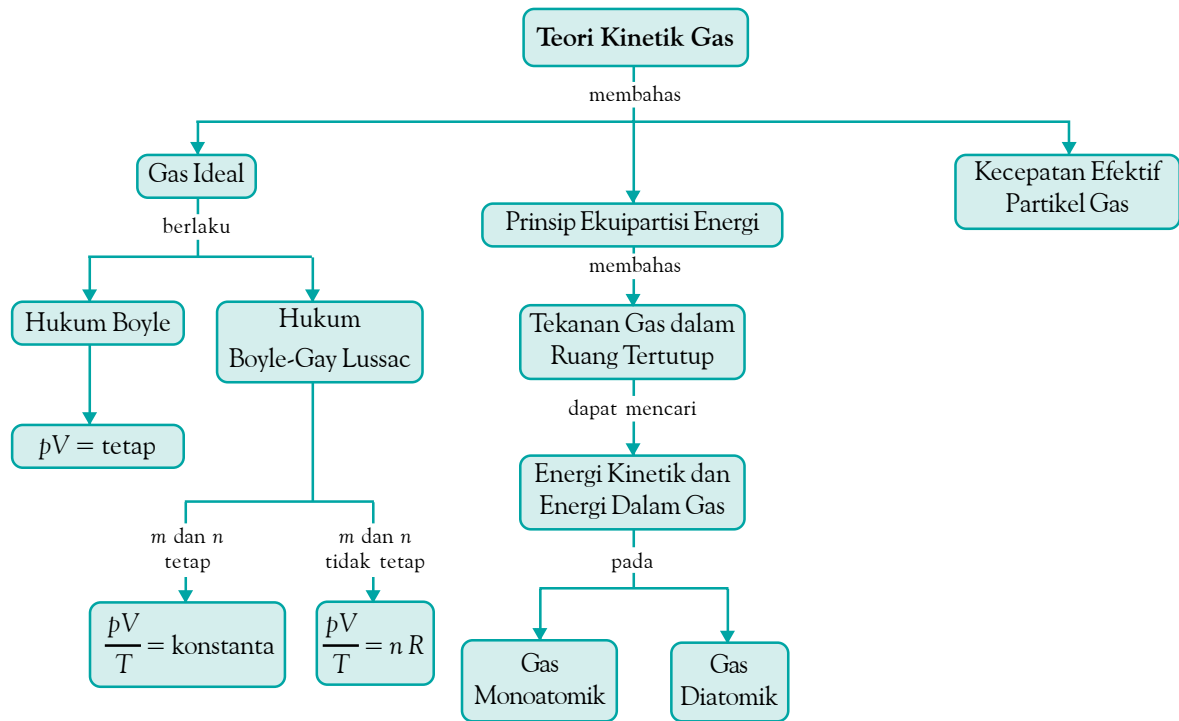
Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah tangki berisi udara pada tekanan tertentu. Jika tekanan udara dalam tangki naik menjadi 2 kali tekanan semula, berapakah kecepatan rms molekul udara dalam tangki dibandingkan dengan kecepatan rms mula-mula?
2. Sebuah tabung dengan volume $0,5 \text{ m}^3$ mengandung 4 mol gas neon pada suhu 77°C .
 - a. Tentukan energi kinetik total gas neon tersebut.
 - b. Berapakah energi kinetik rata-rata setiap mol gas? ($R = 8,314 \text{ J/mol K}$)
3. Sebuah tangki dengan volume 25 liter berisi 2 mol gas monoatomik. Jika setiap molekul gas memiliki energi kinetik rata-rata $2,8 \times 10^{-21} \text{ J}$, tentukan tekanan gas dalam tangki. ($1 \text{ atm} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$)
4. Berapakah energi kinetik rata-rata molekul gas pada suhu 273 K ?
5. Tentukanlah energi dalam dari satu mol gas pada suhu 27°C .
6. Agar kecepatan efektif partikel suatu gas berubah menjadi 2 kali semula, berapa derajat suhu gas tersebut harus ditingkatkan?
7. Berapakah banyaknya atom helium yang diperlukan untuk mengisi balon berdiameter 20 cm pada suhu 20°C agar tekanannya 1 atm? Hitunglah energi kinetik dari setiap atom Helium. Berapakah kecepatan rata-rata dari setiap atom helium dan berapakah kecepatan efektifnya?
8. Kecepatan efektif (v_{rms}) suatu partikel gas = 400 m/s . Jika gas tersebut berada dalam tabung bertekanan 8 atm ($8 \text{ atm} = 8 \times 10^5 \text{ Pa}$), tentukanlah massa jenis gas tersebut.

Rangkuman

1. Gas ideal tidak ada di alam. Suatu gas dapat memiliki sifat yang mendekati sifat gas ideal pada suhu kamar dan tekanan tertentu.
Persamaan gas ideal:
 $pV = \text{konstan}$ atau $p_1 V_1 = p_2 V_2$
Jika massa dan mol gas ideal tidak tetap, persamaan gas ideal berubah menjadi
$$\frac{pV}{T} = nR \text{ atau } pV = nRT$$
dengan $n = \frac{m}{M}$
2. Prinsip ekuipartisi energi menganggap bahwa gas yang berada di dalam ruang tertutup merupakan kumpulan dari partikel gas yang memiliki tekanan, energi, dan kecepatan gerak yang sama.
Persamaan gas dalam ruang tertutup:
$$p = \frac{1}{3} \frac{Nm_p v^2}{V} \text{ atau } p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{E_k}$$
Energi kinetik gas:
$$E_k = \frac{2}{3} kT$$
3. Energi dalam gas adalah jumlah seluruh energi kinetik partikel gas dalam suatu ruang tertutup.
$$U = NE_k = \frac{2}{3} NkT$$
Berikut ini, energi dalam untuk gas diatomik.
 - a. Pada suhu rendah ($>250 \text{ K}$); $f = 3$ (tiga derajat kebebasan).
$$U = NE_k = \frac{3}{2} NkT$$
 - b. Pada suhu sedang ($>500 \text{ K}$); $f = 5$ (lima derajat kebebasan).
$$U = NE_k = \frac{5}{2} NkT$$
 - c. Pada suhu tinggi ($>1.000 \text{ K}$); $f = 7$ (tujuh derajat kebebasan).
$$U = NE_k = \frac{7}{2} NkT$$
4. Kecepatan efektif partikel gas dapat diketahui dengan persamaan:
$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$$



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu akan mengetahui bahwa gas ideal di alam tidak ada. Anda juga tentu menjadi paham tentang prinsip ekuipartisi energi, energi kinetik, dan energi dalam gas, serta kecepatan efektif dari gerak partikel gas. Dari materi yang dipelajari pada bab ini, bagian manakah yang

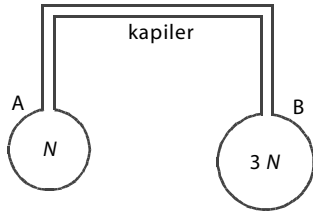
menurut Anda sulit dipahami? Coba diskusikan bersama teman atau guru Fisika Anda.

Anda menjadi tahu alasan mengapa balon gas dapat mengapung merupakan manfaat mempelajari bab ini. Coba Anda cari manfaat lain mempelajari bab ini.

Tes Kompetensi Bab 7

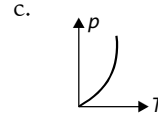
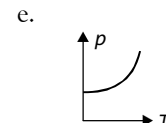
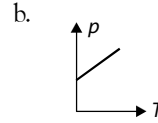
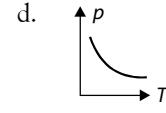
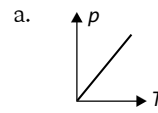
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

- Pada Hukum Boyle, $pV = k$, dengan k adalah
 - daya
 - usaha
 - momentum linear
 - suhu
 - konstanta gas
- Pada gambar berikut, volume tabung B sama dengan 2 kali volume tabung A.



Sistem tersebut diisi dengan gas ideal. Jumlah molekul dalam tabung A sama dengan N dan dalam tabung B adalah $3N$. Jika gas dalam tabung A bersuhu 300 K , suhu gas dalam tabung B adalah

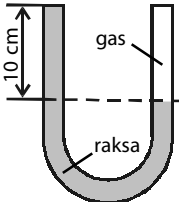
- 100 K
 - 150 K
 - 200 K
 - 450 K
 - 600 K
- Boyle membuat suatu hubungan antara tekanan dan volume dari suatu gas. Jika dinyatakan dalam grafik, akan berbentuk seperti grafik
 -
 -
 -
 -
 -
 - Dalam satuan sistem Internasional, satuan tekanan gas dinyatakan dengan
 - atm
 - N/m
 - N/m^2
 - cmHg
 - joule
 - Gas dalam ruang tertutup bersuhu 42°C dan bertekanan 7 atm , serta volumenya 8 liter . Jika gas dipanaskan sampai 87°C , tekanan naik sebesar 1 atm dan volume gas akan
 - berkurang 10%
 - tetap
 - berkurang 20%
 - bertambah 20%
 - bertambah 12%
 - Grafik antara tekanan gas (p) yang massanya tertentu pada volume tetap sebagai fungsi dari suhu mutlak (T) adalah



- Suatu gas ideal pada tekanan p dan suhu 27°C dimampatkan hingga volumenya menjadi setengah kali semula. Jika suhunya dinaikkan dua kali lipat menjadi 54°C , tekanan gas tersebut menjadi
 - $0,25p$
 - $0,54p$
 - p
 - $2p$
 - $2,18p$
- Suatu gas ideal dimampatkan secara isotermik hingga volumenya menjadi setengah kali volume semula. Akibatnya
 - tekanan dan suhu gas tetap
 - tekanan gas menjadi dua kali dan suhu gas tetap
 - tekanan gas tetap dan suhu gas menjadi dua kali semula
 - tekanan gas dan suhu gas menjadi dua kali suhu semula
 - tekanan gas menjadi dua kalinya dan suhu gas menjadi dua kali suhu semula
- Massa jenis suatu gas ideal pada suhu mutlak T dan tekanan p adalah ρ . Jika tekanan gas tersebut dijadikan $2p$ dan suhunya diturunkan menjadi $0,5T$, massa jenis gas menjadi
 - 4ρ
 - 20ρ
 - $0,50\rho$
 - $0,25\rho$
 - $0,125\rho$
- Sebuah silinder gas memiliki volume $0,040\text{ m}^3$ dan berisi udara pada tekanan $2 \times 10^6\text{ Pa}$. Kemudian, silinder dibuka sehingga berhubungan langsung dengan udara luar. Jika suhu dianggap tidak berubah, volume udara yang keluar dari silinder adalah (tekanan udara luar adalah 1 atm ($1\text{ atm} = 10^5\text{ Pa}$))
 - $0,80\text{ m}^3$
 - $0,36\text{ m}^3$
 - $0,02\text{ m}^3$
 - $0,01\text{ m}^3$
 - $0,036\text{ m}^3$
- Jika Konstanta Boltzman $k = 1,38 \times 10^{-23}\text{ J}$, energi kinetik sebuah atom helium pada suhu 27°C adalah
 - $4,14 \times 10^{-21}\text{ J}$
 - $2,07 \times 10^{-21}\text{ J}$
 - $5,69 \times 10^{-21}\text{ J}$
 - $6,21 \times 10^{-21}\text{ J}$
 - $12,42 \times 10^{-21}\text{ J}$

12. Jika sejumlah gas ideal mengalami proses adiabatik maka
- terjadi perubahan volume pada sistem tersebut
 - terjadi perubahan suhu pada sistem tersebut
 - terjadi perubahan tekanan pada sistem tersebut
 - tidak terjadi pertukaran kalor antara sistem tersebut dengan luar sistem
 - terjadi perubahan jumlah molekul
13. Molekul oksigen ($M_r = 32$) di atmosfer Bumi memiliki kecepatan efektif sekitar 500 m/s. Kecepatan efektif molekul Helium ($M_r = 4$) di atmosfer Bumi adalah
- 180 m/s
 - 1.000 m/s
 - 1.400 m/s
 - 2.000 m/s
 - 4.000 m/s
14. Massa sebuah molekul nitrogen adalah 14 kali massa sebuah molekul hidrogen. Dengan demikian, molekul-molekul nitrogen pada suhu 294 K memiliki laju rata-rata yang sama dengan molekul hidrogen pada suhu
- 10,5 K
 - 42 K
 - 21 K
 - 4.116 K
 - 2.058 K
15. Dalam suatu ruangan, terdapat 800 miligram gas dengan tekanan 1 atm. Kelajuan rata-rata partikel gas tersebut adalah 750 m/s. Jika 1 atm = 10^5 N/m², volume ruangan tersebut adalah
- $1,5 \times 10^{-3}$ m³
 - $2,0 \times 10^{-3}$ m³
 - $6,7 \times 10^{-2}$ m³
 - $1,5 \times 10^{-2}$ m³
 - $6,7 \times 10^{-2}$ m³
16. Jika sejumlah gas yang massanya tetap ditekan pada suhu tetap, molekul-molekulnya akan
- memiliki energi kinetik lebih besar
 - memiliki momentum lebih besar
 - lebih sering menumbuk dinding tempat gas
 - bergerak lebih cepat
 - bergerak lebih lambat
17. Sebuah ban dalam mobil diisi udara. Diketahui volumenya 0,1 m³ dan massanya 1 kg. Ban tersebut digunakan sebagai pelampung di dalam air. Jika massa jenis air 10³ kg/m³ dan $g = 10$ m/s², ban dapat mengapungkan beban maksimum sebesar
- 1.101 kg
 - 1.000 kg
 - 101 kg
 - 100 kg
 - 99 kg
18. Persamaan keadaan gas ideal ditulis dalam bentuk $\frac{pV}{T}$. Bilangan tetap bergantung pada
- jenis gas
 - suhu gas
 - tekanan gas
 - volume gas
 - banyak partikel
19. Pada keadaan normal ($T = 0^\circ\text{C}$ dan $p = 1$ atm), 4 g gas oksigen O₂ ($M_r = 32$) memiliki volume sebesar ($R = 8,314$ J/kmolK; 1 atm = 10^5 N/m²)
- $1,4 \times 10^{-6}$ m³
 - $2,8 \times 10^{-3}$ m³
 - $22,4 \times 10^{-3}$ m³
 - 2,8 m³
 - 22,4 m³
- (UMPTN 1989)
20. Sebuah tabung gas dengan volume tertentu berisi gas ideal dengan tekanan p . Akar nilai rata-rata kuadrat laju molekul gas disebut v_{rms} . Jika ke dalam tabung tersebut dipompakan gas sejenis sehingga tekanannya menjadi $2p$, sedangkan suhunya dibuat tetap, v_{rms} -nya akan menjadi
- $\frac{v_{\text{rms}}}{2}$
 - v_{rms}
 - $\sqrt{2}v_{\text{rms}}$
 - $2v_{\text{rms}}$
 - $4v_{\text{rms}}$

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Dalam suatu tabung tertutup U, terdapat sejenis gas ideal. Jika tekanan udara luar 750 mmHg, volume gas 50 cm³ dan suhunya 30°C, tentukan volume gas tersebut pada keadaan normal (0°C, 760 mmHg).
- 
2. Suatu jenis gas menempati volume 100 cm³ pada suhu 0°C dan tekanan 1 atm. Jika suhunya menjadi 50°C dan tekanan menjadi 2 atm, tentukan volume akhir gas tersebut.
3. Massa jenis suatu gas ideal pada suhu mutlak T dan tekanan p adalah 13 g/cm³. Jika tekanan gas tersebut dijadikan $2p$ dan suhunya turun menjadi 0,5 T , tentukan massa jenis gas tersebut.
4. Sebuah tangki yang volumenya 6 liter, diisi gas hidrogen sehingga tekanannya menjadi 11 atm. Berapakah volume gas pada saat tekanannya 0,5 atm dan suhunya tetap?
5. Gas oksigen pada suhu 47°C memiliki volume 20 liter dan tekanan $2,01 \times 10^5$ N/m². Berapakah volume gas pada saat tekanannya 16×10^4 N/m² dan suhunya 108°C?
6. Dalam suatu tangki yang tertutup, terdapat gas nitrogen ($M_r = 14$ g/mol) sebanyak 100 liter dengan suhu 17°C dan bertekanan 50 atm. Tentukan massa gas tersebut?
7. Sebuah tangki volumenya 6 liter, diisi gas hidrogen sehingga tekanannya menjadi 11 atm. Berapakah volume gas pada saat tekanannya 0,5 atm dan suhunya tetap?

Bab 8



Sumber: *Physics for Scientists and Engineers*, 2000

Kereta uap dapat berjalan dengan memanfaatkan energi uap yang diubah menjadi energi kinetik.

Termodinamika

Hasil yang harus Anda capai:

menerapkan konsep termodinamika dalam mesin kalor.

Setelah mempelajari bab ini, Anda harus mampu:

menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan hukum termodinamika.

Sejalan dengan perkembangan zaman, sarana transportasi yang digunakan manusia terus berkembang. Zaman dahulu, kuda dan kereta kuda menjadi primadona angkutan darat. Saat ini, peranan kuda sebagai alat transportasi darat sudah tergantikan oleh keberadaan motor, mobil, dan kereta. Kelebihan dari sarana transportasi modern ini adalah tenaga yang dihasilkannya lebih besar daripada tenaga kuda. Oleh karena itu, jumlah penumpang dan barang yang dapat diangkut pun semakin banyak.

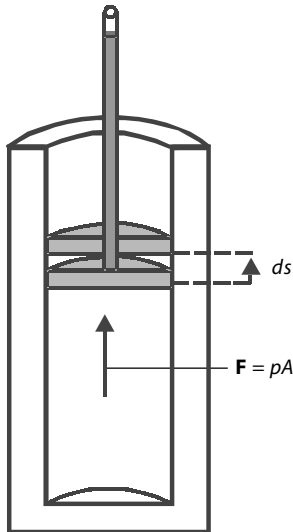
Pada dasarnya, perkembangan sarana transportasi tersebut tidak lepas dari kemajuan teknologi aplikasi prinsip termodinamika. Hampir semua mesin yang ada menggunakan prinsip termodinamika, yaitu mengubah energi kalor menjadi energi gerak.

- A. Usaha pada Berbagai Proses Termodinamika**
- B. Hukum I Termodinamika**
- C. Kapasitas Kalor Gas dan Siklus Termodinamika**
- D. Hukum II Termodinamika**

Tes Kompetensi Awal

Sebelum mempelajari konsep Termodinamika, kerjakanlah soal-soal berikut dalam buku latihan.

1. Mengapa gelas tipis yang biasanya digunakan untuk minum es bisa pecah ketika diisi air panas?
2. Dengan bahasa sendiri, jelaskan cara kerja termos sehingga air bisa tetap panas.
3. Apakah yang dimaksud dengan efisiensi mesin?
4. Menurut Anda, apakah yang dimaksud dengan entropi?



Gambar 8.1

Sistem melakukan usaha terhadap lingkungannya.

A. Usaha pada Berbagai Proses Termodinamika

1. Usaha yang Dilakukan Gas

Tinjaulah sebuah sistem yang dilengkapi dengan sebuah tabung dan pengisap gas yang dapat bergerak bebas seperti tampak pada **Gambar 8.1**. Usaha (W) yang dilakukan oleh gas sehubungan dengan perubahan volume gas adalah sebagai berikut. Jika tekanan gas bekerja pada pengisap, kemudian pengisap bergeser sejauh (s) ke atas dengan luas penampang pengisap (A), usaha (W) yang dilakukan oleh sistem gas terhadap lingkungan adalah

$$dw = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = (pA)(ds) = p(Ads) = pdv$$

$$p = 1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 101.300 \text{ Pa}$$

Untuk proses dari V_1 ke V_2 , usaha (kerja) yang dilakukan oleh gas adalah

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (8-1)$$

$$W = p (V_2 - V_1) = p\Delta V \quad (8-2)$$

Keterangan:

W = usaha yang dilakukan sistem gas

p = tekanan gas (konstan)

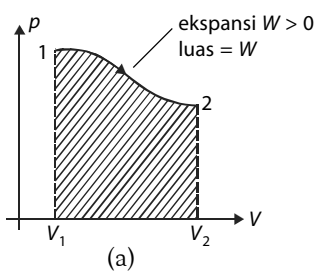
V_1 = volume awal

V_2 = volume akhir

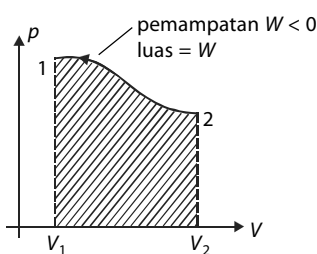
Persamaan (8-2) berlaku hanya jika tekanan (p) konstan. Selama perubahan volume tersebut, usaha (W) dapat bernilai positif atau negatif dengan ketentuan sebagai berikut.

1. Jika gas melakukan ekspansi (pengembangan), usaha (W) bernilai positif. Sistem melakukan usaha yang menyebabkan volumenya bertambah, $V_2 > V_1$.
2. Jika gas dimampatkan, W bernilai negatif. Pada sistem tersebut dilakukan usaha oleh lingkungan yang menyebabkan volumenya berkurang, $V_2 < V_1$.

