

Setya Nurachmandani



# FISIKA 2

Untuk SMA/MA Kelas XI

Untuk SMA/MA Kelas XI

FISIKA 2

Setya Nurachmandani



PUSAT PERBUKUAN  
Departemen Pendidikan Nasional

SETYA NURACHMANDANI

# FISIKA 2

UNTUK SMA/MA KELAS XI



**PUSAT PERBUKUAN**  
Departemen Pendidikan Nasional





Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional  
Dilindungi Undang-Undang

**Fisika 2**  
*Untuk SMA/MA Kelas XI*  
**Setya Nurachmandani**

Editor : Budi Wahyono  
Tata letak : Desey, Rina, Taufiq, Topo  
Tata grafis : Cahyo Muryono  
Ilustrator : Haryana Humardani  
Sampul : Tim Desain

530.07

Set

f

Setya Nurachmandani

Fisika 2 : Untuk SMA/MA Kelas XI / Setya Nurachmandani ;  
Editor Budi Wahyono ; Ilustrator Haryana Humardani. — Jakarta :  
Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.  
vi, 316 hlm. : illus. : 25 cm.

Bibliografi : hlm. 298-299

Indeks

ISBN 978-979-068-166-8 (no jld lengkap)

ISBN 978-979-068-174-3

1. Fisika-Studi dan Pengajaran 2. Wahyono, Budi  
3. Humardani, Haryana 4. Judul

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan  
Nasional dari Penerbit Grahadi



Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan  
Departemen Pendidikan Nasional  
Tahun 2009

Diperbanyak oleh ....



Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2008, 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,        Februari 2009  
Kepala Pusat Perbukuan

Segala puji penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas semua karunia yang telah diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan buku pelajaran Fisika untuk SMA/MA ini sesuai rencana. Buku ini merupakan wujud partisipasi penulis dalam rangka mencerdaskan kehidupan bangsa.

Mengapa Anda harus belajar fisika? Belajar fisika bukan berarti harus menjadi seorang fisikawan atau peneliti. Apapun profesi yang Anda impikan, fisika merupakan ilmu dasar yang wajib Anda kuasai. Misalnya, Anda ingin menjadi dokter, psikolog, atau politikus. Seorang dokter harus mengetahui dasar-dasar fisika, sebab banyak peralatan medis terkini yang prinsip kerjanya berdasarkan ilmu fisika. Untuk psikolog atau politikus, ilmu fisika akan memberikan nilai lebih karena ilmu fisika bisa menyelesaikan pertanyaan-pertanyaan yang kelihatan sederhana tapi sulit. Seperti mengapa langit berwarna biru, mengapa setelah hujan kadang ada pelangi, dan mengapa terjadi gerhana bulan.

“Sesuatu yang sulit menjadi mudah”, merupakan moto penulisan buku ini. Masih banyak diantara Anda yang menganggap fisika sebagai momok. Fisika dimitoskan sebagai pelajaran penuh hantu, sulit, dan susah dipahami. Oleh karena itu, penulis bertekad untuk mengemas buku ini agar mudah untuk dipelajari dan menyenangkan. Penulis menyajikan buku dengan menggunakan bahasa yang sederhana dan komunikatif. Ini penting, agar Anda mudah mengikuti alur konsep yang harus dikuasai, tidak merasa digurui, dan tidak menjenuhkan.

“Berkembang sesuai kecerdasan masing-masing siswa”. Ini adalah moto kedua dari penulisan buku ini. Penulis berharap dengan menggunakan buku ini Anda dapat berkembang sesuai tingkat kecerdasan Anda. Karena pada kenyataannya tiap orang memiliki minat, bakat, dan kecerdasan yang berbeda. Buku ini menekankan pada proses belajar yang bermakna dan ketercapaian hasil belajar yang berupa kompetensi dasar yang harus Anda kuasai. Selain berisi informasi, buku ini juga diarahkan agar Anda mampu berpikir sistematis, metadis, kritis, dan aplikatif.

Penulis berharap buku ini dapat bermanfaat dalam pembelajaran fisika. Kritik dan saran dari guru dan siswa pemakai sangat penulis harapkan guna perbaikan buku ini pada edisi mendatang. Selamat belajar, semoga sukses.

Surakarta, Juli 2007  
Penulis

## Daftar Isi

<b>Kata Sambutan .....</b>	<b>iii</b>
<b>Kata Pengantar .....</b>	<b>iv</b>
<b>Daftar Isi .....</b>	<b>vi</b>
<b>Bab I Kinematika dengan Analisis Vektor .....</b>	<b>1</b>
A. Posisi Partikel pada Suatu Bidang .....	3
B. Kecepatan .....	5
C. Percepatan .....	11
D. Gerak Parabola .....	19
E. Gerak Melingkar .....	23
Pelatihan.....	33
<b>Bab II Gravitasi .....</b>	<b>37</b>
A. Perkembangan Teori Gravitasi .....	39
B. Hukum Gravitasi Newton .....	40
C. Kuat Medan Gravitasi .....	44
D. Aplikasi Hukum Gravitasi Newton .....	48
Pelatihan.....	56
<b>Bab III Elastisitas dan Getaran Harmonik .....</b>	<b>61</b>
A. Pengertian Elastisitas .....	63
B. Tegangan, Regangan, dan Modulus Elastisitas .....	64
C. Hukum Hooke .....	68
D. Getaran Harmonik .....	80
Pelatihan.....	95
<b>Bab IV Usaha dan Energi .....</b>	<b>99</b>
A. Usaha .....	100
B. Energi .....	109
Pelatihan.....	124
<b>Bab V Momentum dan Impuls .....</b>	<b>129</b>
A. Momentum, Impuls, dan Hubungannya .....	131
B. Hukum Kekekalan Momentum .....	136
C. Tumbukan .....	140
Pelatihan.....	147
<b>Pelatihan Ulangan Semester Gasal .....</b>	<b>151</b>

<b>Bab VI Keseimbangan Benda Tegar .....</b>	<b>159</b>
A. Keseimbangan Partikel dan Gerak Translasi .....	161
B. Gerak Rotasi .....	163
C. Gerak Menggelinding .....	169
D. Keseimbangan Benda Tegar dan Hukum Kekekalan Momentum Sudut .....	174
E. Titik Berat .....	177
F. Macam-Macam Keseimbangan .....	184
Pelatihan.....	188
<b>Bab VII Fluida .....</b>	<b>193</b>
A. Fluida Statis .....	195
B. Fluida Bergerak .....	216
Pelatihan.....	234
<b>Bab VIII Teori Kinetik Gas Ideal .....</b>	<b>237</b>
A. Hukum-Hukum yang Mendasari Persamaan Gas Ideal .....	239
B. Pengertian Gas Ideal .....	242
C. Persamaan Gas Ideal .....	243
D. Tekanan dan Ketetapan Gas Ideal.....	245
E. Suhu dan Energi Kinetik Gas Ideal .....	247
F. Kecepatan Efektif Gas Ideal .....	249
G. Derajat Kebebasan dan Teorema Ekipartisi Energi .....	251
H. Energi Dalam pada Gas Ideal .....	252
Pelatihan.....	255
<b>Bab IX Termodinamika .....</b>	<b>259</b>
A. Usaha dan Proses Termodinamika .....	261
B. Hukum Pertama Termodinamika .....	267
C. Kapasitas Kalor .....	269
D. Siklus Carnot .....	273
E. Hukum II Termodinamika .....	276
Pelatihan.....	284
<b>Pelatihan Ulangan Semester Genap .....</b>	<b>287</b>
<b>Kunci Jawaban .....</b>	<b>295</b>
<b>Daftar Pustaka .....</b>	<b>298</b>
<b>Daftar Gambar .....</b>	<b>300</b>
<b>Daftar Tabel .....</b>	<b>303</b>
<b>Glosarium .....</b>	<b>304</b>
<b>Indeks Subjek dan Pengarang .....</b>	<b>308</b>
<b>Lampiran .....</b>	<b>311</b>



# Bab

# I

## Kinematika dengan Analisis Vektor



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menganalisis gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola dengan menggunakan vektor.



Sumber: CD Clipart

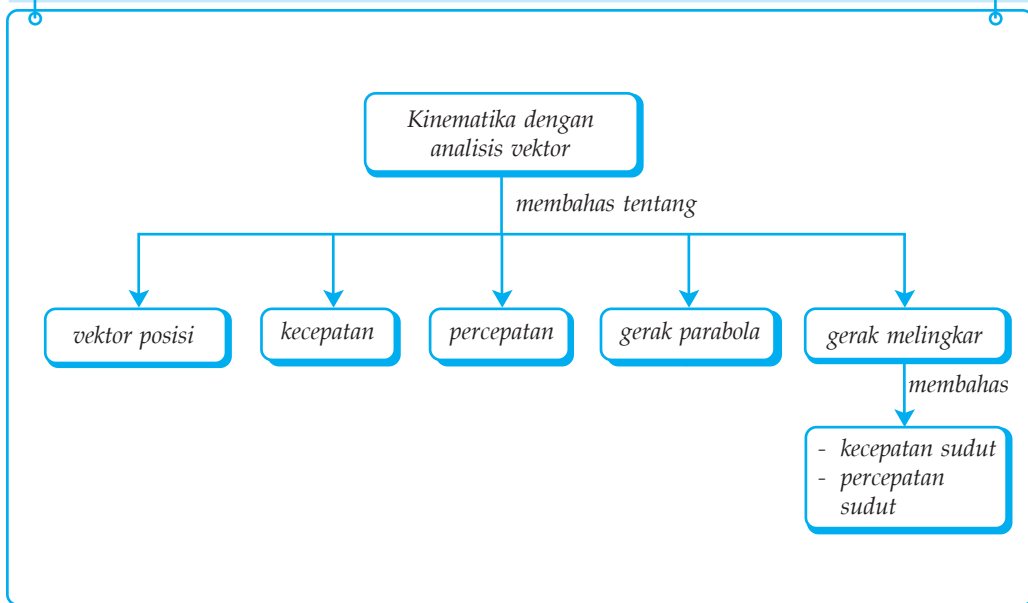
Pada kehidupan sehari-hari, biasanya sesuatu bergerak dengan berbagai macam gerak secara bersamaan. Misalnya, burung yang terbang. Menggunakan prinsip kinematika Anda dapat menentukan dan menelusuri gerak suatu benda. Anda dapat menentukan kecepatan, percepatan, jarak, dan perpindahan dari suatu benda yang bergerak.

### Kata Kunci

- |               |                 |                     |                     |
|---------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| • Vektor      | • Kecepatan     | • Vektor Posisi     | • Gerak Parabola    |
| • Jarak       | • Percepatan    | • Vektor Kecepatan  | • Kecepatan Relatif |
| • Perpindahan | • Vektor Satuan | • Vektor Percepatan | • Posisi Sudut      |



## Peta Konsep



Pada permainan sepakbola, bola ditendang dari satu pemain ke pemain lainnya dengan arah dan kecepatan tertentu, tergantung jarak dan posisi pemain yang dituju. Jika pemain yang dituju jaraknya jauh, maka butuh tendangan yang lurus, dan arah yang tepat. Arah tertentu yang dituju oleh bola yang Anda kenal dengan istilah *vektor*.

Gerak bola atau partikel yang berarah ini, jika berada pada bidang dua dimensi, maka posisi perpindahan, kecepatan, dan percepatannya dinyatakan dalam vektor dua dimensi. Vektor merupakan besaran yang memiliki besar dan arah. Dalam bidang dua dimensi, arah vektor ditentukan oleh koordinat sumbu X dan sumbu Y yang dinyatakan dengan vektor satuan  $\mathbf{i}$  (sumbu X) dan  $\mathbf{j}$  (sumbu Y). Jika vektor posisi partikel dinyatakan dengan  $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$ , dengan  $(x, y)$  menyatakan koordinat partikel pada saat  $t$ . Dengan demikian, vektor kecepatan dinyatakan  $\mathbf{v} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j}$  dan vektor percepatan partikel dinyatakan  $\mathbf{a} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j}$ .

Dalam bab ini, Anda akan mempelajari aplikasi gerak partikel pada bidang dalam keseharian, yaitu gerak parabola dan gerak rotasi. Gerak parabola merupakan resultan dari gerak lurus beraturan pada sumbu X dan gerak lurus berubah beraturan pada sumbu Y. Anda juga akan mempelajari persamaan posisi sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut dari partikel yang menempuh gerak melingkar.