Usaha yang dilakukan pada sistem disebut *usaha luar*. Luas area di bawah kurva adalah usaha yang dilakukan oleh sistem. Perhatikan **Gambar 8.2**.



(a)



(b)

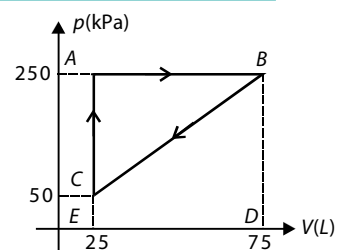
Gambar 8.2

- (a) Usaha yang dilakukan oleh sistem adalah positif ($W = p\Delta V$).
- (b) Usaha yang dilakukan oleh sistem adalah negatif ($W = -p\Delta V$).

Contoh 8.1

Suatu gas dalam silinder tertutup mengalami proses seperti tampak pada gambar. Tentukan usaha yang dilakukan oleh gas pada:

- a. proses AB (W_{AB});
- b. proses BC (W_{BC});
- c. proses CA (W_{CA}); dan
- d. seluruh proses (W_{total}).



Jawab:

- a. Usaha dari A ke B sama dengan luas ABDE dan bernilai positif karena arah proses ke kanan ($V_B > V_A$)
 $W_{AB} = \text{luas ABDE} = AB \times BD = (75 \text{ L} - 25 \text{ L})(250 \text{ kPa})$
 $W_{AB} = (50 \text{ L})(250 \times 10^3 \text{ Pa}) = 12,5 \text{ kJ}.$
- b. Usaha dari B ke C sama dengan luas BCED dan bertanda negatif karena arah proses ke kiri ($V_C > V_B$).
 $W_{BC} = \text{luas BCED} = -\frac{1}{2} (CE + BD)ED$
 $= (-\frac{1}{2})(50 \text{ kPa} + 250 \text{ kPa})(75 \text{ L} - 25 \text{ L}) = -7,5 \text{ kJ}.$
- c. Usaha dari CA sama dengan nol karena CA tidak membentuk bidang dengan sumbu V (luasnya = 0).
- d. Usaha keseluruhan proses (W_{ABCA}) adalah
 $W_{ABCA} = W_{AB} + W_{BC} + W_{CA} = (12.500 - 7.500 + 0) \text{ J} = 5 \text{ kJ}.$
 Usaha total dapat juga dihitung secara langsung.
 $W_{\text{total}} = \text{luas ABCA} = (AC)(\frac{1}{2})(AB)$
 $= (\frac{1}{2})(250 \text{ kPa} - 50 \text{ kPa})(75 \text{ L} - 25 \text{ L}) = 5 \text{ kJ}.$

2. Usaha pada Proses yang Dialami Gas

Gas yang berada dalam ruang tertutup dapat diubah keadaannya melalui beberapa proses, yaitu proses isotermal, proses isokhorik, proses isobarik, dan proses adiabatik.

a. Proses Isotermal

Proses isotermal adalah proses perubahan keadaan sistem pada suhu tetap (**Gambar 8.3**). Proses tersebut sesuai dengan Hukum Boyle, yaitu $pV = \text{konstan}$. Tinjaulah persamaan gas ideal $pV = nRT$. Oleh karena suhu (T), n , dan R tetap maka

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (8-3)$$

Usaha yang dilakukan sistem dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$W = \int p dV, \text{ dengan } p = \frac{nRT}{V}$$

$$= \int \frac{nRT}{V} dV$$

Nilai T , n , dan R konstan sehingga dapat dikeluarkan dari persamaan integral.

$$W = nRT \int \frac{dV}{V} = nRT [\ln V]_{V_1}^{V_2}$$

$$= nRT (\ln V_2 - \ln V_1)$$

Jadi, usaha yang dilakukan oleh sistem pada proses isotermal adalah

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (8-4)$$

Contoh 8.2

Dua mol gas argon memuai secara isotermal pada suhu 27°C , dari volume awal $0,025 \text{ m}^3$ menjadi $0,05 \text{ m}^3$. Tentukan usaha yang dilakukan gas tersebut ($R = 8,31 \text{ J/molK}$).

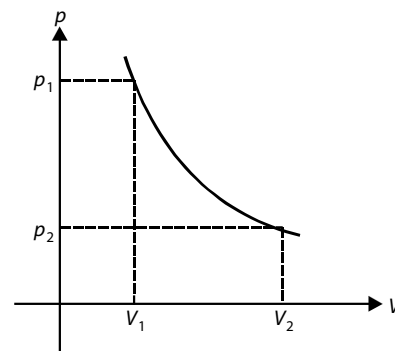
Jawab:

Diketahui:

$$n = 2 \text{ mol};$$

$$\text{Volume awal} = V_1 = 0,025 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume akhir} = V_2 = 0,05 \text{ m}^3$$



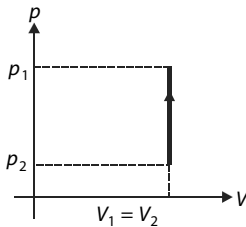
Gambar 8.3

Kurva p - V dengan T konstan pada proses isotermal.



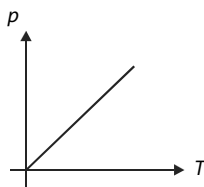
Tantangan untuk Anda

Menurut Anda, benarkah angin itu tidak mendinginkan suhu, melainkan menaikkan suhu di sekitarnya?



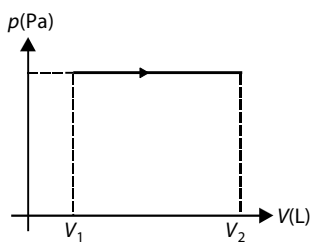
Gambar 8.4

Proses isokhorik pada grafik p - V .



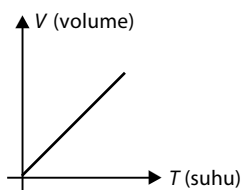
Gambar 8.5

Grafik p - T pada V konstan.



Gambar 8.6

Grafik p - V pada tekanan (p) konstan.



Gambar 8.7

Grafik V - T pada tekanan (p) konstan.

$$R = 8,31 \text{ J/molK};$$

$$T = (27 + 273) \text{ K} = 300 \text{ K}.$$

Usaha yang dilakukan gas pada proses isothermal dapat dihitung dengan Persamaan (8-4).

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

$$= (2 \text{ mol})(8,31 \text{ J/molK})(300 \text{ K}) \ln \left(\frac{0,05 \text{ m}^3}{0,025 \text{ m}^3} \right) = 4,986 \ln 2 = 3,456,03 \text{ joule}.$$

b. Proses Isokhorik

Proses isokhorik adalah proses perubahan keadaan sistem pada volume tetap (Gambar 8.4). Tinjaulah kembali persamaan keadaan gas ideal, $pV = nRT$, volume (V) tetap, $\frac{p}{T} = \frac{nR}{V}$ untuk gas ideal dengan n dan R selalu tetap. Akibatnya, $\frac{p}{T} = \text{konstan}$ atau

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (8-5)$$

Pada proses isokhorik, sistem tidak mengalami perubahan volume ($V_1 = V_2$) sehingga usaha yang dilakukan oleh gas sama dengan nol, yaitu $W = p(\Delta V) = 0$. Perubahan tekanan pada gas akan menyebabkan perubahan suhu gas. Jika suhu gas dinaikkan, tekanan dalam gas akan bertambah, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.5. Volume tidak terpengaruh perubahan tekanan gas.

Contoh 8.3

Sebuah tabung berisi 10 liter gas ideal pada suhu 127°C dan tekanan $2 \times 10^5 \text{ Pa}$. Tabung tersebut dipanaskan hingga mencapai suhu 327°C . Jika volume tabung dibuat tetap, tentukan tekanan gas di dalam tabung.

Jawab:

Diketahui:

$$T_1 = (127 + 273) \text{ K} = 400 \text{ K}; p = 2,0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_2 = (327 + 273) \text{ K} = 600 \text{ K}$$

Persamaan keadaan gas pada proses isokhorik:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow \frac{2 \times 10^5 \text{ Pa}}{400 \text{ K}} = \frac{p_2}{600 \text{ K}} \Rightarrow p_2 = 3 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

c. Proses Isobarik

Proses isobarik adalah proses perubahan keadaan sistem pada tekanan tetap. Pada Gambar 8.6 tampak bahwa perubahan volume tidak menghasilkan perubahan tekanan. Sesuai dengan persamaan gas ideal, $pV = nRT$, tekanan (p) tetap, dan $\frac{V}{T} = \frac{nR}{p}$. Oleh karena n dan R selalu tetap maka

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (8-6)$$

Grafik hubungan antara V dan T untuk proses isobarik tampak pada Gambar 8.7. Pada proses isobarik, tekanan gas diusahakan tetap sehingga perubahan suhu pada gas akan menimbulkan perubahan volume gas untuk mempertahankan agar tekanan gas tetap.

Usaha yang dilakukan gas pada proses isobarik adalah sesuai dengan persamaan berikut.

$$W = p(V_2 - V_1) = p(\Delta V) \quad (8-7)$$

Contoh 8.4

Sejumlah gas dalam ruang tertutup volumenya 3 liter, tekanan 2 atm, dan suhunya 27°C. Gas tersebut dipanaskan dengan tekanan tetap sehingga mencapai suhu 177°C. Tentukan volume gas dan usaha yang dilakukan gas tersebut.

Jawab:

Diketahui:

$$p = 2 \text{ atm}; T_1 = (27 + 273) \text{ K} = 300 \text{ K}$$

$$V_1 = 3 \text{ liter}; T_2 = (177 + 273) \text{ K} = 450 \text{ K}$$

a. Persamaan gas pada tekanan tetap adalah $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

$$\frac{3 \text{ liter}}{300 \text{ K}} = \frac{V_2}{450 \text{ K}} \Rightarrow V_2 = 4,5 \text{ liter.}$$

sehingga volume gas menjadi 4,5 liter.

b. $W = p (V_2 - V_1) = 2 (4,5 - 3) = 3 \text{ joule.}$

d. Proses Adiabatik

Proses adiabatik adalah proses perubahan keadaan sistem tanpa adanya pertukaran kalor dengan lingkungannya, atau tidak ada kalor yang dilepas maupun yang diterima oleh gas tersebut sehingga $Q = 0$.

Grafik pada **Gambar 8.8** menunjukkan bahwa pada proses adiabatik terjadi perubahan suhu, tekanan, dan volume. Proses ini berdasarkan rumus Poisson yang dituliskan $pV^\gamma = \text{konstan}$, atau

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad (8-8)$$

dan $TV^{(\gamma-1)} = \text{tetap}$, atau

$$T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)} \quad (8-9)$$

Dengan $\gamma > 1$ adalah konstanta Laplace yang merupakan perbandingan kapasitas kalor gas pada tekanan tetap C_p dan kapasitas kalor gas pada volume tetap C_v . Secara matematis, besaran tersebut ditulis

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (8-10)$$

Akibat tidak adanya pertukaran kalor dengan lingkungan, usaha yang dilakukan oleh gas hanya mengubah energi dalam. Besarnya usaha tersebut dapat ditentukan dengan merujuk **Persamaan (8-2)** sehingga diperoleh persamaan

$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) \quad (8-11)$$

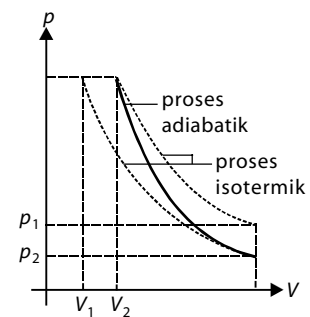
atau

$$W = \frac{3}{2} nR (T_1 - T_2) \quad (8-12)$$

Usaha yang dilakukan oleh gas pada proses adiabatik dapat diperoleh dengan menggunakan **Persamaan (8-11)** dan **Persamaan (8-12)**, jika keadaan awal dan keadaan akhir diketahui. Contoh proses adiabatik dalam kehidupan sehari-hari adalah pemuain gas panas pada mesin diesel dan mesin pendingin.

Contoh 8.5

Gas ideal mengalami ekspansi secara adiabatik. Mula-mula, besar tekanan gas adalah $2 \times 10^5 \text{ Pa}$. Setelah ekspansi tekanan gas menjadi 10^5 Pa . Tentukan volume gas akhir, jika volume gas mula-mula $0,1 \text{ m}^3$ serta konstanta Laplace $\frac{5}{3}$.



Gambar 8.8

Grafik p - V pada proses adiabatik lebih curam daripada proses isotermal.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$; $p_2 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$; $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$

Persamaan gas pada proses adiabatik adalah $p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$

$$(2 \times 10^5)(0,1 \text{ m}^3)^{\frac{5}{3}} = (1 \times 10^5)(V_2)^{\frac{5}{3}} \Rightarrow (V_2)^{\frac{5}{3}} = (2)(0,1)^{\frac{5}{3}}$$

Kedua ruas dipangkatkan $\frac{3}{5}$ sehingga diperoleh

$$\left((V_2)^{\frac{5}{3}} \right)^{\frac{3}{5}} = (2)^{\frac{3}{5}} = \left[(0,1)^{\frac{5}{3}} \right]^{\frac{3}{5}} \Rightarrow V_2 = (2)^{\frac{3}{5}}(0,1) \text{ m}^3$$

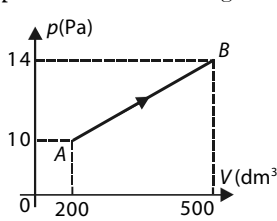
$$V_2 = 0,1515 \text{ m}^3 \Rightarrow V_2 = 0,15 \text{ m}^3$$

Jadi, volume gas setelah ekspansi adalah $0,15 \text{ m}^3$.

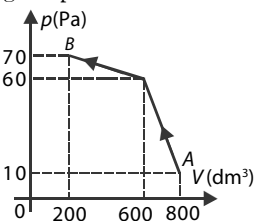
Tes Kompetensi Subbab A

Kerjakanlah dalam buku latihan.

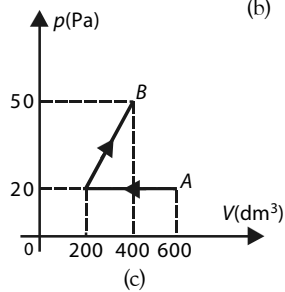
- Sejenis gas bertekanan 5 atm berada dalam wadah yang memiliki volume 500 liter. Hitunglah usaha yang dilakukan oleh gas, jika:
 - gas memuai pada tekanan tetap sehingga volumenya 2,5 kali volume semula; dan
 - gas dimampatkan pada tekanan tetap sehingga volumenya menjadi dua per tiga kali volume semula. ($1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$).
- Tentukanlah usaha yang dilakukan oleh gas untuk proses AB sesuai dengan diagram p - V berikut.



(a)



(b)
- Sebuah tabung dengan volume 5 L berisi gas ideal dengan suhu 100°C dan tekanan $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$. Tabung tersebut dipanaskan hingga mencapai suhu 270°C . Jika volume tabung dianggap tetap, berapa tekanan gas dalam tabung?
- Suatu gas ideal yang volume awalnya $0,344 \text{ m}^3$ diekspansikan sehingga volume akhirnya menjadi $0,424 \text{ m}^3$ pada tekanan tetap 101 kPa.
 - Tentukanlah usaha yang dilakukan oleh gas tersebut dari keadaan awal hingga keadaan akhir.
 - Andaikan proses dapat dibalik dari keadaan akhir ke keadaan awal, berapakah besar usaha yang dilakukan oleh gas?
- Untuk memperkecil volume sebuah gas menjadi setengahnya secara isothermal, diperlukan usaha 500 J. Berapakah usaha yang diperlukan untuk memperkecil volume gas tersebut menjadi sepersepuluh dari volume awal?
- Sebuah mesin gasolin memiliki rasio kompresi, yaitu rasio volume awal terhadap volume akhir sebesar 6,5. Jika suhu campuran bahan bakar udara adalah 30°C dan proses kompresi berlangsung secara adiabatik dengan $\gamma = 1,2$, berapakah suhu campuran bahan bakar tersebut pada kompresi maksimal?



B. Hukum I Termodinamika

Tahukah Anda tentang Hukum I Termodinamika? Untuk mengetahuinya, simaklah uraian berikut ini secara saksama.

1. Pengertian Hukum I Termodinamika

Hukum I termodinamika menjelaskan hubungan antara kalor yang diterima atau kalor yang dilepaskan oleh sistem ke lingkungan dan usaha yang dilakukan oleh sistem, serta perubahan energi dalam yang ditimbulkannya. Misalkan suatu sistem menerima kalor Q maka kalor tersebut tidak hanya digunakan untuk mengubah energi dalam (ΔU), tetapi juga dipakai untuk melakukan usaha (W). Secara keseluruhan, energi tersebut tidak

ada yang hilang. Energi dapat berubah bentuk ke energi lainnya dan jumlah energi total selalu tetap. Berdasarkan hukum kekekalan energi, Hukum I Termodinamika dirumuskan sebagai berikut.

Jika sejumlah kalor yang diberikan kepada sistem, dipakai sebagian oleh sistem untuk melakukan usaha W , selisih energi $Q - W$ sama dengan perubahan energi dalam (U) dari sistem.

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W \quad \text{atau} \quad Q = \Delta U + W \quad (8-13)$$

Untuk lebih memahami Hukum I Termodinamika tersebut, perhatikan **Gambar 8.9**.

Perjanjian tanda untuk Q dan W pada **Gambar 8.9** adalah sebagai berikut.

- Jika sistem melakukan usaha, nilai W bertanda positif ($+W$)
- Jika sistem menerima usaha, nilai W bertanda negatif ($-W$)
- Jika sistem menerima kalor, nilai Q bertanda positif ($+Q$)
- Jika sistem melepaskan kalor, nilai Q bertanda negatif ($-Q$)

Energi dalam suatu gas ideal merupakan ukuran langsung dari suhu dan tekanan. Perubahan energi dalam (ΔU) hanya bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir, tidak bergantung pada proses bagaimana keadaan sistem berubah. Untuk gas monoatomik dengan derajat kebebasan ($f = 3$), perubahan energi dalam dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_2 - U_1 = \frac{3}{2}Nk(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}Nk(\Delta T) \\ \Delta U &= U_2 - U_1 = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}nR(\Delta T) \\ \Delta U &= U_2 - U_1 = \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1) = \frac{3}{2}\Delta(pV) \end{aligned} \quad (8-14)$$

Untuk gas diatomik dan poliatomik, faktor 3 pada **Persamaan (8-14)** diganti dengan derajat kebebasan yang dimiliki gas tersebut.

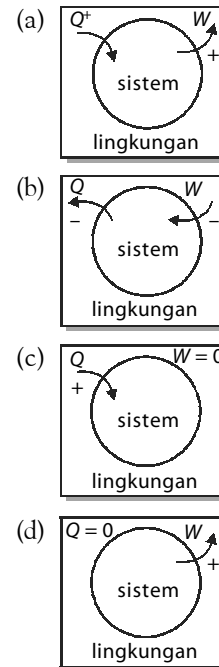
Contoh 8.6

Suatu sistem menyerap kalor Q dari lingkungan sebesar 1.800 J. Tentukan perubahan energi dalam (ΔU), jika:

- sistem melakukan usaha 2.600 J terhadap lingkungan;
- lingkungan melakukan usaha 2.600 J terhadap sistem.

Jawab:

- Sistem menerima kalor $Q = +1.800$ J dan sistem melakukan usaha $W = +2.600$ J. Menurut Hukum I Termodinamika, $Q = \Delta U + W$
 $\Delta U = Q - W = (1.800 \text{ J} - 2.600 \text{ J}) = -800 \text{ J}$
- Sistem menerima usaha dari lingkungan $W = -2.600$ J maka diperoleh
 $\Delta U = Q - W = 1.800 \text{ J} - (-2.600 \text{ J}) = 4.400 \text{ J}$
Tanda positif untuk ΔU menunjukkan bahwa energi dalam sistem bertambah sebesar 4.400 J.



Gambar 8.9

Hubungan sistem dan lingkungan.

- Sistem menerima kalor sambil melakukan usaha.
- Sistem melepaskan kalor dan pada sistem dilakukan usaha.
- Sistem menerima kalor, tetapi tidak melakukan kerja.
- Sistem melakukan kerja, tetapi tidak ada kalor yang masuk ataupun keluar (adiabatik).

2. Aplikasi Hukum I Termodinamika pada Proses-Proses Termodinamika

Sebagaimana Anda ketahui, ada empat jenis proses dalam termodinamika, yaitu proses isothermal, isokhorik, isobarik, dan adiabatik. Dalam bahasan ini akan diterapkan Hukum I Termodinamika pada proses-proses tersebut.