## Kolom Diskusi 1.2

Diskusikan dengan teman sebangku Anda mengenai vektor satuan. Kumpulkan hasilnya di meja guru!

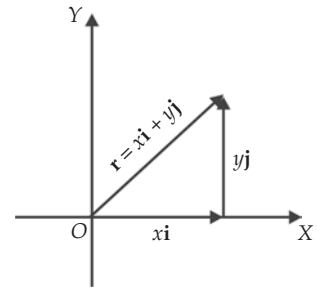
### A. Posisi Partikel pada Suatu Bidang

Sewaktu Anda berangkat sekolah, Anda makin jauh dari rumah. Artinya, Anda bergerak di atas bidang tanah menuju ke sekolah. Arah Anda menuju ke sekolah merupakan vektor. Vektor jika terdapat pada bidang dua dimensi, dinyatakan dengan  $\mathbf{i}$  dan  $\mathbf{j}$ .  $\mathbf{i}$  merupakan vektor satuan yang searah dengan sumbu X dan  $\mathbf{j}$  merupakan vektor satuan yang searah dengan sumbu Y. Karena  $\mathbf{i}$  dan  $\mathbf{j}$  merupakan vektor satuan, maka besar dari vektor ini sama dengan satu.

$\mathbf{i}$  besarnya 1 dan  $\mathbf{j}$  besarnya 1

Jika Anda diibaratkan sebagai partikel yang bergerak pada bidang dua dimensi, maka posisi Anda dapat dinyatakan sebagai  $\mathbf{r}$ . Misalkan titik asal  $O$  ditetapkan sebagai titik acuan, maka posisi sebuah partikel yang bergerak pada bidang XY pada saat  $t$  memiliki koordinat  $(x, y)$  (perhatikan Gambar 1.1) adalah sebagai berikut.

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

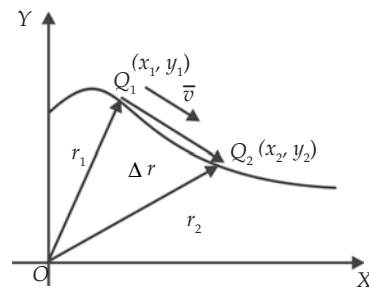


Gambar 1.1 Posisi partikel pada bidang XY.

Dalam selang waktu tertentu, partikel telah berpindah dari kedudukan awal sampai kedudukan akhir, yaitu dari rumah sampai sekolah. Perpindahan posisi partikel dinyatakan sebagai berikut.

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

Berpindahnya partikel dari kedudukan awal hingga kedudukan akhir disebut dengan perpindahan. Perhatikan Gambar 1.2! Titik  $Q_1$  merupakan titik awal dan titik  $Q_2$  merupakan titik akhir, sedangkan vektor perpindahannya adalah  $\Delta \mathbf{r}$ . Telah Anda ketahui di kelas X bahwa perpindahan dalam suatu garis lurus diberi lambang  $\Delta x$ . Secara matematis dapat dinyatakan  $\Delta x = x_2 - x_1$  dan  $\Delta y = y_2 - y_1$ .



Gambar 1.2 Perpindahan partikel dalam selang waktu  $t$ .

### Contoh 1.1

1. Sebuah titik partikel mula-mula berada di  $\mathbf{r}_1 = 10\mathbf{i} - 4\mathbf{j}$  kemudian partikel tersebut berpindah ke posisi  $\mathbf{r}_2 = 7\mathbf{i} + 3\mathbf{j}$ ,  $r$  dalam meter. Berapakah besar perpindahan partikel tersebut?

Diketahui : a.  $\mathbf{r}_1 = 10\mathbf{i} - 4\mathbf{j}$   
b.  $\mathbf{r}_2 = 7\mathbf{i} + 3\mathbf{j}$

Ditanyakan :  $\Delta r = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{r} &= (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} \\ &= (7 - 10)\mathbf{i} + (3 - (-4))\mathbf{j} \\ &= -3\mathbf{i} + 7\mathbf{j}\end{aligned}$$

Besar perpindahan:

$$\Delta r = \sqrt{(4x)^2 + (4y)^2} = \sqrt{(-3)^2 + (7)^2} = \sqrt{58} = 7,6 \text{ m}$$

2. Vektor suatu benda diberikan oleh  $\mathbf{r} = (t^3 - 2t^2)\mathbf{i} + 3t^2\mathbf{j}$ ;  $t$  dalam sekon dan  $r$  dalam meter. Tentukan besar dan arah perpindahan benda dari  $t = 25 \text{ s}$  sampai ke  $t = 35 \text{ s}$ !

Diketahui :  $\mathbf{r} = (t^3 - 2t^2)\mathbf{i} + 3t^2\mathbf{j}$   
 $t_1 = 25 \text{ s}$   
 $t_2 = 35 \text{ s}$

Ditanyakan : a.  $\Delta r = \dots?$

b.  $\theta = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned}t_1 = 2 \text{ s} &\longrightarrow \mathbf{r}_1 = (2^3 - 2 \times 2^2)\mathbf{i} + (3 \times 2^2)\mathbf{j} \\ &= 12\mathbf{j}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t_2 = 3 \text{ s} &\longrightarrow \mathbf{r}_2 = (3^3 - 2 \times 3^2)\mathbf{i} + (3 \times 3^2)\mathbf{j} \\ &= 9 + 27\mathbf{j}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{r} &= (9\mathbf{i} + 27\mathbf{j}) - 12\mathbf{j} \\ &= 9\mathbf{i} + 15\mathbf{j}\end{aligned}$$

a. Besar perpindahan:

$$\begin{aligned}\Delta r &= \sqrt{(9)^2 + (15)^2} \\ &= 3\sqrt{34} \text{ m}\end{aligned}$$

b. Arah perpindahan

$$\begin{aligned}\text{tg } \theta &= \frac{y}{x} \\ &= \frac{15}{9}\end{aligned}$$

$$= \frac{5}{3}$$

$$\theta = \arctan \frac{5}{3}$$

$$= 59^\circ$$

### Soal Kompetensi 1.1

1. Sebuah partikel mula-mula berada di  $\mathbf{r}_1 = 4\mathbf{i} - 2\mathbf{j}$ , kemudian berpindah ke  $\mathbf{r}_2 = 8 + 2\mathbf{j}$ . Tentukan besar perpindahan partikel tersebut!
2. Vektor posisi suatu benda diberikan oleh  $\mathbf{r} = 4t^2 \mathbf{i} - (6t^2 + 2t)\mathbf{j}$ ,  $t$  dalam sekon dan  $r$  dalam meter. Tentukan besar dan arah perpindahan benda dari  $t = 15$  s sampai  $t = 25$  s!