Pembahasan Soal

Suatu sistem mengalami proses adiabatik. Pada sistem dilakukan usaha 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem adalah ΔU dan kalor yang diserap sistem adalah Q , akan berlaku

- $\Delta U = -1.000 \text{ J}$
- $\Delta U = 100 \text{ J}$
- $\Delta U = 10 \text{ J}$
- $Q = 0$
- $\Delta U + Q = -100 \text{ J}$

Soal UMPTN Tahun 1994

Pembahasan:

Hukum I Termodinamika:

$$Q = \Delta U + W$$

Pada proses adiabatik, tidak ada kalor yang diterima atau diserap sistem. Jadi, $Q = 0$.

Pada sistem dilakukan usaha $W = -100 \text{ J}$ Jadi,

$$Q = \Delta U + W$$

$$0 = \Delta U - 100 \text{ J}$$

$$\Delta U = 100 \text{ J}$$

Jawaban: b

Tugas Anda 8.1

Diskusikanlah bersama teman Anda, apakah ada proses adiabatik di alam ini?

Kata Kunci

- adiabatik
- isobarik
- isokhorik
- isothermal

a. Proses Isotermal

Proses isotermal adalah proses yang tidak mengalami perubahan suhu ($\Delta T = 0$) sehingga perubahan energi dalamnya, $\Delta U = \frac{3}{2}nR(\Delta T) = 0$. Usaha luar yang dilakukan oleh gas, yaitu $Q = W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$ maka penerapan Hukum I Termodinamika akan menghasilkan

$$Q = \Delta U + W = 0 + W = W$$

$$Q = W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (8-15)$$

Persamaan (8-15) menunjukkan bahwa kalor yang diberikan kepada suatu sistem, seluruhnya digunakan untuk melakukan usaha.

b. Proses Isokhorik

Proses isokhorik adalah proses yang dialami oleh sistem tanpa adanya perubahan volume ($\Delta V = 0$) sehingga usaha oleh sistem gas adalah $W = p(\Delta V) = 0$. Perubahan energi dalamnya sesuai dengan persamaan $\Delta U = \frac{3}{2}nR(\Delta T)$. Penerapan Hukum I Termodinamika menghasilkan $Q = \Delta U + W = \Delta U + 0 = \Delta U$.

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2}nR(\Delta T) \quad (8-16)$$

Untuk gas ideal, $U = \frac{3}{2}nRT$ maka $Q = U_2 - U_1 = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1)$. Jadi, kalor yang diberikan kepada suatu sistem pada volume tetap, seluruhnya digunakan untuk menaikkan energi dalam sistem.

c. Proses Isobarik

Pada proses isobarik, sistem tidak mengalami perubahan besar tekanan ($\Delta p = 0$). Besarnya usaha yang dilakukan gas memenuhi persamaan $W = p(\Delta V) = p(V_2 - V_1)$. Penerapan Hukum I Termodinamika pada proses isobarik menghasilkan

$$Q = \Delta U + W = \Delta U + p(\Delta V) \quad (8-17)$$

d. Proses Adiabatik

Pada proses adiabatik, tidak terjadi pertukaran kalor dari sistem ke lingkungannya ($Q = 0$). Perubahan energi dalam sesuai dengan persamaan $\Delta U = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1)$. Oleh karena itu, penerapan Hukum I Termodinamika pada proses adiabatik menghasilkan

$$Q = \Delta U + W \text{ atau } 0 = \Delta U + W$$

$$W = -\Delta U = -\frac{3}{2}nR(T_2 - T_1); \text{ atau}$$

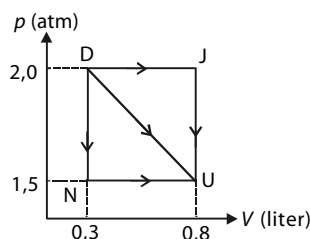
$$W = \frac{3}{2}nR(T_1 - T_2) \quad (8-18)$$

Persamaan (8-18) menyatakan bahwa tidak ada kalor yang masuk ke dalam sistem sehingga usaha luar yang dilakukan sistem akan mengurangi energi dalam sistem. Dari keempat proses yang dapat dialami sistem, Q bernilai positif jika sistem menerima kalor dan negatif jika sistem melepaskan kalor. Hukum I Termodinamika dapat diaplikasikan pada semua proses termodinamika yang berhubungan dengan ketiga besaran, yaitu Q , W , dan ΔU .

Tes Kompetensi Subbab B

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Suatu gas menyerap kalor 500 J dan melakukan usaha 50 J. Berapa perubahan energi dalam sistem gas tersebut? Apakah gas tersebut memuai atau dimampatkan?
2. Suatu sistem menerima kalor sebesar 10 J dan melakukan usaha luar sebesar 4 J pada suhu tetap 27°C. Berapakah perubahan energi dalam sistem tersebut?
3. Sebanyak 4 mol gas ideal monoatomik dengan suhu awal 27°C dinaikkan suhunya menjadi 127°C pada tekanan tetap. Berapakah kalor yang diperlukan? ($R = 8,31 \text{ J/molK}$)
4. Suatu gas pada tekanan konstan sebesar $6,4 \times 10^4 \text{ Pa}$ dimampatkan dari volume 8 liter menjadi 2 liter. Dalam proses tersebut, gas melepas kalor 400 joule.
 - a. Berapakah usaha yang dilakukan oleh gas?
 - b. Berapakah perubahan energi dalamnya?
5. Jelaskan bahwa gas dapat diperlakukan menyerupai keadaan gas ideal pada proses isotermik, isobarik, dan isovolume.
6. Perhatikan grafik berikut ini.



Untuk ketiga lintasan DNU, DJU, dan DU dalam gambar, hitunglah:

- a. usaha yang dilakukan oleh gas; dan
- b. perpindahan kalor dalam proses.

C. Kapasitas Kalor Gas dan Siklus Termodinamika

Kapasitas kalor (C) dari suatu zat didefinisikan sebagai *banyaknya kalor Q yang diperlukan untuk menaikkan suhu zat tersebut sebesar 1 kelvin atau satu derajat celsius*. Secara matematis, dituliskan

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (8-19)$$

Kapasitas kalor untuk gas ada dua macam, yaitu untuk volume tetap (C_v) dan untuk tekanan tetap (C_p), dengan $C_p - C_v = nR$.

1. Kapasitas Kalor untuk Proses Isokhorik ($V = \text{tetap}$)

Kapasitas kalor untuk gas yang memiliki volume tetap dapat dihitung sebagai berikut.

$$C_v = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{\frac{3}{2}nR\Delta T}{\Delta T} = \frac{3}{2}nR$$

Untuk gas monoatomik:

$$C_v = \frac{3}{2}nR \quad (8-20)$$

Untuk gas diatomik:

$$C_v = \frac{5}{2}nR \quad (8-21)$$

2. Kapasitas Kalor untuk Proses Isobarik ($p = \text{tetap}$)

Kapasitas kalor untuk gas yang memiliki tekanan tetap dapat dihitung sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + p(\Delta V) = \frac{3}{2}nR(\Delta T) + nR(\Delta T) = \frac{5}{2}nR(\Delta T)$$

Untuk gas monoatomik: $C_p = \frac{5}{2}nR \quad (8-22)$

Untuk gas diatomik: $C_p = \frac{7}{2}nR \quad (8-23)$

Kata Kunci

- kapasitas kalor tekanan tetap
- kapasitas kalor volume tetap
- konstanta Laplace



Tantangan untuk Anda

Anda pasti tahu apa termos itu. Dapatkah Anda menjelaskan cara kerja termos sehingga air panas dapat tetap panas? Jelaskan hal tersebut dengan konsep termodinamika.

Tabel 8.1

Tetapan Laplace γ Gas-Gas Tertentu pada Tekanan 1 atm dan Suhu 22°C

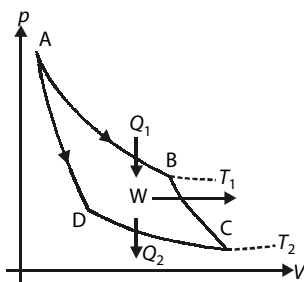
Gas	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
<i>Monoatomik:</i>	
Helium (He)	1,66
Argon (Ar)	1,67
<i>Diatomik:</i>	
Nitrogen (N ₂)	1,40
Oksigen (O ₂)	1,40
Karbon monoksida (CO)	1,40

Sumber: *Fundamental of Physics*, 2001



Tantangan untuk Anda

Anda pasti pernah mendengar istilah mesin 4 tak dan mesin 2 tak. Selidikilah dan diskusikanlah, apa perbedaan di antara keduanya? Mengapa mesin 2 tak memiliki akselerasi lebih cepat daripada mesin 4 tak?



Gambar 8.10

Satu siklus suatu mesin Carnot menggunakan suatu gas ideal sebagai fluida kerja. Grafik AB dan CD menampilkan proses isotermal, grafik BC dan DA menampilkan proses adiabatik.

Konstanta Laplace secara teoritis dapat dihitung sesuai dengan persamaan berikut.

- Gas monoatomik: $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\frac{5}{2}nR}{\frac{3}{2}nR} = 1,67.$
- Gas diatomik: $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\frac{7}{2}nR}{\frac{5}{2}nR} = 1,4.$

Tabel 8.1 menunjukkan nilai konstanta Laplace untuk beberapa gas pada tekanan 1 atm dan suhu 22°C.

Contoh 8.7

Suhu 2 kg gas nitrogen (berat molekul = 28 g/mol) dinaikkan dari 15°C menjadi 100°C melalui proses isobarik. Hitung kenaikan energi dalam dan usaha yang dilakukan oleh gas.

Jawab:

Gas N₂ pada keadaan ini dapat digolongkan sebagai gas diatomik suhu sedang sehingga kapasitas panas molar gas pada volume tetap dan pada tekanan tetap adalah

$$C_v = \frac{5}{2}R = \left(\frac{5}{2}\right)8,31 \text{ J/molK} = 20,8 \text{ J/molK}$$

$$C_p = \frac{7}{2}R = \left(\frac{7}{2}\right)8,31 \text{ J/molK} = 29,1 \text{ J/molK}$$

Jumlah mol gas adalah (satuan massanya harus diubah dalam gram):

$$n = \frac{m}{BM} = \frac{2.000 \text{ mol}}{28 \text{ g/mol}} = \frac{500}{7} \text{ mol}$$

Diketahui:

$$n = \frac{500}{7} \text{ mol}$$

$$C_v = 20,8 \text{ J/molK}$$

$$C_p = 29,1 \text{ J/molK}$$

$$T_2 = (100 + 273) \text{ K} = 373 \text{ K}$$

$$T_1 = (15 + 273) \text{ K} = 288 \text{ K}$$

$$\Delta T = 373 \text{ K} - 288 \text{ K} = 85 \text{ K}$$

$$\Delta U = nC_v\Delta T = \frac{500}{7} \text{ mol} (20,8 \text{ J/molK})(85 \text{ K}) = 1,26 \times 10^5 \text{ J}$$

$$Q = nC_p\Delta T = \frac{500}{7} \text{ mol} (29,1 \text{ J/molK})(85 \text{ K}) = 1,77 \times 10^5 \text{ J}$$

$$W = Q - \Delta U = (1,77 \times 10^5) \text{ J} - (1,26 \times 10^5) \text{ J} = 5,1 \times 10^4 \text{ J}$$

Seorang ilmuwan Prancis, **Sadi Carnot** (1796–1832), menyatakan bahwa semua pergerakan berhubungan dengan kalor, misalnya gerakan-gerakan yang terjadi dalam peralatan mekanik, seperti mesin diesel (mesin kalor). Ide Carnot menyiratkan bahwa dapat diciptakan sebuah mesin ideal yang seluruh energinya digunakan menjadi usaha. Namun, pada kenyataannya hal tersebut sulit diciptakan. Walaupun demikian, teori Carnot masih tetap dipakai hingga saat ini.

Secara teoritis, mesin Carnot menunjukkan beberapa faktor yang berpengaruh pada efisiensi sebuah mesin. Mengubah usaha menjadi kalor dapat dilakukan secara terus menerus. Akan tetapi, mengubah kalor menjadi usaha tidak demikian, harus diusahakan sejumlah gas kembali ke keadaannya semula, agar gas tersebut dapat melakukan usaha kembali. Proses seperti ini disebut *siklus*.

Pada tahun 1824, Carnot menjelaskan sebuah siklus yang terdiri atas empat proses. Perhatikan **Gambar 8.10** dan **Gambar 8.11**.

Proses dari A ke B adalah proses ekspansi atau proses pengembangan isothermal pada suhu T_1 . Pada proses ini, gas menyerap kalor Q_1 dari reservoir bersuhu tinggi T_1 dan melakukan usaha W_{AB} . Proses dari B ke C adalah proses pengembangan adiabatik. Selama proses, suhu gas turun dari T_1 menjadi T_2 sambil melakukan usaha W_{BC} . Proses dari C ke D adalah proses pemampatan isothermal pada suhu T_2 . Dalam proses ini, gas melepas kalor Q_2 ke reservoir bersuhu rendah T_2 dan melakukan usaha W_{CD} . Proses akhir dari D ke A adalah proses pemampatan adiabatik. Suhu naik dari T_2 ke T_1 sambil melakukan usaha W_{DA} .

Siklus Carnot adalah dasar dari mesin diesel, yaitu mesin yang paling ideal, yang selanjutnya disebut mesin Carnot. Selama proses siklus Carnot berlangsung, gas menerima kalor Q_1 dari reservoir bersuhu tinggi dan melepas kalor Q_2 ke reservoir bersuhu rendah. Usaha yang dilakukan oleh gas sesuai dengan Hukum I Termodinamika adalah

$$Q = \Delta U + W \text{ atau } Q_1 - Q_2 = 0 + W$$

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (8-24)$$

Keterangan:

Q_1 = kalor yang diserap dari reservoir yang bersuhu tinggi

Q_2 = kalor yang dilepas ke reservoir yang bersuhu rendah

3. Efisiensi Mesin

Perhatikan **Gambar 8.12**. Gambar tersebut menunjukkan siklus kalor di dalam sebuah mesin. Perbandingan antara besarnya usaha (W) yang dapat dilakukan oleh sistem terhadap kalor (Q_1) yang diserap dapat menentukan efisiensi suatu mesin. Secara matematis, efisiensi mesin dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% \quad (8-25)$$

a. Mesin Carnot

Efisiensi mesin Carnot diperoleh dengan cara mengganti usaha (W) dengan **Persamaan (8-24)** sehingga **Persamaan (8-25)** menjadi

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \text{ atau } \eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\% \quad (8-26)$$

Telah dibahas bahwa untuk suatu gas ideal, energi dalam (U) sebanding dengan suhu mutlak (T) sehingga untuk mesin Carnot, **Persamaan (8-26)** dapat ditulis sebagai berikut.

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \quad (8-27)$$

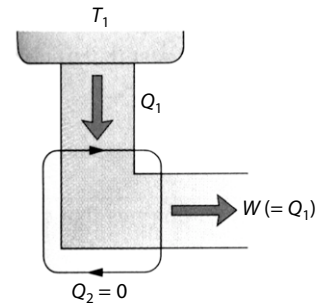
Penggantian besaran kalor (Q) menjadi suhu mutlak (T) dalam menentukan efisiensi sebuah mesin, berdasarkan pada energi dalam sebanding dengan suhu. Kelvin menunjukkan bahwa

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (8-28)$$

Keterangan:

T_1 = suhu reservoir tinggi (K)

T_2 = suhu reservoir rendah (K)

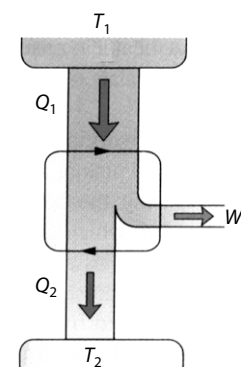


Gambar 8.11

Siklus mesin ideal Q_1 dan suhu fungsi reservoir diubah seluruhnya menjadi usaha W dengan efisiensi 100%.

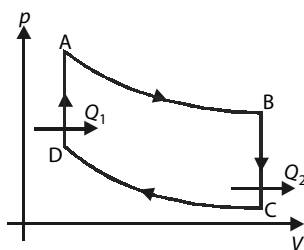
Kata Kunci

- efisiensi mesin



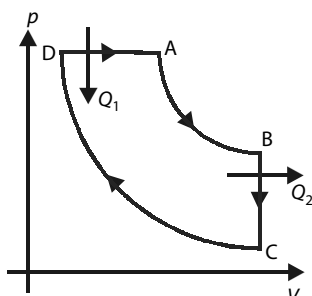
Gambar 8.12

Perubahan kalor menjadi kerja: Q_1 = kalor masuk; Q_2 = kalor dilepaskan; W = usaha yang dilakukan; T_1 = suhu reservoir tinggi; dan T_2 = suhu reservoir rendah.



Gambar 8.13

Dua proses adiabatik dan dua proses isokhorik pada siklus Otto.



Gambar 8.14

Siklus diesel



Pembahasan Soal

Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi 800 K, memiliki efisiensi 40%. Agar efisiensinya naik menjadi 50%, suhu reservoir suhu tinggi dinaikkan menjadi

- a. 900 K d. 1.180 K
b. 960 K e. 1.600 K
c. 1.000 K

Soal UMPTN Tahun 1990

Pembahasan:

Keadaan 1:

$$\eta = 40\%$$

$$T_1 = 800 \text{ K}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow 40\%$$

$$= 1 - \frac{T_2}{800 \text{ K}}$$

$$T_2 = 480 \text{ K}$$

Keadaan 2:

$$\eta = 50\%$$

$$T_2 = 480 \text{ K}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow 50\%$$

$$= 1 - \frac{480 \text{ K}}{T_1}$$

$$T_1 = 960 \text{ K}$$

Jawaban b

b. Mesin Otto

Mesin Otto merupakan mesin kalor yang prinsip kerjanya berdasarkan siklus Otto. Pada siklus Otto, terdapat dua proses adiabatik dan dua proses isokhorik. Perhatikan Gambar 8.13.

Pada Gambar 8.13, A–B dan C–D merupakan proses adiabatik, sedangkan B–C dan D–A merupakan proses isokhorik. Adapun Q_1 adalah kalor yang masuk dalam sistem, sedangkan Q_2 adalah kalor yang keluar (dilepaskan) oleh sistem. Efisiensi dari siklus Otto dinyatakan dengan persamaan

$$\eta = 1 - \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{1-\gamma} \quad (8-29)$$

Siklus Otto banyak diaplikasikan pada mesin motor bakar.

c. Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan mesin kalor yang prinsip kerjanya menggunakan siklus diesel. Pada siklus diesel terdapat dua proses adiabatik, satu proses isobarik, dan satu proses isokhorik. Perhatikan Gambar 8.14.

Proses dari D ke A merupakan proses isobarik, A–B dan C–D merupakan proses adiabatik, dan proses B–C merupakan proses isokhorik. Prinsip kerja mesin diesel hampir sama dengan mesin otto karena semua proses pada mesin diesel sama dengan mesin otto, kecuali proses isobarik.

Efisiensi beberapa mesin ditunjukkan pada Tabel 8.2.

Tabel 8.2

Efisiensi Beberapa Mesin

Jenis Mesin	Efisiensi (%)
Mesin mobil (bensin)	20–25
Mesin diesel	26–38
Turbin uap pembangkit nuklir	35
Turbin uap pembangkit batubara	40

Contoh 8.8

Sebuah mesin Carnot memiliki efisiensi 40%. Jika suhu reservoir tinggi 800 K, tentukanlah besarnya suhu reservoir tinggi agar efisiensi mesin menjadi 50% dengan anggapan suhu reservoir rendah tidak mengalami perubahan.

Jawab:

Pertama, tentukan suhu reservoir rendah (T_2) pada $\eta = 40\%$.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$40\% = 1 - \frac{T_2}{800 \text{ K}} \Rightarrow T_2 = 480 \text{ K}$$

Kedua, tentukan suhu reservoir tinggi (T_1) dengan mempergunakan T_2 yang telah dihitung tadi untuk $\eta = 50\%$.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$50\% = 1 - \frac{480 \text{ K}}{T_1}$$

$$0,5 = 1 - \frac{480 \text{ K}}{T_1} \Rightarrow \frac{480 \text{ K}}{T_1} = 0,5 \Rightarrow T_1 = 960 \text{ K}$$

Jadi, suhu reservoir tinggi yang dibutuhkan adalah 960 K.

Tes Kompetensi Subbab C

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi 800 K, memiliki efisiensi 20%. Untuk menaikkan efisiensinya menjadi 36%, berapa derajat suhu reservoir tinggi harus dinaikkan?
2. Mesin Carnot yang bersuhu reservoir tinggi 70°C memiliki efisiensi 40%. Efisiensi dari mesin tersebut ditingkatkan menjadi 50%. Berapa derajat suhu reservoir tinggi harus dinaikkan?
3. Mesin Carnot menerima kalor dari reservoir yang bersuhu tinggi 227°C dan melepaskannya pada suhu rendah 27°C. Tentukan efisiensi mesin Carnot tersebut.
4. Mesin pendingin ruangan menyerap kalor sebesar 4.000 joule dalam waktu 1 sekon. Jika suhu ruangan akan dipertahankan sebesar 25°C, sedangkan suhu lingkungan tempat pembuangan kalor adalah 32°C. Berapakah daya listrik yang dibutuhkan?
5. Sebuah mesin menyerap kalor sebesar 5.000 Joule dari sebuah reservoir bersuhu 500 K dan membuangnya sebesar 2.000 joule pada suhu 200 K. Dari data tersebut, tentukanlah:
 - a. efisiensi mesin; dan
 - b. usaha yang dapat dilakukan.
6. Sebuah mesin Carnot memiliki efisiensi 30%. Jika suhu reservoir tinggi 750 K, tentukanlah besarnya suhu reservoir tinggi agar efisiensi mesin menjadi 50%, dengan anggapan suhu reservoir rendah tidak mengalami perubahan.

D. Hukum II Termodinamika

Hukum I Termodinamika menyatakan tentang kekekalan energi, yaitu energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah dari satu bentuk energi ke bentuk energi lainnya. Hukum I Termodinamika tidak membatasi bagaimana perubahan energi tersebut berlangsung. Lain halnya dengan Hukum II Termodinamika yang memiliki batasan-batasan tertentu.

Sebuah mesin dapat bergerak disebabkan adanya energi kalor yang diberikan pada mesin tersebut secara terus-menerus, tetapi sebaliknya tidak mungkin energi gerak (usaha) dapat memberikan kalor secara terus menerus. Pada kenyataannya, tidak ada sebuah mesin pun yang bekerja menyerap energi kalor dan mengubah seluruhnya menjadi usaha.

Berikut ini hal-hal yang berkaitan dengan Hukum II Termodinamika yang merupakan kesimpulan dari pengamatan-pengamatan yang dilakukan oleh **Kelvin**, **Planck**, dan **Clausius**.

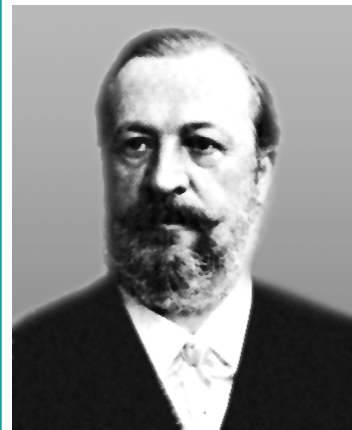
1. Menurut Kelvin dan Planck, tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam suatu siklus, menerima kalor dari satu reservoir dan mengubah seluruh kalor tersebut menjadi usaha.
2. Menurut Clausius, tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam satu siklus, mengambil kalor dari reservoir yang memiliki suhu rendah dan memberikannya pada reservoir yang memiliki suhu tinggi tanpa memerlukan usaha dari luar.
3. Mesin Carnot yang bekerja di antara reservoir suhu T_1 dan reservoir yang bersuhu T_2 ($T_1 > T_2$) menghasilkan efisiensi yang tinggi.

Jadi, menurut Kelvin dan Planck tidak mungkin suatu mesin hanya memiliki sebuah reservoir dan tidak mungkin sebuah mesin memiliki efisiensi 100%. Jika efisiensi 100%, kalor yang diserap dari lingkungannya akan diubah seluruhnya menjadi usaha. Usaha mesin semacam ini disebut mesin *perpetuum mobile* jenis kedua. Kenyataannya, tidak ada mesin seperti itu, walaupun masih memenuhi Hukum I Termodinamika.



Tokoh

Nikolaus Otto



Sumber: Jendela Iptek: Energi, 1997

Pada 1876, seorang warga negara Jerman, Nikolaus Otto menjadi orang pertama yang membuat dan menjual mesin 4 tak yang kemudian menjadi dasar pembuatan kebanyakan mesin. Ia menamakannya *Silent Otto* karena mesin tersebut mampu bekerja tanpa menimbulkan kebisingan. Salah satu ciri mesin 4 tak adalah tekanan kompresinya. Jika bahan bakar berupa gas yang dimampatkan, akan lebih banyak energi yang dilepaskan. Gagasan ini pertama kali dikembangkan oleh Alphonse Beau de Rochas (1815–1891) yang berkewarganegaraan Prancis, tetapi justru Otto yang menyukseskan ide tersebut.

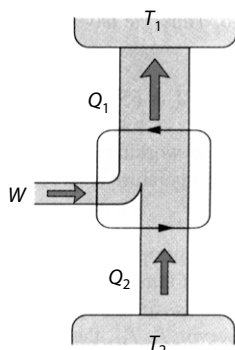
Menurut Clausius, mesin selalu memerlukan usaha luar agar dapat memindahkan kalor dari tempat yang bersuhu rendah ke tempat yang bersuhu tinggi. Mesin seperti ini disebut mesin pendingin, misalnya lemari es dan pendingin ruangan atau AC (*air conditioner*).

1. Proses Reversibel dan Irreversibel

Proses-proses pada mesin kalor ada yang bersifat *reversibel* dan ada pula yang bersifat *irreversibel* (tidak reversibel). Proses *reversibel* merupakan proses yang berlangsung sangat lambat sehingga prosesnya dapat dianggap sebagai rangkaian keadaan setimbang. Seluruh proses tersebut dapat dikerjakan secara kebalikan tanpa mengubah besar usaha yang dilakukan atau kalor yang dipindahkan.

Proses reversibel sempurna tidak dapat ditentukan dalam kenyataan karena proses ini tak terbatas. Proses ini juga menghendaki tidak adanya gesekan, gangguan aliran udara, serta faktor pengubah kalor dan usaha lainnya.

Proses yang ada pada kenyataannya adalah proses irreversibel. Pada proses nyata, misalnya masih ditemukan gesekan yang menyebabkan adanya panas yang hilang atau aliran gas yang berubah.



Gambar 8.15

Perubahan kerja menjadi kalor.

2. Mesin Pendingin (*Refrigerator*)

Hukum II Termodinamika berpegang kepada kecenderungan alamiah sifat kalor yang selalu merambat secara spontan dari benda bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah, kecuali jika ada usaha luar yang memaksa memindahkan kalor dari sistem bersuhu rendah ke lingkungan yang bersuhu lebih tinggi. Pada mesin pendingin, sistem mengambil kalor Q_2 dan melepaskan kalor Q_1 . Adapun usaha yang dilakukan adalah W . Siklus mesin pendingin dapat dilihat pada **Gambar 8.15**.

Keterangan gambar:

Q_1 = kalor yang dilepaskan pada suhu tinggi T_1

Q_2 = kalor yang diserap pada suhu rendah T_2

W = usaha yang dilakukan dari luar

Ukuran daya sebuah mesin pendingin dinyatakan dengan koefisien daya guna. Secara matematis, dapat dituliskan sebagai berikut.

$$K = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (8-30)$$

Lemari es dan pendingin ruangan memiliki koefisien daya guna dalam jangkauan 2 sampai dengan 6. Semakin tinggi nilai K , semakin baik mesin pendingin tersebut.

Contoh 8.9

Temperatur di dalam sebuah lemari es adalah -3°C . Fluida kerja yang dimampatkan di dalamnya mengembang pada temperatur sebesar 27°C . Tentukanlah koefisien daya guna lemari es tersebut.

Jawab:

Diketahui:

$$T_2 = (-3 + 273) = 270 \text{ K}$$

$$T_1 = (27 + 273) = 300 \text{ K}$$

Dengan menggunakan persamaan

$$K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



Tantangan untuk Anda

Mengapa AC menggunakan freon? Apakah freon dapat digantikan oleh gas lain?



diperoleh

$$K = \frac{270 \text{ K}}{(300 - 270) \text{ K}} = \frac{270 \text{ K}}{30 \text{ K}} = 9$$

Jadi, koefisien daya guna lemari es tersebut sebesar 9.

Tes Kompetensi Subbab D

Kerjakanlah dalam buku latihan.

1. Suhu di dalam sebuah lemari es adalah -5°C . Fluida kerja yang dimampatkan di dalamnya mengembun pada suhu 25°C . Tentukanlah koefisien daya guna lemari es tersebut.
2. Sejumlah makanan dalam lemari es menghasilkan kalor sebesar 4.200 J . Jika koefisien daya guna lemari es tersebut 3,5. Tentukanlah energi listrik yang diperlukan lemari es untuk memindahkan kalor yang dihasilkan makanan.
3. Mesin pendingin ruangan menyerap kalor sebesar 8.540 J dalam waktu 1 sekon. Suhu ruangan dipertahankan sebesar 18°C , sedangkan suhu lingkungan tempat pembuangan kalor adalah 32°C . Tentukanlah daya listrik yang dibutuhkan.
4. Suatu mesin pendingin berdaya kerja 200 watt. Jika suhu ruang pendingin -4°C dan suhu udara di luar 25°C (anggap mesin ideal), berapa kalor maksimum yang dapat diserap mesin pendingin dari ruang pendinginnya selama 10 menit?
5. Suatu bangunan hendak didinginkan dengan sebuah mesin pendingin ideal. Suhu di luar bangunan 28°C dan di dalam bangunan 15°C . Jika alat pendingin tersebut berkekuatan 10 hp ($1 \text{ hp} = 745 \text{ watt}$), berapa panas yang dikeluarkan dari bangunan tersebut setiap jam?

Rangkuman

1. Kalor merupakan salah satu bentuk energi yang dapat berpindah dari suatu lingkungan ke suatu sistem, atau sebaliknya. Kalor berpindah dari suhu tinggi ke suhu yang lebih rendah.

$$Q = mc\Delta T$$

2. Pada keadaan tekanan tetap, usaha yang dilakukan gas adalah

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

Jika gas melakukan ekspansi (pengembangan), usaha bernilai positif yang menyebabkan volume bertambah atau $V_2 > V_1$.

Jika gas dimampatkan, usaha bernilai negatif. Lingkungan melakukan usaha pada sistem sehingga $V_2 < V_1$.

3. Gas yang berada dalam ruang tertutup dapat diubah keadaannya melalui beberapa proses.

- a. Proses Isotermal, terjadi pada suhu tetap. Usaha yang dilakukan gas adalah $W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$.

- b. Proses Isokhorik, terjadi pada volume tetap. Usaha yang dilakukan gas adalah $W = p(\Delta V) = 0$.

- c. Proses Isobarik, terjadi pada tekanan tetap. Usaha yang dilakukan gas adalah $W = p(V_2 - V_1) = p(\Delta V)$.

- d. Proses Adiabatik, terjadi pada keadaan sistem (gas) tidak mengalami pertukaran kalor dengan lingkungan. Pada proses ini terjadi perubahan suhu,

tekanan, dan volume. Usaha yang dilakukan gas adalah $W = \frac{3}{2} nR (T_1 - T_2)$.

4. Hukum I Termodinamika dirumuskan sebagai berikut. Sejumlah kalor yang diberikan kepada sistem, dipakai sebagian oleh sistem untuk melakukan usaha W . Selisih energi $Q - W$ sama dengan perubahan energi dalam (U) dari sistem, yaitu $Q = \Delta U + W$

5. Kapasitas kalor dari suatu zat didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu zat tersebut sebesar satu kelvin atau satu derajat celsius.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Kapasitas kalor untuk proses isokhorik ($v = \text{tetap}$):

$$C_v = \frac{3}{2} nR$$

Kapasitas kalor untuk proses isobarik:

$$(p = \text{tetap})$$

$$C_p = \frac{9}{2} nR$$

Hubungan antara C_p dengan C_v adalah

$$C_p - C_v = nR$$

6. Pada siklus Carnot, gas menerima kalor Q_1 dari reservoir bersuhu tinggi dan melepas kalor Q_2 ke reservoir bersuhu rendah. Siklus Carnot merupakan dasar dari mesin diesel (mesin Carnot), yaitu mesin yang paling ideal. Efisiensi mesin merupakan perbandingan antara besar usaha yang dapat dilakukan oleh sistem terhadap kalor yang diserap.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\%$$

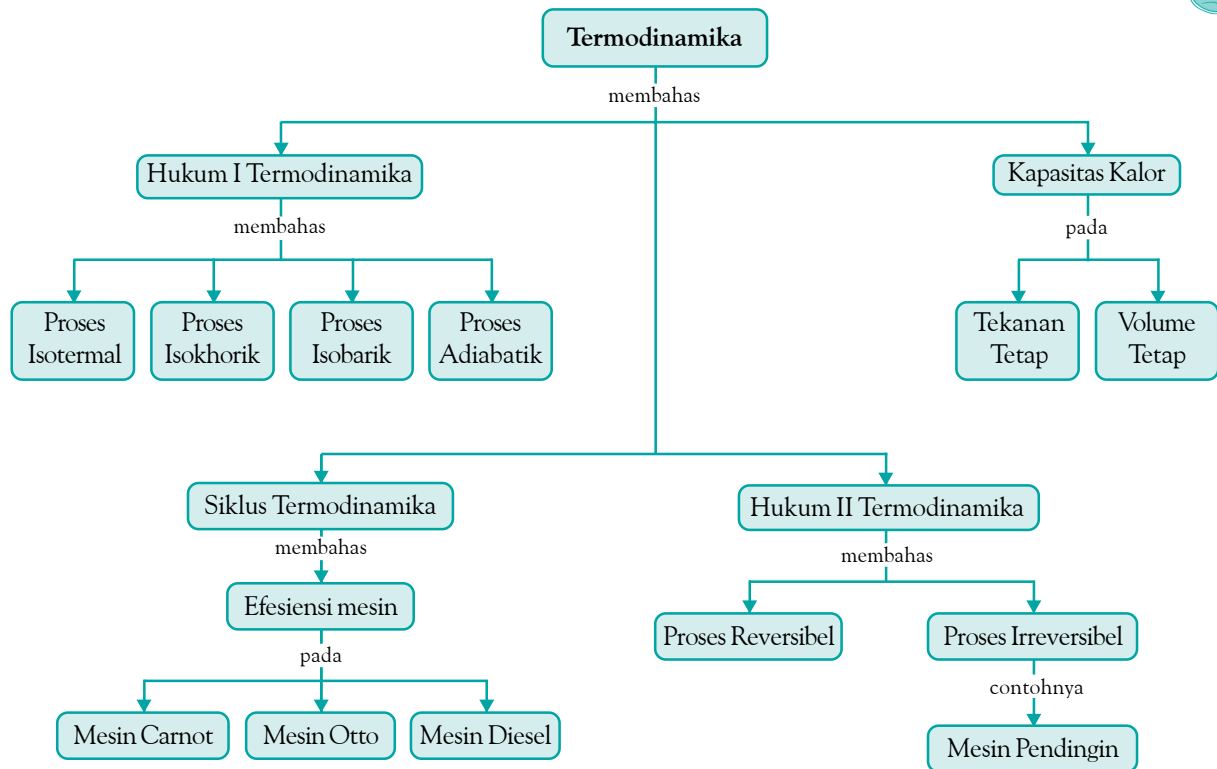
$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$

7. Hukum II Termodinamika memiliki kesimpulan sebagai berikut.

- Tidak mungkin membuat suatu mesin yang dapat mengubah kalor yang diterima menjadi usaha seluruhnya dalam satu siklus.
- Kalor tidak pernah mengalir spontan dari benda bersuhu rendah ke benda bersuhu tinggi.
- Mesin Carnot yang bekerja di antara reservoir bersuhu T_1 dan reservoir yang bersuhu T_2 dengan $T_1 > T_2$ maka efisiensinya tinggi.

Peta Konsep



Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, Anda tentu telah memahami Hukum I Termodinamika dan proses-proses yang dapat terjadi di dalamnya. Adapun Hukum II Termodinamika mempelajari tentang perlunya usaha luar dan konsep kapasitas kalor pada proses-proses termodinamika. Dari keseluruhan materi bab ini, bagian

manakah yang menurut Anda sulit? Coba diskusikan dengan teman atau guru Fisika Anda.

Dari pemahaman yang Anda peroleh, coba sebutkan beberapa manfaat yang dapat diterapkan dalam kehidupan sehari-hari.

Tes Kompetensi Bab 8

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

- Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa
 - kalor tidak dapat masuk ke dalam dan ke luar dari suatu sistem
 - energi adalah kekal
 - energi dalam adalah kekal
 - suhu adalah tetap
 - sistem tidak mendapat usaha dari luar

- Sejumlah gas ideal dengan massa tertentu mengalami pemampatan secara adiabatik. Jika W adalah kerja yang dilakukan oleh sistem (gas) dan T adalah perubahan suhu dari sistem, berlaku

- $W = 0, \Delta T > 0$
- $W > 0, \Delta T = 0$
- $W < 0, \Delta T = 0$
- $W < 0, \Delta T > 0$
- $W = 0, \Delta T = 0$

- Dua mol gas argon memuai secara isothermal pada suhu 300 K, dari volume awal 0,050 m³ ke volume akhir 0,060 m³. Usaha yang dilakukan gas argon adalah ($R = 8,31 \text{ J/kmolK}$)

- 997,2 joule
- 909 joule
- 498,6 joule
- 49,86 joule
- 44,87 joule

- Sebanyak 2 m³ gas helium yang bersuhu 47°C dipanaskan secara isobarik sampai 127°C. Jika tekanan gas helium $2,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, usaha yang dilakukan gas tersebut adalah

- 150 kJ
- 125 kJ
- 15 kJ
- 12,5 kJ
- 250 kJ

- Suatu gas yang volumenya 0,5 m³ perlahan-lahan dipanaskan pada tekanan tetap sehingga volumenya menjadi 2 m³. Jika usaha luar gas tersebut $3 \times 10^5 \text{ joule}$, tekanan gas adalah

- $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

- Perhatikan pernyataan-pernyataan berikut.

- Pada proses isokhorik, gas tidak melakukan usaha.
- Pada proses isobarik, gas selalu mengembang.
- Pada proses adiabatik, gas selalu mengembang.
- Pada proses isotermik, energi dalam gas tetap.

Pernyataan yang sesuai dengan konsep termodinamika adalah

- (1) dan (2)
- (1), (2), dan (3)
- (1) dan (4)
- (2), (3), dan (4)
- (3) dan (4)

(Ebtanas 1999)

- Lima liter gas ideal dalam silinder mesin diesel mengalami proses adiabatik pada tekanan 1,2 atm. Jika setelah proses kompresi dihasilkan volume akhir 7,5 L dengan $\gamma = 1,5$, besarnya tekanan akhir adalah

- 0,86 atm
- 0,80 atm
- 0,76 atm
- 0,66 atm
- 0,60 atm

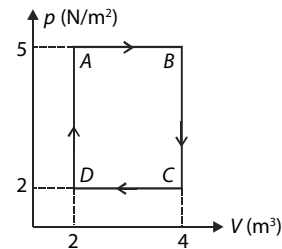
- Sejenis gas ideal volumenya 3 L. Pada suhu 27°C, gas tersebut dipanaskan pada tekanan tetap 2 atm sampai suhunya 227°C. Usaha yang dilakukan gas tersebut adalah

- $4 \times 10^2 \text{ J}$
- $4 \times 10^3 \text{ J}$
- $0,4 \times 10^2 \text{ J}$
- $0,4 \times 10^3 \text{ J}$
- $4 \times 10^5 \text{ J}$

- Jika volume gas ideal diperbesar dua kali volume semula dan ternyata energi dalamnya menjadi empat kali semula, tekanan gas tersebut menjadi

- 4 kali
- 2 kali
- $\frac{1}{2}$ kali
- $\frac{1}{4}$ kali
- konstan

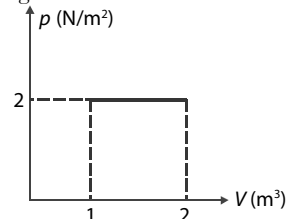
- Sejumlah gas mengalami siklus seperti pada gambar berikut.



Suhu di titik C adalah 400 K, dan suhu di titik A adalah

- 300 K
- 400 K
- 450 K
- 500 K
- 600 K

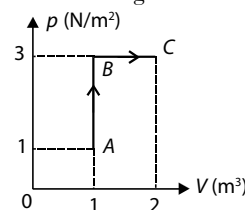
- Perhatikan grafik berikut ini.



Grafik tersebut menunjukkan hubungan tekanan (p) terhadap volume (V), dari sejumlah massa gas ideal. Usaha yang dilakukan gas selama proses tersebut adalah

- 6,5 J
- 4 J
- 3,5 J
- 2 J
- 1,5 J

- Perhatikan grafik berikut.