## B. Kecepatan

Kecepatan dan posisi partikel yang bergerak dapat ditentukan melalui tiga cara, yaitu diturunkan dari fungsi posisi, kecepatan sesaat sebagai turunan fungsi posisi, dan menentukan posisi dari kecepatan.

### 1. Kecepatan Rata-Rata Diturunkan dari Fungsi Posisi

Perpindahan partikel dari satu posisi ke posisi lain dalam selang waktu tertentu disebut dengan kecepatan rata-rata. Kecepatan rata-rata pada bidang dua dimensi dinyatakan sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{t_2 - t_1}$$

Bentuk komponen dari kecepatan rata-rata adalah sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{v}} = \bar{v}_x \mathbf{i} + \bar{v}_y \mathbf{j}$$

dengan  $\bar{v}_x = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$  dan  $\bar{v}_y = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$ . Karena  $\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ , maka kecepatan rata-

rata ( $\bar{\mathbf{v}}$ ) searah dengan arah perpindahan  $\Delta \mathbf{r}$ .

### Contoh 1.2

Sebuah partikel pada  $t_1 = 0$  berada pada koordinat (15, 8) m. Setelah 2 s partikel tersebut berada pada koordinat (20, 12) m. Tentukanlah komponen kecepatan rata-rata dan besar kecepatan rata-rata partikel tersebut!

Diketahui : a.  $r_1 = (15, 8)$   
b.  $t_1 = 0$   
c.  $r_2 = (20, 12)$   
d.  $t_2 = 2$  s

Ditanyakan : a.  $\overline{v_x}$  dan  $\overline{v_y} = \dots?$   
b.  $\overline{v} = \dots?$

Jawab:

$$\text{a. } \overline{v_x} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{20 - 15}{2 - 0} = 2,5 \text{ m/s}$$

$$\overline{v_y} = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{(12 - 8)}{2 - 0} = 2 \text{ m/s}$$

$$\text{b. } \overline{\mathbf{v}} = \overline{v_x} \mathbf{i} + \overline{v_y} \mathbf{j} \\ = 2,5 \mathbf{i} + 2 \mathbf{j}$$

$$\overline{v} = \sqrt{\overline{v_x}^2 + \overline{v_y}^2} \\ = \sqrt{(2,5)^2 + (2)^2} \\ = 3,20 \text{ m/s}$$

### Soal Kompetensi 1.2

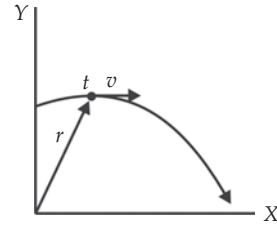
1. Koordinat sebuah partikel yang sedang bergerak pada bidang XY dinyatakan oleh  $x = (1,40 \text{ m/s}) t$  dan  $y = 19 \text{ m} - (0,8 \text{ m/s}^2)t^2$  untuk selang waktu mulai dari  $t = 0$  s sampai dengan  $t = 2$  s. Tentukan komponen-komponen kecepatan rata-rata vektor, kecepatan rata-rata, dan arahnya!
2. Sebuah partikel bergerak menurut persamaan  $x = a + bt^2$ , dengan  $a = 20 \text{ cm}$  dan  $b = 4 \text{ cm/s}^2$ . Tentukan perpindahan, kecepatan rata-rata, dan kecepatan sesaat pada selang waktu  $t_1 = 2$  s dan  $t_2 = 5$  s?

## 2. Kecepatan Sesaat

Besarnya kecepatan sesaat ditentukan dari harga limit vektor perpindahannya dibagi selang waktu, yang merupakan titik potong/singgung pada titik tersebut. Jika  $\Delta \mathbf{r}$  adalah perpindahan dalam waktu  $\Delta t$  setelah  $t$  sekon, maka kecepatan pada saat  $t$  adalah sebagai berikut.

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$$

Dalam notasi matematika (lihat pelajaran matematika kelas XI tentang diferensial), harga limit ditulis sebagai  $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ , yang disebut turunan  $\mathbf{r}$  terhadap  $t$ . Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kecepatan sesaat adalah turunan dari fungsi posisinya terhadap waktu. Secara matematis ditulis sebagai berikut.



*Gambar 1.3 Tampilan geometris pada kecepatan sesaat pada saat  $t$  sekon.*

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

Bentuk komponen dari kecepatan sesaat  $\mathbf{v}$  adalah:

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

dengan  $v_x = \frac{dx}{dt}$  dan  $v_y = \frac{dy}{dt}$ . Persamaan di atas menunjukkan bahwa jika posisi (koordinat horizontal  $x$  dan vertikal  $y$  diberikan dalam fungsi waktu  $t$ , maka Anda dapat menentukan komponen kecepatan sesaat  $v_x$  dan  $v_y$  dengan menggunakan turunan.

### Contoh 1.3

1. Lintasan sebuah benda yang bergerak dinyatakan dalam persamaan  $x = -5t^2 + 20t - 10$ . Bila  $x$  dalam meter dan  $t$  sekon, maka hitunglah besarnya kecepatan awal benda!

Diketahui :  $x = -5t^2 + 20t - 10$

Ditanyakan :  $v_0 = \dots?$



Jawab:

Ingat, aturan turunan dalam matematika.

$$u = x^n + c$$

$$\frac{du}{dx} = nx^{n-1}$$

$$x = -5t^2 + 20t - 10$$

$$v = \frac{dx}{dt} = d(-5t^2 + 20t - 10) = -10t + 20$$

$v_0$  berarti  $t = 0$ , maka

$$v = -10t + 20 = 20 \text{ m/s}$$

2. Jika koordinat gerak partikel dalam bidang adalah  $x = 3 + 2t^2$  dan  $y = 10t + 0,25 t^2$ , maka tentukan persamaan umum kecepatan partikel dan tentukan kecepatan partikel pada  $t = 2 \text{ s}$ !