Pada grafik tersebut, suatu gas mengalami proses A-B-C. Kalor yang dibutuhkan untuk proses tersebut adalah

- a. 3 joule
- b. 7,5 joule
- c. 10,5 joule
- d. 4,5 joule
- e. 12 joule

13. Suatu sistem mengalami proses adiabatik. Pada sistem dilakukan usaha 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem adalah U dan kalor yang diserap sistem adalah Q , diperoleh

- a. $\Delta U = -1.000\text{J}$
- b. $\Delta U = 100\text{J}$
- c. $\Delta U = 0$
- d. $Q = 10\text{J}$
- e. $\Delta U + Q = 100\text{J}$

(UMPTN 1994)

14. Pada gas ideal monoatomik, proses yang terjadi pada besaran-besaran fisis secara isobarik adalah

- a. $Q = \Delta V$ dan $\Delta V = \frac{3}{2}nR\Delta T$
- b. $Q = W$ dan $\Delta U = 0$
- c. $Q = 0$ dan $\Delta U = 0$
- d. $Q = nC_p\Delta T$ dan $\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$
- e. $Q = nC_p\Delta T$ dan $\Delta U = 0$

15. Untuk proses adiabatik, usaha yang terjadi pada gas ideal monoatomik adalah

- a. 0
- b. $W = Q$
- c. $W = p\Delta V$
- d. $W = \frac{3}{2}nR\Delta T$
- e. $W = -\frac{3}{2}nR\Delta T$

16. Sebuah mesin Carnot setiap siklusnya menerima energi dari reservoir suhu tinggi sebesar 12 kJ dan membuang energi 4.000 kJ ke reservoir suhu rendah. Besar efisiensi mesin tersebut adalah

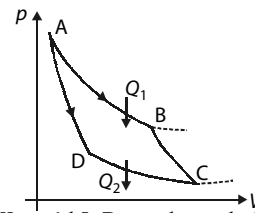
- a. 17%
- b. 33%
- c. 50%
- d. 67%
- e. 99%

(Ebtanas 2000)

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Sejumlah gas ideal menempati ruang bervolume 1 cm³, massa gas tersebut 124 g, dan berat molekulnya 62. Tentukanlah tekanan gas tersebut pada suhu 27°C.
2. Gas ideal mengalami pemampatan secara adiabatik sehingga volumenya berkurang 0,5 liter. Jika volume awalnya 2,5 liter dan tekanannya 4 atmosfer, tentukanlah tekanan gas tersebut setelah mengalami pemampatan (tetapan Laplace = 1,7).
3. Dalam suatu proses, suatu gas menerima kalor 8.000 kalori. Ternyata, gas dapat melakukan usaha sebesar 12.000 joule. Hitunglah perubahan energi dalam gas.
4. Gas melakukan usaha sebesar 397,1 joule pada proses adiabatik. Berapa kalori besar perubahan energi dalam gas? (1 kalori = 4,18 J)
5. Gas menerima kalor 4.000 kalori, menghasilkan usaha sebesar 7.000 joule. Berapa perubahan energi dalam gas (1 kalori = 4,18 J)?

17. Perhatikan grafik p - V mesin Carnot berikut ini.



Diketahui $W = 6\text{ kJ}$. Banyaknya kalor yang dilepas oleh mesin setiap siklus adalah

- a. 2.250 J
- b. 3.600 J
- c. 3.750 J
- d. 6.000 J
- e. 9.600 J

(Ebtanas 1998)

18. Sebuah mesin Carnot yang reservoir suhu rendahnya 27°C memiliki efisiensi 40%. Jika efisiensi diperbesar menjadi 50%, reservoir suhu tingginya harus dinaikkan sebesar

- a. 25 K
- b. 50 K
- c. 75 K
- d. 100 K
- e. 150 K

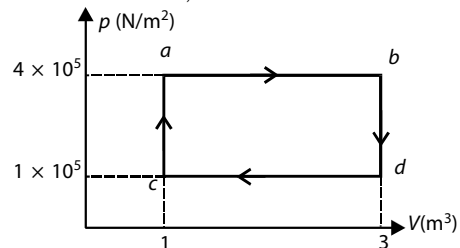
19. Reservoir bersuhu tinggi pada mesin Carnot adalah 800 K dan reservoir suhu rendahnya 300 K. Kalor yang diserap oleh mesin dari reservoir suhu tinggi sebesar 16.000 joule. Besar usaha yang dihasilkan mesin Carnot tersebut adalah

- a. 6.000 J
- b. 8.000 J
- c. 10.000 J
- d. 12.000 J
- e. 14.000 J

20. Usaha yang dilakukan oleh gas ideal yang mengalami proses isokhorik dari tekanan p_1 sampai p_2 adalah

- a. 0
- b. p_1V_1
- c. $(p_1 + p_2)(V_1 + V_2)$
- d. p_2V_2
- e. $\left(\frac{p_1p_2}{V_1V_2}\right)$

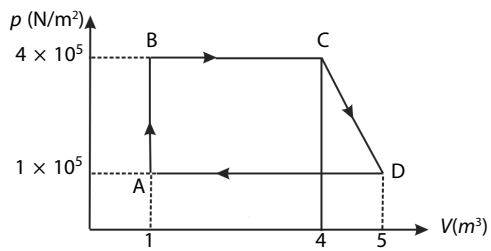
6. Diagram p - V berikut menunjukkan proses suatu gas dalam satu siklus, dimulai dari a dan berakhir di a .



Dari gambar tersebut, berapakah:

- a. usaha pada setiap proses;
 - b. usaha total gas.
7. Sebanyak 4 mol gas memuai secara isothermal pada suhu 7 K sehingga volumenya berubah dari 4 cm³ menjadi 60 cm³. Berapa usaha yang dilakukan gas?

8. Gas dalam suatu ruang tertutup mengalami proses dalam satu siklus, dari A–B–C–D–A, seperti diagram p – V berikut.



- Berdasarkan grafik siklus tersebut, berapa usaha yang dilakukan oleh gas?
9. Hitunglah efisiensi dari suatu mesin yang bekerja pada reservoir suhu rendah 7°C dan reservoir suhu tinggi 427°C .
10. Sebuah mesin Carnot bekerja di antara reservoir panas 187°C dan reservoir dingin T . Jika mesin tersebut menyerap kalor 1.000 joule dan dapat melakukan usaha 600 joule, berapa suhu reservoir dinginnya?

Proyek Semester 2



Seperti pada semester pertama yang lalu, pada semester ini Anda juga ditugaskan untuk melakukan kegiatan semester agar pemahaman konsep Fisika Anda semakin meningkat. Adapun kegiatan semester ini mengenai fluida dan rangkaian kegiatan yang harus Anda lakukan bersama teman sekelompok akan diuraikan berikut ini. Pada akhir kegiatan, Anda pun harus menyusun laporan akhir percobaan dan mempresentasikannya di hadapan kelompok lain dan guru Fisika Anda.

Viskositas

Tujuan Kegiatan

Menentukan koefisien kekentalan zat cair dengan menggunakan Hukum Stokes.

Alat dan Bahan

1. Tabung Stokes (tinggi 60 cm, diameter 4 cm, penyaring, 2 gelang pembatas)
2. Mistar (100 cm)
3. Mikrometer sekrup (0–25 mm; 0,01 mm)
4. Neraca Ohaus (*triple beam*, 311 g, 0,01 g)
5. Pinset
6. Bola pejal (bahan yang sama dengan jari-jari berbeda-beda)
7. *Stopwatch*
8. *Areometer* (massa jenis $< 1 \text{ gcm}^3$)
9. Termometer
10. Lup

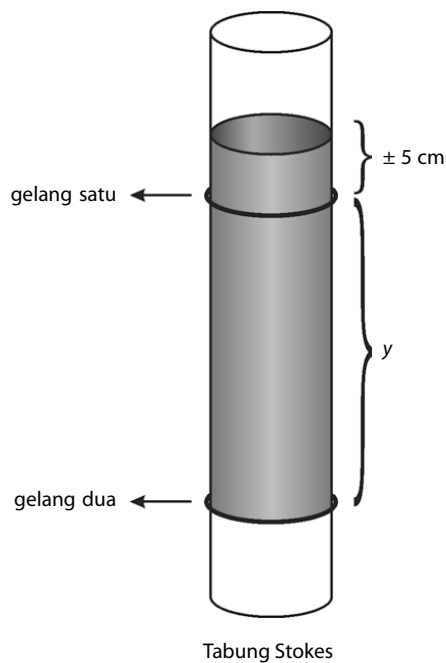
Prosedur Percobaan

1. **Percobaan 1:** Menentukan harga viskositas berdasarkan grafik $t = f(y)$.
 - a. Ukurlah dan catat suhu zat cair dalam tabung stokes dengan menggunakan termometer, gunakan lup agar pengukuran dapat dilakukan dengan lebih teliti.
 - b. Ukur dan catat massa jenis zat cair dengan menggunakan areometer, gunakan lup agar pengukuran dapat dilakukan dengan lebih teliti.
 - c. Pilih salah satu bola pejal yang tersedia (pilih yang kecil) kemudian, ukur dan catat diameter bola dengan menggunakan mikrometer sekrup. Lakukan pengukuran ulang sebanyak 10 kali dengan posisi yang berbeda-beda.
 - d. Timbang massa bola pejal yang akan digunakan cukup satu kali pengukuran. Perhatikan posisi skala nol sebelum alat ukur dipergunakan.
 - e. Masukkan bola ke dalam tabung stokes yang telah diberi zat cair yang akan diukur viskositasnya, kemudian amati gerak bola hingga bola dianggap bergerak lurus beraturan.
 - f. Berilah tanda batas dengan gelang kawat pertama ketika bola dianggap telah mengalami gerak lurus beraturan ($\pm 5 \text{ cm}$ di atas permukaan zat cair).
 - g. Ukur jarak yang akan diamati (y) dengan memberikan tanda dengan gelang kedua.
 - h. Ambil bola yang telah dimasukkan, tiriskan, lalu masukkan kembali ke dalam tabung stokes. Amati dan catat waktu yang ditempuh bola ketika bergerak lurus beraturan sepanjang y .
 - i. Lakukan langkah g–h untuk 10 kali percobaan pada jarak y yang berbeda-beda dengan cara mengubah kedudukan posisi gelang kedua.
2. **Percobaan 2:** Menentukan harga viskositas zat cair berdasarkan grafik fungsi $t = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$.
 - a. Pilih 10 buah bola dengan massa jenis yang sama (terbuat dari bahan yang sama) dan jari-jari yang berbeda.

- b. Ukurlah massa dan jari-jari setiap bola (masing-masing cukup satu kali pengukuran).
- c. Tentukan dan ukurlah jarak antara dua gelang pembatas pada tabung Stokes.
- d. Ukurlah waktu yang diperlukan setiap bola pejal untuk menempuh jarak antara kedua gelang pembatas yang sudah ditentukan tersebut.

Pengolahan Data

1. Dengan menggunakan data percobaan pertama, buat grafik $t = f(y)$. Kemudian, tentukan koefisien kekentalan zat cair berdasarkan grafik tersebut.
2. Dengan data percobaan kedua, buat grafik $t = f(\frac{1}{r^2})$. Kemudian, tentukan koefisien kekentalan zat cair berdasarkan grafik tersebut.
3. Bandingkan hasil kedua percobaan tersebut, kemudian berikan penjelasan Anda mengenai kedua hasil tersebut.



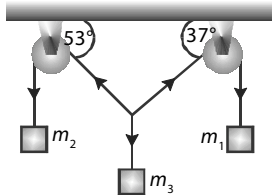
Tes Kompetensi Fisika

Semester 2



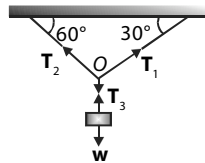
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan.

1. Perhatikan sistem kesetimbangan pada gambar berikut. (katrol licin)

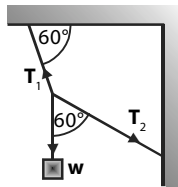


Perbandingan massa benda m_2 dan m_1 adalah

- a. 2 : 5
b. 3 : 4
c. 3 : 5
d. 4 : 3
e. 5 : 3
2. Sebuah benda memiliki berat 800 N dan digantung dalam keadaan diam seperti tampak pada gambar berikut. Besar tegangan tali T_2 adalah

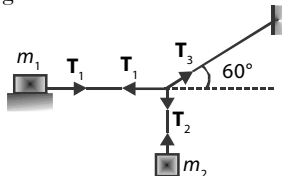


3. Perhatikan gambar berikut ini.



Jika tali cukup kuat untuk menahan tegangan maksimum $60\sqrt{3}$ N, besar w yang masih dapat ditahan oleh tali tersebut adalah

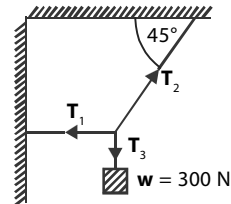
- a. 50 N
b. 60 N
c. $60\sqrt{3}$ N
d. $50\sqrt{3}$ N
e. 100 N
4. Sistem pada gambar berikut berada dalam keadaan setimbang.



Besar $m_1 = 15\sqrt{3}$ kg dan koefisien gesek statis antara m_1 dan meja adalah 0,2. Massa m_2 adalah

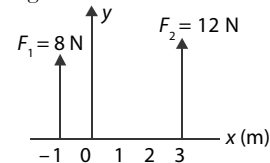
- a. 4,5 kg
b. $12\sqrt{3}$ kg
c. 9 kg
d. 12 kg
e. $3\sqrt{3}$ kg

5. Perhatikan gambar berikut.



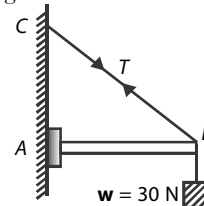
Besar tegangan tali T_1 adalah

- a. 100 N
b. 200 N
c. 300 N
d. 400 N
e. 500 N
6. Perhatikan gambar berikut.



Resultan dari kedua gaya pada gambar tersebut terletak di

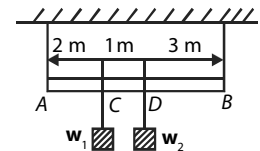
- a. $x = -2,8$ m
b. $x = 0,6$ m
c. $x = 1,2$ m
d. $x = 1,4$ m
e. $x = 2,1$ m
7. Perhatikan gambar berikut.



Batang AB yang panjangnya 80 cm diberi beban di ujungnya sebesar 30 N. Jika panjang $AC = 60$ cm dan massa batang diabaikan, besar tegangan tali T adalah

- a. 36 N
b. 48 N
c. 50 N
d. 65 N
e. 80 N

8. Perhatikan gambar berikut.



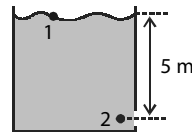
Jika sebuah batang AB yang beratnya diabaikan, dan kedua ujungnya digantungkan dengan tali, kemudian dan diberi beban masing-masing $w_1 = 300$ N dan $w_2 = 600$ N. Diketahui $AC = 2$ m, $CD = 1$ m, dan $DB = 3$ m, besar tegangan tali di A dan di B adalah

- a. 600 N dan 300 N
b. 450 N dan 450 N
c. 400 N dan 500 N
d. 500 N dan 400 N
e. 300 N dan 600 N

9. Rapat massa segumpal es adalah 917 kg/m^3 . Gumpalan es yang terapung dalam air akan muncul di atas permukaan air dengan volume
- $0,0830 \text{ m}^3$
 - $0,0917 \text{ m}^3$
 - $0,1 \text{ m}^3$
 - 1 m^3
 - $1,5 \text{ m}^3$
10. Sebuah pipa barometer diganti dengan pipa yang luas penampangnya dua kalinya. Pada tekanan udara luar 1 atmosfer, tinggi raksa dalam pipa adalah
- 19 cm
 - 30 cm
 - 76 cm
 - 114 cm
 - 152 cm
11. Sebuah pipa silinder lurus memiliki luas penampang 200 mm^2 dan 100 mm^2 . Pipa tersebut diletakkan secara horizontal, sedangkan air di dalamnya mengalir dari arah penampang besar ke penampang kecil. Jika kecepatan arus di penampang besar adalah 2 m/s , kecepatan arus di penampang kecil adalah
- $\frac{1}{4} \text{ m/s}$
 - $\frac{1}{2} \text{ m/s}$
 - 1 m/s
 - 2 m/s
 - 4 m/s
12. Sebuah balon udara bermassa 5 kg berisi Helium ($\rho_{\text{He}} = 0,178 \text{ kg/m}^3$). Jika balon tersebut harus mengangkat beban 30 kg ($\rho_{\text{udara}} = 1,29 \text{ kg/m}^3$), volume balon tersebut adalah
- $30,0 \text{ m}^3$
 - $31,5 \text{ m}^3$
 - $32,0 \text{ m}^3$
 - $33,0 \text{ m}^3$
 - $34,0 \text{ m}^3$
13. Diketahui data detak jantung Fauzi 65 kali per menit. Besar daya yang dikeluarkan Fauzi jika jantung memompakan 75 mL darah dengan tekanan rata-rata 100 mmHg untuk setiap detakan adalah ($1 \text{ cmHg} = 1.333 \text{ Pa}$)
- 100 watt
 - 10,8 watt
 - 1,08 watt
 - 1,66 watt
 - 16,6 watt
14. Sebuah pompa menaikkan air sebanyak 5 m^3 setinggi 20 m , kemudian mengalirkannya ke dalam pipa bertekanan 150 kPa . Besar usaha W adalah
- $0,8 \times 10^4 \text{ J}$
 - $9,8 \times 10^5 \text{ J}$
 - $9,0 \times 10^6 \text{ J}$
 - $1,73 \times 10^5 \text{ J}$
 - $1,73 \times 10^6 \text{ J}$

15. Diketahui massa jenis air laut $1,03 \text{ g/cm}^3$ dan tekanan udara luar $= 10^5 \text{ N/m}^2$. Jika kapal selam berada di kedalaman 120 m , tekanan yang dialami kapal selam tersebut adalah
- $1,50 \text{ Mpa}$
 - $1,45 \text{ Mpa}$
 - $1,41 \text{ Mpa}$
 - $1,31 \text{ Mpa}$
 - $1,25 \text{ Mpa}$

16. Perhatikan gambar berikut ini.



Jika diameter lubang 3 cm , volume air yang keluar dari lubang di titik 2 setiap menit adalah

- $0,42 \text{ m}^3$ per menit
 - $0,52 \text{ m}^3$ per menit
 - $0,68 \text{ m}^3$ per menit
 - $0,72 \text{ m}^3$ per menit
 - $0,75 \text{ m}^3$ per menit
17. Setelah diukur dengan sebuah manometer, diketahui tekanan air di dalam sebuah tangki adalah 500 kPa . Perhatikan gambar di samping. Jika terjadi kebocoran di titik 2, kecepatan air yang keluar dari titik tersebut adalah
-
- 32 m/s
 - 36 m/s
 - 40 m/s
 - 42 m/s
 - 45 m/s
18. Dua 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 molekul kedua gas tersebut, yaitu p_A dan p_B akan berkaitan satu sama lain menurut rumus
- $p_A = p_B$
 - $p_A = \sqrt{\frac{M_A}{M_B}} p_B$
 - $p_A = \sqrt{\left(\frac{M_A}{M_B}\right)} p_B$
 - $p_A = \left(\frac{M_B}{M_A}\right) p_B$
 - $p_A = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} p_B$
19. Partikel-partikel gas ideal memiliki sifat antara lain:
- selalu bergerak,
 - tidak saling tarik menarik,
 - bertumbukan lenting sempurna, dan
 - tidak mengikuti Hukum Newton tentang gerak.

- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - semua benar
20. Pada suatu saat, besar tekanan udara luar = 76 cmHg. Alat ukur tekanan (manometer terbuka) menunjukkan bahwa tekanan di dalam tangki adalah 400 cmHg. Suhu gas dalam tangki 9°C. Kemudian, karena pemanasan, suhu tangki naik menjadi 31°C. Tekanan yang ditunjukkan manometer adalah
- 513 cmHg
 - 476 cmHg
 - 437 cmHg
 - 51,3 cmHg
 - 43,7 cmHg
21. Sebuah tangki bervolume 3 L gas oksigen pada suhu 20°C dan tekanan tangki 25×10^5 Pa. Jika diketahui m oksigen = 32 kg/mol, tekanan udara luar 1×10^5 Pa, dan $R = 8,314$ J/kmolK, massa oksigen dalam tangki tersebut adalah
- 0,098 kg
 - 0,102 kg
 - 0,150 kg
 - 0,180 kg
 - 0,200 kg
22. Volume 4,0 g gas oksigen ($M = 32$ kg/mol) pada keadaan normal adalah
- $2,8 \times 10^{-5}$ m³
 - $2,8 \times 10^{-4}$ m³
 - $2,8 \times 10^{-3}$ m³
 - $2,8 \times 10^{-2}$ m³
 - $2,8 \times 10^{-1}$ m³
23. Sebuah tabung reaksi yang panjangnya 15 cm dengan penampang beraturan akan diturunkan dengan ujung terbuka ke dalam danau air tawar. Agar tabung terisi air seperempat bagian, tabung tersebut harus ditempatkan di kedalaman (tekanan atmosfer = 100 kPa).
- 3 m
 - 4 m
 - 5 m
 - 6 m
 - 7 m
24. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi bersuhu 800 K dan memiliki efisiensi 40%. Agar efisiensinya menjadi 50%, suhu reservoir suhu tinggi harus dinaikkan menjadi
- 900 K
 - 960 K
 - 1.000 K
 - 1.180 K
 - 1.600 K
25. Siklus Carnot dibatasi oleh dua garis, yaitu
- isobarik
 - adiabatik
 - isovolume
 - isotermik
- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - semua benar
26. Efisiensi mesin Carnot yang beroperasi dengan suhu rendah $\frac{1}{2} T$ kelvin dan bersuhu tinggi T kelvin adalah
- 25 %
 - 33 %
 - 58 %
 - 66 %
 - 75 %
27. Mesin Carnot dioperasikan antara dua reservoir kalor masing-masing bersuhu T_1 dan T_2 , dengan $T_2 > T_1$. Efisiensi mesin tersebut 40 % dan besarnya $T_1 = 21^\circ\text{C}$. Agar efisiensinya naik 60 %, besar perubahan T_2 adalah
- 250 K
 - 300 K
 - 350 K
 - 400 K
 - 500 K
- (UMPTN 2000)
28. Sebuah mesin turbin memakai uap dengan suhu awal 550°C dan membuangnya pada suhu 35°C. Efisiensi maksimum mesin turbin tersebut adalah
- 33 %
 - 43 %
 - 53 %
 - 63 %
 - 73 %
29. Pada suatu proses, kalor sebanyak 8.000 kalori dihantarkan pada sistem, sedangkan sistem melakukan usaha 6.000 joule. Besar energi yang berubah dalam sistem tersebut adalah
- 33,5 kJ
 - 27,5 kJ
 - 20 kJ
 - 18 kJ
 - 15 kJ
30. Sebuah mesin pengaduk berdaya 100 watt dipakai untuk mengaduk 5 kg air. Kemudian, suhu air naik akibat adanya gesekan di dalam air. Dengan menganggap semua usaha menjadi kalor, waktu yang dibutuhkan mesin untuk bekerja agar suhu air naik 6°C adalah
- 21 menit
 - 20 menit
 - 19 menit
 - 18 menit
 - 17 menit

B. Jawablah pertanyaan berikut ini dengan tepat.

1. Sebuah roda yang momen inersianya $0,002 \text{ kgm}^2$ dapat berputar bebas pada sumbu datar. Tali dililitkan pada tepi roda tersebut dan pada ujung tali digantungkan beban 800 g . Jari-jari sumbu roda tersebut adalah 2 cm . Begitu beban dilepas, roda mulai berputar. Berapa jauhkah benda tersebut harus jatuh agar roda berkecepatan 3 putaran/sekon?
2. Sebuah bola basket menggelinding tanpa selip pada bidang miring yang panjangnya 5 m dengan sudut kemiringan 30° . Jika $r_{\text{bola}} = 20 \text{ cm}$, $m = 2 \text{ kg}$, dan bola dilepaskan tanpa kecepatan awal dari ujung atas bidang, berapakah kecepatan linear bola saat tiba di ujung bawah bidang?
3. Sebuah bola pejal menggelinding di lantai datar dengan $v = 20 \text{ m/s}$. Kemudian, bola tersebut melewati tanjakan dengan sudut 30° terhadap bidang horizontal. Jika gaya gesek bola dan lantai diabaikan, berapakah ketinggian yang dapat dicapai bola tersebut dari dasar lantai?
4. Udara yang bermassa jenis $1,36 \text{ kg/m}^3$ dilewatkan pada sebuah pipa yang memiliki luas penampang 150 cm^2 . Jika diukur dengan pipa pitot, perbedaan tinggi raksa di dalam manometer adalah $0,8 \text{ mm}$. Tentukan volume udara yang mengalir dalam waktu 1 menit.
5. Sepotong aluminium dalam udara beratnya $8,35 \text{ g}$ ($\rho_{\text{aluminium}} = 2,70 \text{ g/cm}^3$). Jika benda tersebut digantungkan pada seutas tali, dan dicelupkan dalam minyak ($\rho_{\text{minyak}} = 0,75 \text{ g/cm}^3$), berapakah tegangan tali tersebut?
6. Sebuah bak air memiliki tinggi 4 m . Sebuah lubang pada bak tersebut memancarkan air sejauh 4 cm . Jika percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan ketinggian air di dalam bak air tersebut.
7. Tentukanlah rapat massa gas metan ($M = 16 \text{ kg/mol}$) pada suhu 20°C dan tekanan 5 atm .
8. Tentukan v_{rms} dari suatu gas yang berada di dalam sebuah tabung tertutup dengan volume 1 liter dan tekanan sebesar $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ jika rapat massa gas tersebut 10^{-2} g/cm^3 .
9. Gas hidrogen ($M = 2 \text{ kg/mol}$) dan gas nitrogen ($M = 28 \text{ kg/mol}$) berada pada suhu yang sama. Tentukanlah perbandingan:
 - a. $(E_k)_H : (E_k)_N$; dan
 - b. $(v_{\text{rms}})_H : (v_{\text{rms}})_N$.
10. Sebuah pesawat pendingin memiliki koefisien daya guna sebesar $6,5$. Jika temperatur reservoir suhu tinggi adalah 30°C , hitunglah temperatur reservoir suhu rendahnya.

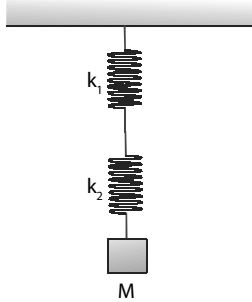
Tes Kompetensi Akhir

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

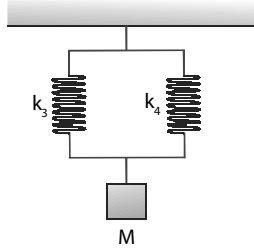
- Terhadap koordinat x horizontal dan y vertikal, sebuah benda yang bergerak mengikuti gerak peluru mempunyai komponen-komponen kecepatan yang
 - besarnya tetap pada arah x dan berubah beraturan pada arah y
 - besarnya tetap pada arah y dan berubah beraturan pada arah x
 - besarnya tetap, baik pada arah x maupun pada arah y
 - besarnya berubah beraturan, baik pada arah x maupun pada arah y
 - besar dan arahnya terus-menerus berubah terhadap waktu
- Posisi sebuah benda dinyatakan dengan persamaan $\mathbf{r} = \{15t\sqrt{3}\mathbf{i} + (15t - 5t^2)\mathbf{j}\}$ m. Setelah benda bergerak selama 1,5 sekon, kelajuannya adalah
 - 0
 - 15 m/s
 - $11,5\sqrt{3}$ m/s
 - 22,5 m/s
 - $15\sqrt{3}$ m/s

(UAN 2002)
- Pernyataan yang tidak benar mengenai hubungan antara percepatan tangensial, gerak rotasi suatu partikel, dan besaran-besaran sudutnya adalah
 - percepatan tangensial menunjukkan perubahan besar kelajuan linear dari partikel
 - percepatan tangensial selalu memiliki partikel yang bergerak melingkar
 - percepatan tangensial memiliki partikel yang bergerak dengan laju linear tetap
 - percepatan tangensial sebanding dengan percepatan sudut dan jari-jari
 - percepatan tangensial selalu mengarah ke pusat lintasan melingkarnya
- Posisi sebuah benda yang dilemparkan vertikal ke atas dinyatakan dengan persamaan $y = (2t + 9t^2)$ m, dengan t dalam sekon. Kecepatan awal benda adalah
 - 1 m/s
 - 2 m/s
 - 3 m/s
 - 4 m/s
 - 5 m/s
- Sebuah benda yang beratnya w meluncur ke bawah dengan kecepatan tetap pada suatu bidang miring yang kasar. Bidang miring tersebut membentuk sudut 30° terhadap horizontal. Koefisien gesekan antara benda dan bidang tersebut adalah
 - $\frac{1}{2}w\sqrt{3}$
 - $\frac{1}{2}\sqrt{3}$
 - $\frac{1}{2}$
 - $\frac{1}{2}w$
 - $\frac{1}{3}\sqrt{3}$
- Sebuah benda bermassa 25 kg didorong dengan gaya 50 N arah mendatar. Koefisien gesekan ketika benda tepat akan bergerak adalah
 - 0,1
 - 0,2
 - 0,3
 - 0,4
 - 0,5
- Jika percepatan gravitasi di permukaan Bumi g , dan jari-jari Bumi R maka percepatan gravitasi di suatu titik yang berjarak R dari permukaan Bumi adalah
 - $\frac{1}{4}g$
 - $\frac{1}{2}g$
 - g
 - $2g$
 - $4g$
- Sebuah pegas dengan tetapan 400 N/m diberi beban 4 kg dan ditarik ke atas dengan percepatan 2 m/s^2 . Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ maka pertambahan panjang pegas tersebut adalah
 - 0,12 m
 - 0,24 m
 - 0,36 m
 - 0,42 m
 - 0,48 m
- Seorang pelajar yang massanya 50 kg, bergantung pada ujung sebuah pegas, sehingga pegas bertambah panjang 10 cm. Dengan demikian, konstanta pegas bernilai
 - 500 N/m
 - 5 N/m
 - 50 N/m
 - 20 N/m
 - 5.000 N/m

(UMPTN 1999)
- Pegas disusun secara seri dan paralel seperti gambar berikut ini.



k_1
 k_2
M



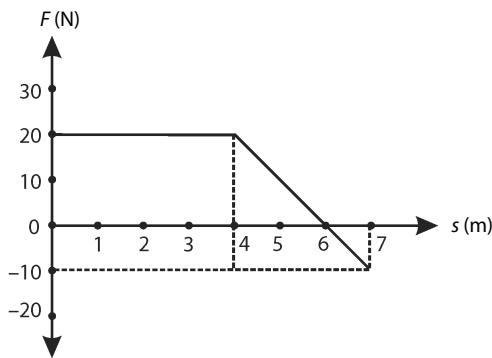
k_3 k_4
M

Ujung pegas digantungi beban yang sama besar. Jika konstanta pegas $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$, perbandingan periode susunan seri dan paralel adalah

 - 5 : 4
 - 2 : 1
 - 3 : 2
 - 1 : 2
 - 2 : 3

(UMPTN 1998)

11. Grafik berikut menunjukkan gerakan sebuah benda bermassa 10 kg pada bidang datar tanpa gesekan karena pengaruh gaya yang berubah-ubah.



- Jika kecepatan benda saat $s = 0$ adalah 9 m/s, maka:
- (1) kecepatan benda saat $s = 7$ m adalah 10 m/s
 - (2) perubahan energi kinetik dari $s = 0$ sampai dengan $s = 7$ m adalah 95 joule
 - (3) besar usaha dari $s = 0$ sampai dengan $s = 7$ m adalah 95 joule

Pernyataan di atas yang benar adalah

- a. (1), (2), dan (3)
 - b. (1) dan (3)
 - c. (2) dan (3)
 - d. (1) saja
 - e. (1) dan (2)
- (UAN 2003)
12. Benda bermassa 5 kg dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal 10 m/s. Besarnya energi potensial di titik tertinggi yang dicapai benda adalah
- a. 200 J
 - b. 250 J
 - c. 300 J
 - d. 350 J
 - e. 400 J
13. Sebuah pegas yang konstantanya k diberi beban bermassa m . Beban digetarkan dengan amplitudo A . Energi potensial beban itu pada saat kecepatannya 0,8 kali kecepatan maksimum adalah
- a. $0,16 kA^2$
 - b. $0,18 kA^2$
 - c. $0,32 kA^2$
 - d. $0,36 kA^2$
 - e. $0,50 kA^2$

(UAN 2004)

14. Sebuah balok bermassa 10 kg didorong dari dasar suatu bidang miring yang panjangnya 5 meter dan puncak bidang miring berada 3 m dari tanah. Jika bidang miring dianggap licin dan percepatan gravitasi Bumi = 10 m/s^2 , usaha yang harus dilakukan untuk mendorong balok adalah
- a. 300 joule
 - b. 1.500 joule
 - c. 3.000 joule
 - d. 3.500 joule
 - e. 4.000 joule
15. Sebuah mobil dengan massa 1 ton bergerak dari keadaan diam. Sesaat kemudian, kecepatannya menjadi 6 m/s. Besar usaha yang dilakukan oleh mesin mobil tersebut adalah
- a. 9.000 J
 - b. 10.000 J
 - c. 12.000 J
 - d. 15.000 J
 - e. 18.000 J

16. Di antara benda bergerak berikut ini, benda yang akan mengalami gaya paling besar jika menumbuk tembok hingga berhenti adalah

- a. benda bermassa 40 kg dengan laju 25 m/s
- b. benda bermassa 50 kg dengan laju 15 m/s
- c. benda bermassa 100 kg dengan laju 10 m/s
- d. benda bermassa 150 kg dengan laju 7 m/s
- e. benda bermassa 200 kg dengan laju 5 m/s

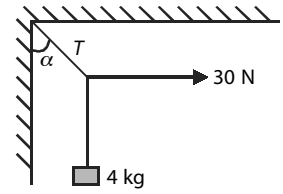
- 17.



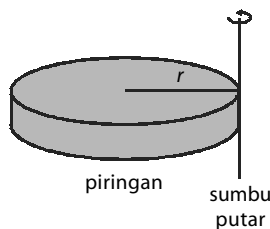
Peluru dengan massa 10 gram dan kecepatan 1.000 m/s mengenai dan menumbuk sebuah balok dengan massa 100 kg yang diam di atas bidang datar tanpa gesekan. Kecepatan peluru setelah menembus balok adalah 100 m/s. Kecepatan balok karena tertembus peluru adalah

- a. 900 m/s
 - b. 90 m/s
 - c. 9 m/s
 - d. 0,9 m/s
 - e. 0,09 m/s
18. Bola bermassa M kg jatuh tanpa kecepatan awal ke lantai dari ketinggian h meter. Jika percepatan gravitasi g dan koefisien elastisitas bola terhadap lantai adalah ℓ maka pernyataan-pernyataan tentang bola berikut ini benar, *kecuali*
- a. besar kecepatan pantulan yang pertama = $\ell \sqrt{\ell gh}$ m/s
 - b. besar kecepatan pantulan yang kedua = $\ell^2 \sqrt{2gh}$ m/s
 - c. tinggi maksimal pantulan pertama = ℓh m
 - d. tinggi maksimal pantulan kedua = $\ell^4 h$ m
 - e. kecepatan bola saat menumbuk lantai = $\sqrt{2gh}$ m/s
19. Sebuah peluru bermassa 25 gram ditembakkan dari sebuah senapan ke arah sebuah balok bermassa 7,5 kg sehingga peluru bersarang di dalam balok kayu tersebut. Balok berayun dan naik setinggi 50 cm dari keadaan semula. Jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 , kecepatan peluru setelah mengenai balok adalah
- a. $101 \sqrt{10}$ m/s
 - b. $102 \sqrt{10}$ m/s
 - c. $103 \sqrt{10}$ m/s
 - d. $100 \sqrt{2}$ m/s
 - e. $101 \sqrt{2}$ m/s
20. Sebuah bola kasti bermassa 0,3 kg dalam keadaan diam, kemudian dipukul sehingga bola meluncur dengan laju 100 m/s dan pemukul bola menyentuh bola selama 0,1 sekon. Besar gaya pemukul adalah
- a. 120 N
 - b. 130 N
 - c. 140 N
 - d. 150 N
 - e. 160 N
21. Sebuah benda berotasi dari keadaan diam sehingga dalam waktu 1 sekon memiliki kecepatan 10 rad/s. Sebuah titik P berada pada benda dan berjarak 5 cm dari sumbu rotasinya. Percepatan tangensial rata-rata yang dimiliki titik P tersebut adalah

- a. $0,25 \text{ m/s}^2$ d. $0,1 \text{ m/s}^2$
 b. $0,5 \text{ m/s}^2$ e. $0,125 \text{ m/s}^2$
 c. $0,75 \text{ m/s}^2$
22. Perhatikan gambar di samping. Sebuah piringan homogen yang memiliki massa m dan jari-jari r diputar pada salah satu titik di garis singgungnya. Momen inersia dari piringan yang diputar tersebut adalah
- a. $\frac{3}{2}mr^2$ d. $\frac{2}{5}mr^2$
 b. $\frac{1}{2}mr^2$ e. $\frac{2}{3}mr^2$
 c. mr^2
23. Sebuah bola pejal bermassa 5 kg dan berjari-jari 5 cm . Bola tersebut menggelinding di permukaan jalan yang kasar akibat sebuah gaya dorong $F = 20 \text{ N}$. Jika bola menggelinding sempurna maka percepatan yang dialami bola pejal tersebut adalah
- a. 4 m/s^2 d. $5,4 \text{ m/s}^2$
 b. $1,3 \text{ m/s}^2$ e. $2,7 \text{ m/s}^2$
 c. 8 m/s^2
24. Perhatikan sistem pada gambar berikut. Gaya-gaya yang bekerja pada benda dalam keadaan setimbang. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tegangan T dan $\sin \alpha$ masing-masing adalah



- a. 60 N dan $\frac{4}{6}$ d. 50 N dan $\frac{3}{5}$
 b. 60 N dan $\frac{3}{7}$ e. 40 N dan $\frac{3}{5}$
 c. 60 N dan $\frac{4}{5}$
25. Sebuah piringan berbentuk silinder homogen berputar pada porosnya dengan kecepatan awal 10 rad/s . Bidang piringan sejajar bidang horizontal. Massa piringan = $0,9 \text{ kg}$ dan jari-jari piringan = $0,4 \text{ m}$. Jika di atas piringan diletakkan cincin bermassa $0,5 \text{ kg}$, berjari-jari $0,1 \text{ m}$, dan pusat cincin tepat di atas pusat piringan maka kecepatan sudut piringan dan cincin ketika berputar adalah
- a. 16 rad/s d. $16,8 \text{ rad/s}$
 b. 18 rad/s e. $18,6 \text{ rad/s}$
 c. $15,6 \text{ rad/s}$
26. Sebuah bak mandi berbentuk balok memiliki panjang 2 m , lebar 1 m , dan tinggi $0,5 \text{ m}$. Bak mandi tersebut berisi 50 liter air ($\rho_{\text{air}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$). Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tekanan hidrostatik pada dasar bak adalah
- a. 100 Pa d. 250 Pa
 b. 150 Pa e. 300 Pa
 c. 200 Pa
27. Sebuah pompa hidrolik memiliki dua penghisap yang berjari-jari masing-masing 10 cm dan 50 cm . Pada penghisap kecil, dikerjakan gaya sebesar 100 N . Gaya yang dihasilkan pada penghisap besar adalah



- a. 2.500 N
 b. 3.000 N
 c. 3.500 N
 d. 4.000 N
 e. 4.500 N
28. Berikut contoh penerapan Hukum Bernoulli dalam kehidupan sehari-hari, *kecuali*
- a. gaya angkat pesawat terbang
 b. karburator mobil dan motor
 c. penyemprot cairan nyamuk
 d. venturimeter
 e. rem hidrolik
29. Sebuah logam berbentuk bola berjari-jari 4 cm dan massa jenisnya 2 g/cm^3 . Logam tersebut jatuh bebas di dalam bak berisi zat cair yang memiliki koefisien viskositas 10^3 Ns/m^2 . Jika massa jenis zat cair 1 g/cm^3 dan percepatan gravitasi Bumi 10 m/s^2 maka kecepatan terminal bola logam adalah
- a. $1,676 \text{ m/s}$ d. $1,667 \text{ m/s}$
 b. $1,286 \text{ m/s}$ e. $1,267 \text{ m/s}$
 c. $1,367 \text{ m/s}$
30. Sebuah pipa yang lurus mempunyai dua penampang, dengan luas permukaan masing-masing 100 m^2 dan 50 m^2 yang diletakkan secara horizontal. Air mengalir dari penampang besar ke penampang kecil. Jika kecepatan arus pada penampang besar 4 m/s , kecepatan arus air pada penampang kecil adalah
- a. 5 m/s d. 8 m/s
 b. 6 m/s e. 9 m/s
 c. 7 m/s
31. Jika suatu gas yang memenuhi Hukum Boyle dijadikan setengahnya maka tekanan menjadi dua kalinya. Hal ini disebabkan karena
- a. molekul-molekul merapat sehingga kecepatannya menjadi dua kali
 b. molekul-molekul bergetar dua kali lebih cepat
 c. molekul-molekul besarnya menjadi dua kali
 d. banyaknya molekul menjadi dua kali
 e. energi kinetik molekul-molekul menjadi dua kali
32. Jika konstanta Boltzman $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/k}$ maka energi kinetik sebuah atom gas helium pada suhu 27°C adalah
- a. $4,14 \times 10^{-21} \text{ J}$ d. $6,21 \times 10^{-21} \text{ J}$
 b. $2,07 \times 10^{-21} \text{ J}$ e. $12,42 \times 10^{-21} \text{ J}$
 c. $5,59 \times 10^{-21} \text{ J}$
33. Di dalam ruang bervolume 2 L , terdapat 100 mg gas bertekanan 2 atm . Jika $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$, kelajuan rata-rata partikel gas tersebut adalah
- a. $4\sqrt{3} \text{ m/s}$ d. $4\sqrt{2} \text{ m/s}$
 b. $2\sqrt{3} \text{ m/s}$ e. $2\sqrt{2} \text{ m/s}$
 c. $3\sqrt{2} \text{ m/s}$
34. Massa sebuah molekul nitrogen adalah 10 kali massa molekul hidrogen. Jika molekul nitrogen pada suhu 284 K memiliki laju rata-rata yang sama dengan laju rata-rata molekul hidrogen maka dapat diperkirakan suhu hidrogen tersebut adalah

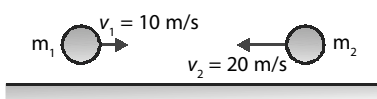
- a. 20,3 K d. 50,3 K
 b. 30,3 K e. 60,3 K
 c. 40,3 K
35. Diketahui gas He sebanyak 1 mol dan suhunya 120°C. Energi dalam gasnya adalah
 a. 4.508 joule d. 2.675 joule
 b. 3.675 joule e. 3.067 joule
 c. 4.901 joule
36. Sebuah tabung berisi 5 L gas ideal pada suhu 150°C. Kemudian, gas tersebut dipanaskan sehingga suhunya menjadi 300°C. Jika tekanan mula-mula gas adalah 3×10^2 Pa dan volume tabung tetap, tekanan gas pada tabung adalah
 a. 4×10^3 Pa d. 4×10^2 Pa
 b. 5×10^3 Pa e. 5×10^2 Pa
 c. 6×10^3 Pa
37. Harga efisiensi suatu mesin yang bekerja pada reservoir suhu rendah 37°C dan suhu tinggi 333°C adalah
 a. 46,5% d. 49,0%
 b. 47,6% e. 49,6%
 c. 48,8%

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat.