Diketahui : a.  $x = 3 + 2t^2$

b.  $y = 10t + 0,25t^2$

c.  $t = 2 \text{ s}$

Ditanyakan :  $\mathbf{v}$  dan  $v = \dots$ ?

Jawab:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 0 + 4t = 4t$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = 10 + 0,5t$$

Persamaan umum kecepatan adalah

$$\begin{aligned}\mathbf{v} &= v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \\ &= 4t \mathbf{i} + (10 + 0,5t) \mathbf{j}\end{aligned}$$

Vektor kecepatan pada saat  $t = 2$  adalah

$$\begin{aligned}\mathbf{v} &= 4(2) \mathbf{i} + (10 + 0,5(2)) \mathbf{j} \\ &= 8 \mathbf{i} + 11 \mathbf{j}\end{aligned}$$

Besar kecepatannya adalah

$$\begin{aligned}v &= \sqrt{(8)^2 + (11)^2} \\ &= \sqrt{185} \\ &= 13,6 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Arah kecepatan

$$\tan \theta = \frac{11}{8}$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{11}{8} \right) = 53,7^\circ$$

### Soal Kompetensi 1.3

1. Seberkas elektron bergerak mengikuti persamaan lintasan  $x = t^3 + 4t^2 - 9$ ,  $x$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Berapa besar kecepatan awal dan kecepatan pada saat  $t = 4$  s?
2. Vektor posisi sebuah partikel diberikan  $r(t) = x(t) + y(t)$ , dengan  $x(t) = at + b$  dan  $y(t) = ct^2 + d$ , dengan  $a = 1$  m/s,  $b = 1$  m,  $c = \frac{1}{8}$  m/s<sup>2</sup>, dan  $d = 1$  m. Hitunglah turunkan persamaan umum kecepatan partikel dan tentukan kecepatan serta kelajuan partikel pada  $t = 2$  s!

### 3. Menentukan Posisi dari Kecepatan

Jika komponen-komponen kecepatan  $v_x$  dan  $v_y$  sebagai fungsi waktu diketahui, maka posisi horisontal (mendatar)  $x$  dan posisi vertikal (tegak)  $y$  dari partikel dapat ditentukan dengan cara pengintegralan.

a. Posisi  $x$

Ingat, aturan pengintegralan.

$$u = x^n$$

$$\int \frac{du}{dx} = \int \frac{1}{n+1} x^{n+1} + c$$

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

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

$$x \Big|_{x_0}^x = \int_0^t v_x dt$$

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

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

b. Posisi  $y$

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

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

$$x \Big|_{y_0}^y = \int_0^t v_y dt$$

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

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

### Kolom Diskusi 1.2

*Diskusikan dengan teman sebangku Anda!*

1. Apabila partikel bergerak pada suatu bidang, benarkah jika dikatakan bahwa besar perpindahan partikel sama dengan jarak yang ditempuhnya?
2. Apa hubungan antara diferensial dan integral dalam pelajaran matematika dengan pelajaran fisika?

*Buatlah kesimpulan berdasarkan diskusi tersebut dan kumpulkan di meja guru!*

Nilai  $(x_0, y_0)$  merupakan koordinat posisi awal partikel. Dengan demikian posisi awal dapat ditentukan dengan cara pengintegralan kecepatan dari partikel atau benda yang bergerak.

### Contoh 1.4

Sebuah partikel bergerak dalam bidang XY. Mula-mula partikel berada pada koordinat (3, 2) m dengan kecepatan dinyatakan sebagai  $v_x = 6t$  m/s dan  $v_y = 5 + 9t^2$  m/s. Tentukan vektor posisi partikel pada koordinat  $(x, y)$  dan posisi partikel pada saat  $t = 3$  s!

Diketahui : a.  $v_x = 6t$  m/s  
b.  $v_y = 5 + 9t^2$  m/s  
c.  $t = 3$  s

Ditanyakan : a.  $\mathbf{r} = \dots?$   
b. koordinat  $(x, y) = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \text{a. } x &= x_0 + \int_0^t v_x dt \\ &= 3 + \int_0^t 6t dt \\ &= (3 + 3t^2) \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y &= y_0 + \int_0^t v_y dt \\
 &= 2 + \int_0^t (5 + 9t^2) dt \\
 &= (2 + 5t + 3t^3) \text{ m} \\
 \mathbf{r} &= (3 + 3t^2) \mathbf{i} + (2 + 5t + 3t^3) \mathbf{j} \\
 \text{b. } (x, y) \quad t &= 3 \\
 x &= 3 + 3t^2 \\
 &= 3 + 3(3)^2 \\
 &= 30 \text{ m} \\
 y &= 2 + 5t + 3t^3 \\
 &= 2 + 5(3) + 3(3)^3 \\
 &= 44 \text{ m} \\
 \text{Jadi, } (x, y) &= (30, 44) \text{ m}
 \end{aligned}$$

#### Soal Kompetensi 1.4

1. Sebuah benda bergerak pada bidang  $XY$  dengan vektor kecepatan yang dinyatakan oleh  $\mathbf{v} = (\alpha - \beta t^2) \mathbf{i} + \gamma t \mathbf{j}$ , dengan  $\alpha = 2,1 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 3,6 \text{ m/s}^3$  dan  $\gamma = 5 \text{ m/s}^2$ . Jika arah  $y$  positif adalah vertikal atas dan pada saat  $t = 0$  benda tersebut berada di titik asal, maka tentukan turunan vektor posisi sebagai fungsi waktu dan posisi benda pada  $t = 2 \text{ s}$ !
2. Sebuah meriam ditembakkan mendatar di atas sebuah gedung bertingkat yang tingginya 200 m. Meriam ditembakkan dengan kelajuan 120 m/s. Tentukan posisi peluru meriam setelah 2 s!