- Sebuah partikel bergerak dari posisi awal $(2i + 4j + 3k)$ meter dengan kecepatan tetap yang besarnya 12,5 m/s. Jika lintasan partikel melalui $(22\text{ m}, 16\text{ m}, -6\text{ m})$, hitunglah vektor kecepatan partikel tersebut.
- Jika percepatan gravitasi di permukaan Bumi 9,8 m/s² dan $G = 6,67 \times 10^{-11}$ Nm²/kg², tentukanlah massa Bumi yang berbentuk bola dengan jari-jari 6.370 km.
- Sebuah pegas bergetar harmonis dengan amplitudo 4 cm. Hitunglah simpangan getar saat energi kinetik dua kali energi potensial.
- Sebuah peluru yang massanya 50 gram ditembakkan dan mengenai balok kayu bermassa 1,75 kg, yang terletak di permukaan bidang datar kasar dengan $\mu_k = 0,5$. Jika peluru bersarang di dalam balok yang mengakibatkan balok bergeser sejauh 10 meter, tentukanlah kecepatan peluru sesaat sebelum menembus balok ($g = 10\text{ m/s}^2$).

(UAN 2004)

- Dua buah benda yang memiliki massa $m_1 = m_2 = 2\text{ kg}$ bergerak saling mendekati seperti pada gambar berikut.

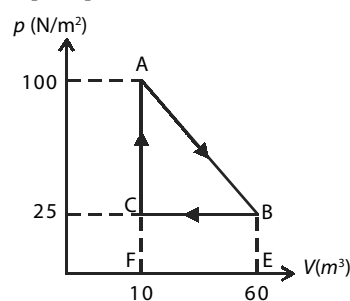


Jika kedua benda bertumbukkan lenting sempurna, tentukanlah kecepatan masing-masing benda setelah bertumbukkan dan tentukan pula arahnya.

- Sebuah batang PS (massa diabaikan) panjangnya 18 m, PQ = QR = RS. Tentukan momen gaya yang bekerja pada batang jika:
 - pusat momen gaya di P;
 - pusat momen gaya di S.

- Sebuah lemari es bersuhu -5°C . Fluida yang dimampatkan di dalamnya mengembun pada suhu 25°C . Koefisien daya guna lemari es tersebut adalah
 - 7 K d. 10 K
 - 8 K e. 11 K
 - 9 K
- Sebuah mesin Carnot menggunakan reservoir suhu tinggi 700 K dan memiliki efisiensi 25%. Agar efisiensi naik menjadi 75%, suhu reservoir tinggi harus dinaikkan sebesar
 - 475 K d. 625 K
 - 500 K e. 525 K
 - 550 K
- Sebuah mesin pendingin ruangan (AC) memiliki daya 1.000 watt. Jika suhu ruangan 10°C dan suhu udara 28°C , banyaknya kalor yang diserap mesin pendingin selama 10 menit adalah
 - $9,42 \times 10^6$ J d. $8,84 \times 10^6$ J
 - $9,24 \times 10^6$ J e. $7,50 \times 10^6$ J
 - $8,48 \times 10^6$ J

- Fluida ideal dengan kecepatan 3 m/s di dalam pipa bergaris tengah 4 cm masuk ke dalam pipa bergaris tengah 8 cm. Tentukanlah kecepatan alir fluida pada pipa yang besar.
- Dalam sebuah ruang tertutup bervolume 1 liter, terdapat 1 mol gas bertekanan 10^3 Pa. Jika partikel gas memiliki kelajuan rata-rata 1.000 m/s, tentukan massa gas dan energi kinetik rata-rata gas tersebut.
- Gas oksigen berada dalam ruang tertutup bersuhu 37°C dan tekanan 10 atm, serta volumenya 10 L. Kemudian, gas oksigen tersebut dipanaskan sampai 50°C sehingga tekanannya naik 12 atm. Tentukan volume gas sekarang.
- Suatu gas dalam silinder tertutup mengalami proses seperti pada grafik berikut.



Tentukan usaha yang dilakukan gas pada:

- proses AB (W_{AB});
- proses BC (W_{BC});
- proses CD (W_{CA});
- seluruh proses (W_{total}).

Kunci Jawaban



Bab 1 Analisis Gerak

Tes Kompetensi Awal

- $3x^2 - 6x - 5$
 - $2xy - 6xyz - 5$
 - $\frac{1}{3}x^3 + \frac{5}{2}x^2 - 3x + C$
 - $\frac{1}{3}x^3y + 5xy + \frac{1}{2}x^2 + C$
- Kecepatan linear memiliki perpindahan linear, sedangkan kecepatan sudut memiliki perpindahan radial.

Tes Kompetensi Subbab A

- $6\mathbf{i} + 10\mathbf{j}$
 - 11,6 m
- 0,6 m/s²
 - 1,5 m/s
 - 3 m/s²
- 4 m/s²
 - 12,5 m

Tes Kompetensi Subbab B

- 1,6 s
 - 4,78 m
 - 9,6 m
- 0 (titik tertinggi)
 - 8,6 m/s
- 1,4 s
- 25,8 m/s

Tes Kompetensi Subbab C

- $-(4 \text{ m/s})\mathbf{i}, 8 \text{ m/s}^2$
- 18,7 m/s
 - 0,6 putaran per detik
 - 1,6 s

Tes Kompetensi Bab 1

A. Pilihan Ganda

- a 11. a
- b 13. e
- b 15. a
- c 17. c
- b 19. a

B. Soal Uraian

- 15,5 m/s
 - 2 m/s²
 - 43 m/s²
- 16,89 m/s
 - 56,89 m/s
- 0,71 m

Bab 2 Gaya

Tes Kompetensi Awal

- Karena tidak ada hambatan (gesekan) udara.
- Untuk seri: $\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}$
Untuk paralel: $k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n$

Tes Kompetensi Subbab A

- 20 N
- 3 m/s²
- 259,72 m
- 1 m/s²
- 8,53 m/s²
 - 70,24%

Tes Kompetensi Subbab B

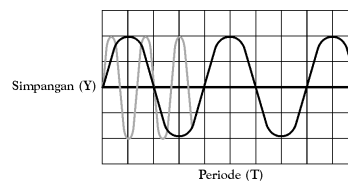
- 20 N
 - 0,176 m dari bola pertama
- $5,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- 23,3 s
- 2.500 N
- $12,48 \times 10^{10} \text{ N}$

Tes Kompetensi Subbab C

- $(63,69 \times 10^6 \text{ N/m}^2), (4 \times 10^{-4}), (15,9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2)$
- $6,6 \times 10^3 \text{ N/m}$
- 0,1 m, 100 N/m

Tes Kompetensi Subbab D

- 0,375 N
- 0,56 kg
-
-
-



Tes Kompetensi Bab 2

A. Pilihan Ganda

- d 15. c
- e 17. c
- a 19. a
- e 21. c
- a 23. c
- d 25. c
- c

B. Soal Uraian

1. 6 m/s^2
3. $2,5 \text{ m/s}^2$; 30 N
5. a. $4,17 \times 10^{23} \text{ N}$
b. $1,31 \times 10^4 \text{ m/s}$
7. $1,96 \text{ m/s}^2$
9. $0,6 \text{ cm}$

Bab 3 Usaha, Energi, dan Daya**Tes Kompetensi Awal**

1.
 - Usaha adalah proses transfer energi dengan melibatkan gaya yang menyebabkan terjadinya perpindahan.
 - Energi adalah suatu kemampuan untuk melakukan usaha.
3. Sebuah benda yang dilemparkan ke atas, kemudian jatuh ke permukaan Bumi.

Tes Kompetensi Subbab A

1. 160 J
3. 100 J
5. 12 J

Tes Kompetensi Subbab B

1. 300 m/s
3. 200 J
5. $0,638$

Tes Kompetensi Subbab C

1.
 - Gaya konservatif adalah gaya di mana usaha akibat gaya tersebut tidak mengubah energi mekanik sistem.
 - Gaya tidak konservatif adalah gaya di mana usaha oleh gaya tersebut dapat mengubah energi mekanik sistem.
3. mv^2
5. mgh
7. $21,9 \text{ m/s}$ dan 150 J
8. a. $12,7 \text{ m/s}$
b. 60 J

Tes Kompetensi Subbab D

1. $0,67 \text{ hp}$
3. 0
5. $83,3 \text{ watt}$
7. 20 m/s

Tes Kompetensi Bab 3**A. Pilihan Ganda**

1. c 11. c
3. a 13. d
5. b 15. c
7. b 17. e
9. e 19. b

B. Soal Uraian

1. 100 joule
3. $976,48 \text{ joule}$
5. $55,67 \text{ m/s}$

7. a. 20 joule
b. 480 joule
c. 500 joule
d. 50 m/s
9. 375 N/m

Bab 4 Momentum, Impuls, dan Tumbukan**Tes Kompetensi Awal**

1. Ya
3. Ukuran elastisitas benda-benda yang bertumbukan.

Tes Kompetensi Subbab A

1. a. 10^3 N
b. $2 \times 10^4 \text{ N}$

Tes Kompetensi Subbab B

1. a. $6,67 \text{ m/s}$
b. $26,67 \text{ m/s}$
c. $v_{px} = 16,67 \text{ m/s}$
 $v_{py} = 10 \text{ m/s}$

Tes Kompetensi Subbab C

1. $2p$
3. a. 42 m/s , 18 m/s , 0
b. $(20,4 \text{ m/s})$, $(3,6 \text{ m/s})$, $(10.886,4 \text{ J})$
c. 6 m/s , 6 m/s , 12.960 J
5. a. $3,5 \text{ m/s}$
b. $10,5 \text{ J}$
c. $0,4$
7. 201 m/s
9. $(3,33 \text{ m/s})$, $(33,34 \text{ J})$

Tes Kompetensi Subbab D

1. $3,6 \text{ m}$
3. $15,8 \text{ m}$

Tes Kompetensi Subbab E

1. $1,22 \text{ m}$
3. $1,42 \text{ m/s}$

Tes Kompetensi Subbab F

1. 10.000 N

Tes Kompetensi Bab 4**A. Pilihan Ganda**

1. a 11. d
3. d 13. d
5. a 15. d
7. d 17. e
9. b 19. b

B. Soal Uraian

1. 140 kg m/s
3. a. $0,7 \text{ m/s}$
b. $v_1' = 2,5 \text{ m/s}$ dan $v_2' = 2 \text{ m/s}$
5. $-33,33 \text{ m/s}$ (vertikal ke bawah)
7. $268,7 \text{ m/s}$
9. a. 1 meter
b. $0,16 \text{ meter}$
c. 0

Tes Kompetensi Fisika Semester 1

A. Pilihan Ganda

- c
17. d
- b
19. c
- d
21. a
- c
23. d
- a
25. b
- d
27. e
- b
29. a
- b

B. Soal Uraian

- 1 m/s^2
- $4,625 \text{ m/s}^2$; 45 N
- a. $4,17 \times 10^{23} \text{ N}$
b. 13.084 m/s
- 7.746 m/s
- $756,77 \text{ m}$

Bab 5 Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar

Tes Kompetensi Awal

- Momen gaya atau torsi merupakan besaran yang menyebabkan sebuah benda tegar (benda yang tidak dapat berubah bentuk) cenderung untuk berotasi terhadap porosnya.
 - Momen inersia merupakan sifat kecenderungan suatu benda untuk tetap mempertahankan gerak rotasinya.
- Kesetimbangan pada benda yang digantung melalui katrol dan benda yang bergerak menggelinding.

Tes Kompetensi Subbab A

- a. 8 rad , 64 rad
 460° , 3.670°
b. $16,8 \text{ m}$
c. 28 rad/s
d. 24 rad/s
- 24 rad/s^2 , 80 rad/s^2

Tes Kompetensi Subbab B

- $3,55 \text{ Nm}$
- a. 120 Nm
b. 120 Nm
- a. $2,7 \text{ rad/s}^2$
b. $(20,412 \text{ N})$, $(17,32 \text{ N})$

Tes Kompetensi Subbab C

- $0,8 \text{ m}$
- $213,3 \text{ N}$
- $163,8 \text{ N}$; 140 N ; $42,2^\circ$

Tes Kompetensi Bab 5

A. Pilihan Ganda

- d
9. d
- e
13. a
- c
15. a

B. Soal Uraian

- $0,26 \text{ Nm}$
- $1,025 \text{ kg m}^2$
- a. $12/5 \text{ m/s}^2$
b. $0,36 \text{ N rad}$
c. $4,8 \text{ m}$
- $41,8 \text{ Nm}$
- $50,2 \text{ sekon}$

Bab 6 Fluida

Tes Kompetensi Awal

- Hukum Pascal. Cara kerjanya dengan menggunakan konsep tekanan hidrostatik.
- Karena terdapat tegangan permukaan zat cair.

Tes Kompetensi Subbab A

- a. 12.160 N/m^2
b. 20.160 N/m^2
- a. 34 cm
b. $6,25 \text{ cm}^3$
- a. mengapung
b. 3 m^3
c. 24.000 N

Tes Kompetensi Subbab B

- $1,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$

Tes Kompetensi Subbab C

- $87,46 \text{ m/s}$
- 9.075 N
- $22,13 \text{ m/s}$

Tes Kompetensi Bab 6

A. Pilihan Ganda

- e
11. b
- b
13. c
- e
15. c
- d
17. d
- b
19. a

B. Soal Uraian

- 490 k Pa
- a. 4 m
b. $4 \times 10^4 \text{ N}$
c. $2 \times 10^4 \text{ N}$
- 1.250 sekon

Bab 7 Teori Kinetik Gas

Tes Kompetensi Awal

- Nitrogen, oksigen, dan karbondioksida. Pada keadaan STP, gas tersebut bukan merupakan gas ideal.
- Balon udara terbang dengan memanfaatkan massa jenis udara panas yang lebih ringan daripada udara bebas.

Tes Kompetensi Subbab A

- 16.628 Pa
- $13,4 \text{ mL}$

Tes Kompetensi Subbab B

- $E_k(\text{O}_2) : E_k(\text{N}_2) = 7 : 8$
 $v(\text{O}_2) : v(\text{N}_2) = 7 : 8$

Tes Kompetensi Subbab C

- $v_0 \sqrt{2}$
- 0,89 atm
- 3,74 kJ
- $1,05 \times 10^{23}$ molekul;
 $1,32 \times 10^{-10}$ m/s;
42,74 m/s

Tes Kompetensi Bab 7**A. Pilihan Ganda**

- b 11. d
- c 13. c
- b 15. a
- e 17. e
- a 19. d

B. Soal Uraian

- 44,37 cm³
- 52 g/cm³
- 30 liter
- 132 liter

Bab 8 Termodinamika**Tes Kompetensi Awal**

- Gelas tersebut dapat pecah karena ketika diisi air panas, permukaan gelas akan mengalami pemuaian akibat perubahan suhu yang tidak merata.
- Efisiensi, dalam kaitannya dengan kinerja mesin adalah perbandingan antara usaha yang dilakukan dengan kerja yang dihasilkan.

Tes Kompetensi Subbab A

- a. -375 kJ
b. 85 kJ
- 145,524 kPa
- 1.660,96 J

Tes Kompetensi Subbab B

- 450 J
- 3.324 J
- Gas ideal dapat terjadi jika tidak terdapat perpindahan panas. Perpindahan panas tidak akan terjadi jika suhu tetap (isothermal), tekanan tetap (isobar), dan volume tetap (isokhorik).

Tes Kompetensi Subbab C

- 1.000 K
- 40 %
- a. 60 %
b. 3.000 J

Tes Kompetensi Subbab D

- 8,93
- 410,86 watt
- $6,21 \times 10^8$ J

Tes Kompetensi Bab 8**A. Pilihan Ganda**

- b 11. d
- b 13. d
- d 15. e
- d 17. b
- a 19. c

B. Soal Uraian

- 49,8 atm
- 4.000 J
- 9.720 J
- $3,44 \times 10^{-3}$ J
- 60%

Tes Kompetensi Fisika Semester 2**A. Pilihan Ganda**

- d 17. a
- b 19. a
- c 21. b
- c 23. c
- a 25. c
- e 27. a
- c 29. b
- b

B. Soal Uraian

- 5,25 cm
- 28,6 m
- 0,059 N
- 3,32 kg/m³
- a. 1
b. 3,74

Tes Kompetensi Akhir**A. Pilihan Ganda**

- a 21. b
- e 23. e
- e 25. d
- a 27. a
- d 29. e
- a 31. a
- b 33. b
- e 35. c
- e 37. c
- a 39. d

B. Soal Uraian

- $\mathbf{v} = 10\mathbf{i} + 6\mathbf{j} - 4,5\mathbf{k}$
- $\frac{4}{3}\sqrt{3}$ cm
- $v_2' = +10$ m/s (ke kiri); $v_1' = -20$ m/s (ke kanan)
- $\frac{3}{4}$ m/s
- 8,68 L

Apendiks



Simbol-Simbol Matematika

=	: sama dengan	Δx	: perubahan x
\neq	: tidak sama dengan	$ x $: nilai absolut x
\approx	: hampir sama dengan	$n!$: $n(n-1)(n-2) \dots 1$
\sim	: dalam orde	Σ	: jumlah
\propto	: sebanding dengan	lim	: limit
$>$: lebih besar dari pada	$\Delta t \rightarrow 0$: Δt mendekati nol
$>$: lebih besar sama dengan	$\frac{dx}{dt}$: turunan x terhadap t
\gg	: jauh lebih besar dari pada	$\frac{\partial x}{\partial t}$: turunan parsial x terhadap t
$<$: lebih kecil	\int	: integral
$<$: lebih kecil sama dengan		
\ll	: jauh lebih kecil dari pada		

Rumus Trigonometri

$$\begin{aligned} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta &= 1 \\ \sec^2 \theta - \tan^2 \theta &= 1 \\ \csc^2 \theta - \cot^2 \theta &= 1 \\ \sin 2\theta &= 2 \sin \theta \cos \theta \\ \cos 2\theta &= \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \\ &= 2 \cos^2 \theta - 1 \\ &= 1 - 2 \sin^2 \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tan 2\theta &= \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta} \\ \sin \frac{1}{2} \theta &= \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}} \cos \frac{1}{2} \theta \\ &= \sqrt{\frac{1 + \cos \theta}{2}} \tan \frac{1}{2} \theta \\ &= \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta}} \end{aligned}$$

Turunan Fungsi-Fungsi Tertentu

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= 0 \text{ dengan } C \text{ adalah konstanta} \\ \frac{d(t^n)}{dt} &= nt^{n-1} \\ \frac{d}{dt} \sin \omega t &= \omega \cos \omega t \\ \frac{d}{dt} \cos \omega t &= -\omega \sin \omega t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \tan \omega t &= \omega \sec^2 \omega t \\ \frac{d}{dt} e^{bt} &= be^{bt} \\ \frac{d}{dt} \ln bt &= \frac{1}{t} \end{aligned}$$

Rumus-Rumus Integrasi

$$\begin{aligned} \int A dt &= At \\ \int A t dt &= \frac{1}{2} A t^2 \\ \int A t^n dt &= A \frac{t^{n+1}}{n+1} \quad n \neq -1 \\ \int A t^{-1} dt &= A \ln t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int e^{bt} dt &= \frac{1}{b} e^{bt} A t \\ \int \cos \omega t dt &= \frac{1}{\omega} \sin \omega t \\ \int \sin \omega t dt &= -\frac{1}{\omega} \cos \omega t \end{aligned}$$

Satuan-Satuan Dasar

Panjang	Meter (m) adalah jarak yang ditempuh oleh cahaya di ruang vakum dalam waktu $\frac{1}{299.792.458}$ sekon	Arus	Ampere (A) adalah arus pada dua kawat panjang paralel yang terpisah sejauh 1 m dan menimbulkan gaya magnetik persatuan panjang sebesar 2×10^{-7} N/m
Waktu	Sekon (s) adalah waktu yang diperlukan untuk 9.192.631.770 siklus pada radiasi yang berhubungan dengan transisi antara dua tingkat hiperfin dengan keadaan dasar pada atom ^{133}Cs	Temperatur	Kelvin (K) adalah $\frac{1}{273,16}$ dari temperatur termodinamika pada <i>triple point air</i>
Massa	Kilogram (kg) adalah massa pada Standar Internasional untuk bobot dan ukuran yang disimpan di Sevres, Prancis	Intensitas cahaya	Candela (cd) adalah intensitas cahaya dalam arah tegak lurus permukaan benda hitam seluas $1/600.000$ m pada temperatur beku platinum dengan tekanan 1 atm

Satuan-Satuan Turunan

Gaya	newton (N)	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$	Hambatan listrik	ohm (Ω)	$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$
Kerja, Energi	joule (J)	$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$	Kapasitas listrik	farad (F)	$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$
Daya	watt (W)	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$	Medan magnet	tesla (T)	$1 \text{ T} = 1 \text{ N/Am}$
Frekuensi	hertz (Hz)	$1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$	Fluks magnet	weber (Wb)	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$
Muatan listrik	coulomb (C)	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$	Induktansi	henry (H)	$1 \text{ H} = 1 \text{ J/A}^2$
Potensial listrik	volt (V)	$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$			

Data Terestrial

Percepatan gravitasi g	$9,80665 \text{ m/s}^2$	Tekanan	$101,325 \text{ kPa}$
Massa Bumi M_B	$5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$		$1,00 \text{ atm}$
Jari-jari Bumi, R_B , rata-rata	$6,37 \times 10^6 \text{ m}$	Massa molar udara	$28,97 \text{ g/mol}$
	3.960 mil	Massa jenis udara (STP), ρ_{udara}	$1,293 \text{ kg/m}^3$
Kecepatan lepas $\sqrt{2R_B g}$	$1,12 \times 10^4 \text{ m/s}$	Kecepatan suara (STP)	331 m/s
Konstanta Matahari*	$1,35 \text{ kW/m}^2$	Kalor didih air (0°C , 1 atm)	$333,5 \text{ kJ/kg}$
Suhu dan tekanan standar (STP):		Kalor penguapan air (100°C , 1 atm)	$2,257 \text{ MJ/kg}$
Temperatur	$273,15 \text{ K}$		

* Daya rata-rata yang terjadi pada 1 m^2 di luar atmosfer Bumi pada jarak rata-rata antara Bumi dan Matahari.