## C. Percepatan

Jika sebuah mobil bergerak dengan kecepatan selalu bertambah dalam selang waktu tertentu, maka mobil tersebut dikatakan mengalami percepatan. Perubahan kecepatan dalam selang waktu tertentu disebut percepatan. Percepatan ini yang disebut dengan percepatan rata-rata yang dapat ditulis sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{t_2 - t_1}$$

dengan kecepatan  $v_2$  adalah kecepatan pada saat  $t = t_2$  dan  $v_1$  adalah kecepatan pada  $t = t_1$ .

Bentuk komponen percepatan rata-rata  $\bar{a}$  pada bidang dua dimensi adalah sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{a}} = \bar{a}_x \mathbf{i} + \bar{a}_y \mathbf{j}$$

dengan  $\bar{a}_x = \frac{v_{x2} - v_{x1}}{t_2 - t_1}$  dan  $\bar{a}_y = \frac{v_{y2} - v_{y1}}{t_2 - t_1}$ . Dikatakan percepatan rata-rata,

karena tidak memedulikan perubahan percepatan pada saat tertentu. Misalnya, saat mobil melintasi tikungan atau tanjakan.

### Contoh 1.5

Seekor lebah diketahui bergerak dengan koordinat kecepatan  $v_x = 4t$  dan  $v_y = 2t + 6$ , dengan  $v_x, v_y$  dalam m/s, dan  $t$  dalam sekon. Tentukan kecepatan rata-rata lebah tersebut antara  $t = 0$  dan  $t = 2$  s!

Diketahui : a.  $v_x = 4t$   
 b.  $v_y = 2t + 6$   
 c.  $t_1 = 0$   
 d.  $t_2 = 2$  s

Ditanyakan :  $\bar{a} = \dots?$

Jawab:

$$t = 0 \Rightarrow v_{x1} = 4(0) = 0$$

$$v_{y1} = 2(0) + 6 = 6 \text{ m/s}$$

$$t = 2 \Rightarrow v_{x2} = 4(2) = 8 \text{ m/s}$$

$$v_{y2} = 2(2) + 6 = 10 \text{ m/s}$$

$$\bar{a}_x = \frac{v_{x2} - v_{x1}}{t_2 - t_1}$$

$$= \frac{8 - 0}{2 - 0} = 4 \text{ m/s}$$

$$\bar{a}_y = \frac{v_{y2} - v_{y1}}{t_2 - t_1}$$

$$= \frac{10 - 6}{2 - 0} = 2 \text{ m/s}$$

$$\bar{\mathbf{a}} = 4 \text{ m/s } \mathbf{i} + 2 \text{ m/s } \mathbf{j}$$

$$\bar{a} = \sqrt{(4)^2 + (2)^2}$$

$$= \sqrt{8 + 4}$$

$$= 2\sqrt{3} \text{ m/s}$$

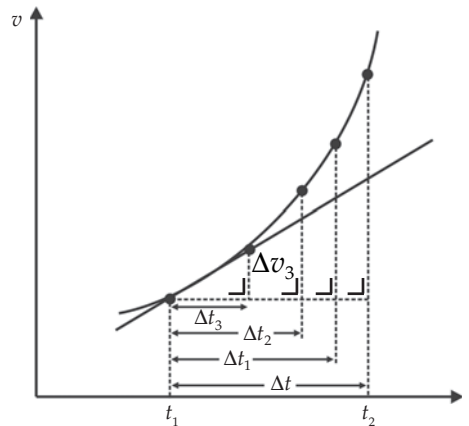
### Soal Kompetensi 1.5

1. Sebuah benda bergerak dengan koordinat kecepatan  $v_x = 8t$  dan  $v_y = 10 + 4t$ , dengan  $v_x, v_y$  dalam m/s dan  $t$  dalam sekon. Tentukan kecepatan rata-rata benda tersebut antara  $t = 0$  dan  $t = 2$  s!
2. Apa yang Anda ketahui mengenai kecepatan rata-rata?

Percepatan suatu benda yang bergerak dalam waktu tertentu disebut dengan percepatan sesaat. Secara matematis dapat yang dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Jika digambar dalam bidang  $XY$ , maka kecepatan sesaat merupakan kemiringan garis singgung dari grafik  $v-t$  pada saat  $t = t_1$ . Perhatikan Gambar 1.4 berikut!



Gambar 1.4 Tampilan geometris pada saat  $t = t_1$  sama dengan kemiringan garis singgung pada  $\frac{\Delta v_3}{\Delta t_3}$ .

Untuk menentukan percepatan sesaat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain, sebagai berikut.

## 1. Percepatan Sesaat Dapat Diturunkan dari Fungsi Kecepatan dan Posisi

Percepatan sesaat merupakan percepatan pada waktu tertentu ( $t = t_1$ ). Pada pelajaran matematika nilai limit dari percepatan sesaat adalah sebagai berikut.

$$a = \frac{dv}{dt} \text{ atau } a = \frac{d^2r}{dt^2}$$



Persamaan di atas disebut turunan  $v$  terhadap  $t$ . Artinya, percepatan sesaat merupakan turunan pertama dari fungsi kecepatan  $v$  terhadap waktu atau turunan kedua dari fungsi posisi terhadap  $t$ . Bentuk vektor komponen dari percepatan sesaat  $\mathbf{a}$  adalah sebagai berikut.

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$$

dengan  $a_x = \frac{dv_x}{dt}$  dan  $a_y = \frac{dv_y}{dt}$ . Karena  $v_x = \frac{dx}{dt}$  dan  $v_y = \frac{dy}{dt}$ , maka persamaanya menjadi seperti berikut.

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} \text{ dan } a_y = \frac{d^2y}{dt^2}$$

Persamaan di atas merupakan percepatan sesaat yang diperoleh dari turunan kedua dari posisi partikel atau benda yang bergerak.

### Contoh 1.6

1. Diketahui seberkas partikel bergerak menurut persamaan lintasan  $x = 4t^3 - 3t^2$  dan  $y = 2t^2 + 5t$ . Jika  $x, y$  dalam meter, dan  $t$  dalam sekon, maka tentukan kecepatan dan percepatan partikel pada saat  $t = 3$  s!

Diketahui : a.  $x = 4t^3 - 3t^2$   
b.  $y = 2t^2 + 5t$

Ditanyakan : a.  $v(t = 3) = \dots?$   
b.  $a(t = 3) = \dots?$

Jawab:

$$\text{a. } v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{d(4t^3 - 3t^2)}{dt} = 12t^2 - 6t = 90 \text{ m/s}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{d(2t^2 + 5t)}{dt} = 4t + 5 = 17 \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(90)^2 + (17)^2} = 91,59 \text{ m/s}$$

$$\text{b. } a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d(12t^2 - 6t)}{dt} = 24t - 6 = 66 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d(4t + 5)}{dt} = 4 \text{ m/s}^2$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(66)^2 + (4)^2} = 66,12 \text{ m/s}^2$$

2. Sebuah kereta express bergerak sepanjang suatu rel yang dinyatakan dalam  $x(t) = 5t + 8t^2 + 4t^3 - 0,25t^4$ , dengan  $t$  dalam sekon dan  $x$  dalam meter. Tentukan persamaan percepatan kereta, percepatan awal kereta, dan percepatan kereta pada saat  $t = 2$  s!  
Diketahui : a.  $x(t) = 5t + 8t^2 + 4t^3 - 0,25t^4$

b.  $t = 2$  s

Ditanyakan : a.  $a(t) = \dots?$

b.  $a(t=0) = \dots?$

c.  $a(t=2) = \dots?$

Jawab :

a.  $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$

$$v = \frac{dx}{dt} = 5 + 16t + 12t^2 - t^3$$

$$a = \frac{dv}{dt} = 16 + 24t - 3t^2$$

$$a(t) = 16 + 24t - 3t^2$$

b.  $a(t=0) = 16 + 0 - 0 = 16 \text{ m/s}^2$

c.  $a(t=2) = 16 + 24(2) - 3(2)^2 = 52 \text{ m/s}^2$

### Soal Kompetensi 1.6

1. Diketahui sebuah partikel bergerak menurut persamaan  $x = 2t^2 - 3t^2$  dan  $y = t^2 - 5t$ , dengan  $x, y$  dalam meter, dan  $t$  dalam sekon. Tentukan kecepatan dan percepatan partikel pada saat  $t = 3$  s!
2. Posisi yang ditempuh semut dinyatakan persamaan  $x = t^3 - 3t^2 + 2t$ , dengan  $t$  dalam sekon dan  $x$  dalam sentimeter. Tentukan persamaan percepatan semut, percepatan awal semut, dan percepatan semut pada saat  $t = 3$  sekon!

## 2. Menentukan Posisi dan Kecepatan dari Fungsi Percepatan

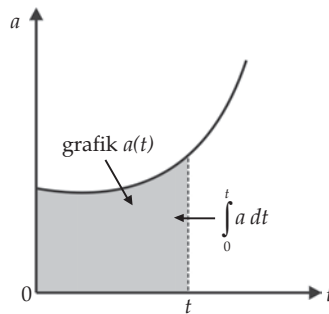
Ketika Anda ingin menentukan posisi dan kecepatan berdasarkan fungsi percepatan, maka Anda harus mengintegrasikan fungsi percepatan. Hal ini merupakan kebalikan saat Anda ingin menentukan percepatan dari fungsi posisi dan kecepatan dengan menurunkannya terhadap  $t$ . Dalam bidang dua dimensi, percepatan dinyatakan sebagai berikut.

$$a = \frac{dv}{dt} \text{ atau } dv = a dt$$

Jika kedua ruas dari persamaan di atas diintegrasikan, maka diperoleh persamaan seperti berikut.

$$v = v_0 + \int a dt$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa perubahan kecepatan dalam selang waktu tertentu sama dengan luas daerah di bawah grafik  $a(t)$  dengan batas bawah  $t = 0$  dan batas atas  $t = t$ . Perhatikan Gambar 1.5!



**Gambar 1.5** Luas daerah di bawah grafik  $a(t)$  sama dengan nilai  $\int a dt$ .

Karena  $v = \frac{dx}{dt}$ , maka persamaan  $v = v_0 + \int a dt$  dapat ditulis sebagai berikut.

$$v = \frac{dx}{dt} = v_0 + at$$

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t dt (v_0 + at)$$

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$x = x_0 - v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Dengan cara yang sama, untuk koordinat  $y$  diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$y = y_0 - v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Persamaan  $x = x_0 - v_0 t + \frac{1}{2} at^2$  dan  $y = y_0 - v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ , merupakan posisi partikel yang telah bergerak dalam selang waktu tertentu dan diperoleh dari integrasi kedua fungsi percepatan.

### Contoh 1.7

1. Sebuah partikel bergerak dengan percepatan menurut persamaan  $a = 3t^2 - 5$ . Tentukan kecepatan partikel dan posisinya pada saat  $t = 3$  s!

Diketahui : a.  $a = 3t^2 - 5$

b.  $t = 3$  s

Ditanyakan: a.  $v_t = \dots?$

b.  $x = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } v &= \int_t^e a \times dt = \int_0^3 a \times dt \\ &= \int_0^3 (3t^2 - 5) dt = t^3 - 5t \Big|_0^3 \\ &= (3)^2 - 5(3) = 12 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\text{b. } v = \frac{dx}{dt}$$

$$\int_0^x dx = \int dt (t^3 - 5t)$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{4} t^4 - \frac{5}{2} t^2 \\ &= \frac{1}{4} (3)^4 - \left( \frac{5}{2} \right)^2 \\ &= \frac{1}{4} 81 - \frac{45}{2} \\ &= 20,25 - 20,5 = (-2,25) \end{aligned}$$

2. Percepatan sebuah partikel pada saat  $t$  adalah  $4t \mathbf{i} - 6 \mathbf{j}$ . Mula-mula partikel sedang bergerak dengan kecepatan  $2\mathbf{j}$ . Tentukan vektor kecepatannya dan besar kecepatan pada saat  $t = 2$  sekon!