Data Astronomi

Bumi		Bulan	
Jarak ke Bulan*	$3,844 \times 10^8 \text{ m}$	Massa	$7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$
	$2,389 \times 10^5 \text{ mil}$	Jari-jari	$1,738 \times 10^6 \text{ m}$
Jarak ke Matahari, rata-rata*	$1,496 \times 10^{11} \text{ m}$	Periode	$27,32 \text{ hari}$
	$1,00 \text{ AU}$	Percepatan gravitasi pada permukaan	$1,62 \text{ m/s}^2$
Kecepatan orbit, rata-rata	$2,98 \times 10^4 \text{ m/s}$		
Matahari			
Massa	$7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$		
Jari-jari	$1,738 \times 10^6 \text{ m}$		

* pusat ke pusat

Konstanta Fisika

Konstanta gravitasi	G	$6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$	Permitivitas ruang hampa	ϵ_0	$8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$
Kecepatan cahaya	c	$2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$	Permeabilitas ruang hampa	μ_0	$4 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Muatan elektron	e	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$	Konstanta Planck	h	$6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$
Konstanta Avogadro	N_A	$6,002 \times 10^{23} \text{ partikel/mol}$		\hbar	$1,055 \times 10^{-34} \text{ Js}$
Konstanta gas	R	$8,314 \text{ J/molK}$	Massa elektron	m_e	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Konstanta Boltzmann	k	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	Massa proton	m_p	$1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Unit massa terpadu	u	$1,661 \times 10^{-24} \text{ g}$	Massa neutron	m_n	$1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Konstanta Coulomb	k	$8,988 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$			

Faktor-Faktor Konversi

Panjang

$1 \text{ km} = 0,6215 \text{ mil}$
 $1 \text{ mil} = 1,609 \text{ km}$
 $1 \text{ m} = 1,0396 \text{ yd} = 3,281 \text{ ft} = 39,37 \text{ inci}$
 $1 \text{ inci} = 2,54 \text{ cm}$
 $1 \text{ ft} = 12 \text{ inci} = 30,48 \text{ cm}$
 $1 \text{ yd} = 3 \text{ ft} = 91,44 \text{ cm}$
 $1 \text{ tahun cahaya} = 1 \text{ c tahun} = 9,461 \times 10^{15} \text{ m}$
 $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$

Luas

$1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$
 $1 \text{ km}^2 = 0,3851 \text{ mil}^2 = 247,1 \text{ ha}$
 $1 \text{ inci}^2 = 6,5416 \text{ cm}^2$
 $1 \text{ ft}^2 = 9,29 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
 $1 \text{ m}^2 = 10,76 \text{ ft}^2$
 $1 \text{ ha} = 43,560 \text{ ft}^2$
 $1 \text{ mil}^2 = 640 \text{ ha}^2 = 590 \text{ km}^2$

Volume

$1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3$
 $1 \text{ L} = 1.000 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
 $1 \text{ gal} = 3,786 \text{ L}$
 $1 \text{ gal} = 4 \text{ qt} = 8 \text{ pt} = 128 \text{ oz} = 231 \text{ inci}^3$
 $1 \text{ inci}^3 = 16,39 \text{ cm}^3$
 $1 \text{ ft}^3 = 1.728 \text{ inci}^3 = 28,32 \text{ L} = 2,832 \times 10^4 \text{ cm}^3$

Waktu

$1 \text{ jam} = 60 \text{ menit} = 3,6 \text{ ks}$
 $1 \text{ hari} = 24 \text{ jam} = 1.440 \text{ menit} = 86,4 \text{ ks}$
 $1 \text{ tahun} = 365,24 \text{ hari} = 31,56 \text{ Ms}$

Kecepatan

$1 \text{ km/jam} = 0,2778 \text{ m/s} = 0,6215 \text{ mil/jam}$
 $1 \text{ mil/jam} = 0,4470 \text{ m/s} = 1,609 \text{ km/jam}$
 $1 \text{ mil/jam} = 1,467 \text{ ft/s}$

Sudut dan Kecepatan Sudut

$1 \text{ rad} = 180^\circ$
 $1 \text{ rad} = 57,30^\circ$
 $1^\circ = 1,745 \times 10^{-2} \text{ rad}$
 $1 \text{ rev/menit} = 0,1047 \text{ rad/s}$
 $1 \text{ rad/s} = 9,549 \text{ rev/menit}$

Massa

$1 \text{ kg} = 1.000 \text{ g}$
 $1 \text{ ton} = 1.000 \text{ kg} = 1 \text{ Mg}$
 $1 \text{ u} = 1,6606 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $1 \text{ kg} = 6,022 \times 10^{23} \text{ u}$
 $1 \text{ slug} = 14,59 \text{ kg}$
 $1 \text{ kg} = 6,852 \times 10^{-2} \text{ slug}$
 $1 \text{ u} = 931,50 \text{ MeV}/c^2$

Massa Jenis

$1 \text{ g/cm}^3 = 10.000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/L}$
 $(1 \text{ g/cm}^3)g = 62,4 \text{ lb/ft}^3$

Gaya

$1 \text{ N} = 0,2248 \text{ lb} = 10^5 \text{ dyne}$
 $1 \text{ lb} = 4,4482 \text{ N}$
 $(1 \text{ kg})g = 2,2046 \text{ lb}$

Tekanan

$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$
 $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$
 $1 \text{ atm} = 14,7 \text{ lb/inci}^2 = 760 \text{ mmHg}$
 $1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg} = 133,32 \text{ Pa}$
 $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$

Energi

$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$
 $1 \text{ kal} = 4,184 \text{ J}$
 $1 \text{ Latm} = 101,325 \text{ J} = 24,217 \text{ kal}$
 $1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft lb} = 252 \text{ kal} = 1.054,35 \text{ J}$
 $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $1 \text{ u} c^2 = 931,50 \text{ MeV}$
 $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$

Daya

$1 \text{ daya kuda} = 550 \text{ ft lb/s} = 745,7 \text{ W}$
 $1 \text{ Btu/menit} = 17,58 \text{ W}$
 $1 \text{ W} = 1,341 \times 10^{-3} \text{ daya kuda} = 0,7376 \text{ ft lb/s}$

Medan Magnet

$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
 $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$

Konduktivitas Termal

$1 \text{ W/m K} = 6,938 \text{ Btu inci/jam ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$
 $1 \text{ Btu inci/jam ft}^2 \text{ }^\circ\text{F} = 0,1441 \text{ W/mK}$

Senarai

A

Amplitudo: simpangan terjauh pada suatu osilasi/ayunan

Astronomi: ilmu perbintangan.

Ayunan balistik: ayunan yang berfungsi untuk mengukur kecepatan gerak peluru.

B

Benda diskrit: benda yang bentuk dan ukurannya diabaikan

Benda tegar: benda yang bentuk dan ukurannya diperhatikan.

Besaran skalar: besaran yang hanya memiliki nilai.

Besaran vektor: besaran yang memiliki nilai dan arah.

E

Efisiensi mesin: ukuran kinerja sebuah mesin yang merupakan perbandingan antara energi yang dihasilkan terhadap energi yang diberikan.

Elastisitas: kemampuan yang dimiliki oleh benda untuk kembali ke bentuk semula setelah mengalami gangguan bentuk.

Energi kinetik: energi yang dimiliki benda karena geraknya.

Energi mekanik: total energi kinetik dan energi potensial dari benda.

Energi potensial: energi yang dimiliki benda karena kedudukannya.

F

Frekuensi: jumlah ayunan/osilasi yang terjadi pada jangka waktu satu detik.

G

Gaya adhesi: gaya tarik-menarik antara partikel tidak sejenis.

Gaya gesek kinetik: gaya gesek yang timbul pada saat benda telah bergerak.

Gaya gesek statis: gaya gesek yang timbul pada saat benda masih diam.

Gaya kohesi: gaya tarik-menarik antara partikel sejenis.

Gaya konservatif: gaya yang hasil usahanya hanya memperhatikan kedudukan awal dan akhir.

Gejala kapilaritas: gejala naiknya zat cair pada pipa-pipa kapiler.

H

Heliosentris: pandangan yang menganggap bahwa Matahari adalah pusat dari peredaran benda langit.

K

Karburator: tabung pencampur bahan bakar pada kendaraan bermotor.

Kecepatan terminal: kecepatan konstan yang dimiliki oleh benda yang jatuh dalam suatu fluida yang memiliki kekentalan.

M

Manometer: alat untuk mengukur selisih tekanan zat cair.

Meniskus cekung: bentuk permukaan zat cair yang cekung ketika berada dalam suatu wadah.

Meniskus cembung: bentuk permukaan zat cair yang cembung ketika berada dalam suatu wadah.

P

Periode orbit satelit: waktu yang dibutuhkan oleh satelit untuk beredar pada orbitnya sebanyak satu kali putaran.

Proses adiabatik: proses yang terjadi pada keadaan kalor sistem tetap.

Proses isobarik: proses yang terjadi pada keadaan tekanan tetap.

Proses isokhorik: proses yang terjadi pada keadaan volume tetap.

Proses isothermal: proses yang terjadi pada keadaan suhu tetap.

R

Refrigerator: mesin pendingin.

Resultan gaya: gaya total hasil penjumlahan dari beberapa gaya.

Roller coaster: kereta mainan yang memanfaatkan prinsip kekekalan energi mekanik benda.

Rotasi: perputaran benda pada porosnya.

S

Sistem terisolasi: sistem yang tidak mengizinkan pertukaran materi dan kalor dengan lingkungannya.

Strain: regangan.

Stress: tegangan.

Sudut deviasi: sudut yang dibentuk oleh arah kecepatan awal benda dengan arah horizontal pada gerak parabola.

T

Tekanan hidrostatis: tekanan yang dialami zat cair pada kedalaman tertentu.

Titik fokus elips: titik pada jarak setengah jari-jari terpanjang pada elips.

Torsi: besaran yang menyebabkan benda tegar cenderung untuk berotasi pada porosnya.

Translasi: pergeseran.

V

Venturimeter: alat untuk mengukur kecepatan aliran gas.

Viskositas: kekentalan zat cair.

Indeks

- aphelion 45
benda tegar 117, 118, 119, 121, 124, 132, 134, 135, 137, 138
berat 31, 32, 33, 41, 42, 43, 46, 71, 73, 76, 80, 82, 83, 85, 86, 88, 92, 99, 114, 116, 118, 122, 127, 132, 133, 134, 136, 137, 142, 145, 146, 147, 148, 149, 151, 152, 153, 154, 158, 162, 163, 166, 177, 193, 202, 203, 204
daya kuda 89
derajat kebebasan 174, 175, 176, 179, 190
efisiensi 30, 194, 195, 196, 197, 201, 202, 205
elips 45, 124, 125
energi kinetik 76, 77, 80, 81, 82, 83, 85, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 100, 101, 102, 103, 104, 107, 109, 110, 111, 115, 116, 119, 129, 130, 131, 137, 138, 140, 167, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 181, 182, 204
energi potensial 71, 72, 78, 79, 80, 81, 83, 85, 86, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 100, 107, 111, 115, 175
entropi 184
frekuensi 139
gas ideal 167, 168, 169, 170, 171, 173, 174, 176, 179, 180, 181, 182, 183, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 194, 195, 200, 201, 202, 204
gaya gesek 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 38, 73, 76, 85, 127, 133
gaya kohesi 149, 150, 151
gaya konservatif 71, 82, 83, 91
gaya sentripetal 27, 35, 36, 37, 41, 46, 47
Hukum Boyle 168, 169, 180, 181, 185, 204
Hukum II Termodinamika 197
Hukum Kekekalan Energi 71, 74, 81, 83, 85, 87, 91, 100, 106, 107, 109, 130, 189
Hukum Kekekalan Energi Mekanik 71, 83, 85, 87, 91, 100, 106
Hukum Kekekalan Momentum 45, 97, 99, 100, 102, 103, 107, 106, 109, 111, 118, 123, 124, 125, 138
Hukum Kekekalan Momentum Sudut 45, 118, 123, 124, 125, 138
Hukum I Termodinamika 189, 197
impuls 95, 96, 97, 98, 99, 103, 109, 110, 111, 123, 124
integrasi 7, 11, 23, 119
jatuh bebas 12, 14, 18, 80, 83, 85, 88, 92, 93, 95, 98, 105, 111, 115
joule 72, 73, 74, 75, 80, 81, 85, 88, 92, 93, 103, 116, 129, 130, 150, 173, 174, 180, 186, 187, 190, 192, 197, 200, 201, 202, 205
kalori 71, 202, 205
kapasitas panas 193
kapilaritas 151, 163, 164, 166
kecepatan rata-rata 4, 5, 14, 23, 25, 27, 166, 177, 179
kecepatan sesaat 5, 6, 10, 14, 23, 25, 27
kecepatan terminal 154, 155, 163, 165
kelajuan rata-rata 4, 5, 88, 181
kelajuan sesaat 5, 6
kelembaman 124
kemiringan 1, 7, 10, 11, 21, 29, 32, 33, 36, 37, 38, 39, 76, 81, 88, 127, 131, 136, 139, 140, 206
kerja 71, 89, 108, 121, 135, 142, 144, 145, 163, 167, 184, 190, 193, 194, 195, 196, 198, 199, 200
koefisien restitusi 96, 109
konstanta gravitasi universal 40, 43, 47
laju aliran 156, 161, 166
lengan 117, 118, 121, 132, 133, 134, 137
massa 27, 34, 36, 39, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 85, 88, 90, 92, 94, 96, 99, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 119, 120, 122, 123, 124, 126, 128, 131, 134, 136, 137, 138, 139, 140, 142, 143, 146, 147, 148, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 158, 159, 160, 161, 162, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 200, 202, 203, 204, 205, 206
medan gravitasi 42, 43, 44, 78, 83, 85, 137
mesin Carnot 194, 195, 196, 197, 199, 201, 202, 205

momen inersia 117, 118, 119, 120, 122, 124, 125, 126, 128, 129, 131, 137, 138, 139, 140
 momentum sudut 45, 117, 118, 120, 123, 124, 125, 137, 138
 panas 74, 94, 100, 102, 103, 104, 106, 109, 115, 116, 167, 184, 188, 193, 198, 199, 202
 partikel 2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 77, 82, 96, 97, 113, 119, 121, 122, 123, 124, 132, 139, 149, 150, 151, 153, 155, 167, 168, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 204
 Pascal 142, 144, 145, 163, 164, 165, 166
 percepatan angular 26
 percepatan rata-rata 9, 10, 11, 14, 23, 25, 27
 percepatan sentripetal 39, 46, 87
 percepatan sesaat 9, 10, 11, 14, 23, 25
 perihelion 45
 periode 23, 42, 45, 46, 48, 103, 114, 138, 139
 perkalian vektor 118
 perpindahan 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 20, 23, 39, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 80, 85, 88, 91, 150, 192
 Persamaan Bernoulli 141, 157, 158, 160, 161, 164
 Persamaan Kontinuitas 155, 156, 159, 160, 161, 163, 164
 Prinsip Pascal 145
 proses adiabatik 181, 185, 186, 187, 188, 189, 191, 194, 195, 196, 199, 200, 201
 pusat berat 137
 pusat massa 120, 134, 137, 174, 175
 refrigerator 198
 regangan 80, 166
 Siklus Carnot 183, 194, 199, 205
 skalar 2, 5, 72, 76, 77, 99, 123
 tegangan permukaan 149, 150, 151, 152, 163, 164, 165, 166
 tekanan 136, 142, 143, 144, 145, 152, 153, 155, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 177, 179, 180, 181, 182, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 196, 197, 199, 200, 201, 202, 204, 205, 206
 temperatur 153, 169, 170, 171, 174, 189, 198, 202, 206
 Teori Kinetik Gas 167, 168, 181
 Termodinamika 167, 183, 184, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 197, 198, 199, 200
 torsi 40, 117, 118, 121, 123, 124, 132, 133, 137, 140
 vektor 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 23, 25, 40, 44, 72, 92, 96, 97, 109, 113, 118, 120, 123, 124, 132, 134, 172
 vektor kecepatan rata-rata 4, 5
 vektor perpindahan 2, 3, 6
 vektor posisi 2, 5, 8, 12, 14, 23, 25
 vektor satuan 2, 4, 6, 92
 watt 88, 89, 90, 94, 199, 204, 205

Daftar Pustaka

- Allonso, M. and Finn 1980. *Fundamental Physics, Vol 1 and 2*. New York: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Biryam, M 1992. *Hukum-Hukum Kekekalan dalam Mekanika*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- Bueche, Fredrick 1982. *Introduction to Physics for Scientist and Insights*. New York: Mc Grow Hill Book Company Inc.
- Dorling Kindsley 1995. *Jendela IPTEK, seri 1-4*. Jakarta: Balai Pustaka Jakarta.
- Giancoli, Douglas C. 2000. *Physics, 3rd Edition*. USA: PrenticeHall International.
- Grolier International Inc. 1995. *Oxford Ensiklopedi Pelajar*. Jakarta: PT. Widyadara.
- Haliday, D, R. Resnick, J. Waker. 2001. *Fundamental of Physics, Sixth Edition*. USA: John Willey and Sons Inc.
- Harsanto. 1980. *Motor Bakar*. Jakarta: Djambatan.
- Hermawan Edi. 2004. *Radar Atmosfer Khatulistiwa*. Surakarta: Pabelan.
- Hewwit, Paul G. 1993. *Conceptual Physics, 6th Edition*. USA: Harper Collins College Publisher.
- Hewwit, Paul G. 1998. *Conceptual Physics, 8th Edition*. USA: Addison Wesley Publishing Company Inc.
- Kamus Besar Bahasa Indonesia*, cetakan ketiga. 2005. Jakarta: PT. Balai Pustaka.
- Kamus Fisika*, cetakan kedua. 2003. Jakarta: PT. Balai Pustaka.
- Sears, F.W. et.al. 1993. *University Physics*. USA: Addison Wesley Publishing Company Inc.
- Tipler, Paul. 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik, Jilid 1* (alih bahasa: Prasetyo dan Rahmad W. Adi). Jakarta: Erlangga.
- Tipler, Paul. 2001. *Fisika untuk Sains dan Teknik, Jilid 2* (alih bahasa: Bambang Soegijono). Jakarta: Erlangga.
- Young, Hugh D. dan Freedman, Roger A. 2001. *Fisika Universitas*, edisi X. Jakarta: Erlangga.

ISBN 978-979-068-816-2 (No. Jld lengkap)
ISBN 978-979-068-818-6

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) Rp.14.468,-