Diketahui : a.  $\mathbf{a}(t) = 4t \mathbf{i} - 6 \mathbf{j}$

b.  $\mathbf{v}_0 = 2 \mathbf{j}$

Ditanyakan: a.  $\overline{\mathbf{v}} = \dots? (t = 2 \text{ s})$

b.  $v = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } \mathbf{v} &= \mathbf{v}_0 + \int_0^t \mathbf{a} dt \\ &= 2\mathbf{i} + \int (4t \mathbf{i} - 6 \mathbf{j}) \\ &= 2\mathbf{i} + 2t^2 \mathbf{i} - 6t \mathbf{j} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{v}}(2) &= 2\mathbf{i} + 2(2)^2 \mathbf{i} - 6(2) \mathbf{j} \\ &= (10 \mathbf{i} - 12 \mathbf{j}) \text{ m/s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{b. } v &= \sqrt{(10)^2 + (-12)^2} \text{ --} \\ &= 2\sqrt{61} \text{ m/s}\end{aligned}$$

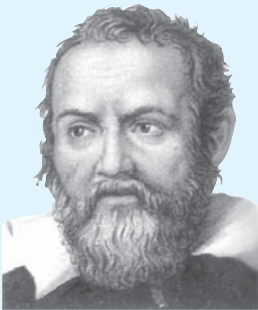
### Soal Kompetensi 1.7

Percepatan sebuah partikel pada saat  $t$  adalah  $\mathbf{a}(t) = (4 - 12t) \mathbf{i} - 36t^2 \mathbf{j}$ , dengan  $t$  dalam sekon dan  $a$  dalam  $\text{m/s}^2$ . Pada saat  $t = 1$  partikel berada di titik  $-3\mathbf{i} - 5\mathbf{j}$  dan sedang bergerak dengan kecepatan  $2\mathbf{i} + 2\mathbf{j}$ . Hitunglah kecepatan dan posisi awal partikel, serta vektor kecepatan dan vektor posisi partikel pada saat  $t = 2$  sekon!

### T o k o h

#### Galileo Galilei

(1564 – 1642)



Sumber: Jendela Iptek, Cahaya

Galileo Galilei adalah seorang ahli matematika, astronom, dan ahli fisika dari Italia. Ia dilahirkan pada tanggal 15 Februari 1564 di Pisa, Italia. Ayahnya seorang ahli musik dan matematika yang miskin, sehingga ia berharap Galileo kelak menjadi seorang dokter karena gajinya yang lebih tinggi.

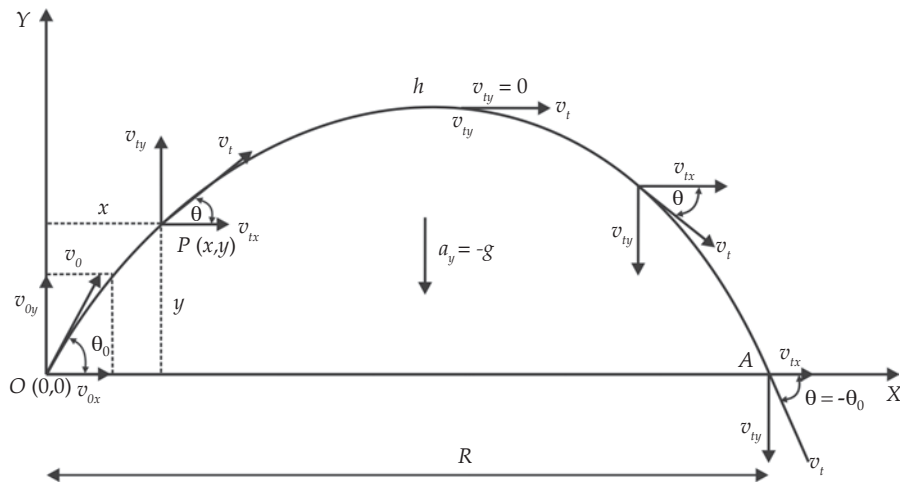
Setelah berumur 17 tahun, Galileo disuruh ayahnya masuk Universitas Pisa jurusan kedokteran. Selama belajar di kedokteran ini, Galileo membuat penemuan besarnya yang pertama, yaitu “prinsip pendulum” yang menyatakan bahwa waktu untuk satu ayunan total adalah sama walaupun lengkungannya kecil atau besar. Karena tidak mendapatkan beasiswa, ia keluar dari kedokteran kemudian masuk kembali ke jurusan lain pada universitas yang sama dan menjadikan Galileo sebagai profesor matematika. Pada waktu menjadi profesor di University of Padua, ia berhasil membuat penemuan lagi yaitu “hukum inersia/kelembaman”. Hukum ini menyatakan bahwa sebuah objek akan berubah kecepatan atau arahnya jika didorong oleh gaya dari luar.

Selain penemuan-penemuan tersebut, Galileo juga berhasil membuat teleskop yang dapat membuat benda menjadi 32 kali lebih besar. Dengan teleskop ini, ia mendukung pendapat Copernicus bahwa sistem planet berpusat pada matahari. Dukungannya ini membuat ia ditangkap oleh para tokoh agama, diadili, dan dikenakan tahanan rumah sampai ia meninggal. Galileo meninggal pada tahun 1642 di Arcetri. Sampai sekarang, Galileo terkenal dengan pendiriannya yang kuat demi menegakkan kebenaran, meski kebebasan dan nyawa taruhannya.

Dikutip seperlunya dari *100 Ilmuwan*, John Hudson Tiner, 2005)

## D. Gerak Parabola

Dikelas X Anda telah mempelajari gerak pada lintasan garis lurus. Pada sub bab ini Anda akan mempelajari suatu benda yang melakukan dua gerak lurus dengan arah yang berbeda secara serentak. Misalnya gerak yang dialami bola yang dilempar dan gerak peluru yang ditembakkan. Gerak inilah yang Anda kenal sebagai gerak parabola. Perhatikan Gambar 1.6 berikut!



**Gambar 1.6** Lintasan peluru yang ditembakkan dengan kecepatan awal  $v_0$ , sudut elevasi  $\theta$ , jarak jangkauan  $R$ , dan ketinggian  $h$ .

Berdasarkan Gambar 1.6, sumbu X dan Y sebagai titik acuan peluru yang mau ditembakkan. Jika kecepatan awal peluru adalah  $v_0$  dengan sudut elevasi  $\theta_0$ , maka kecepatan awal peluru diuraikan dalam komponen vertikal dan horizontal yang besarnya adalah sebagai berikut.



$$v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$$

dengan percepatan horizontal  $a_x$  adalah nol. Artinya, komponen kecepatan horizontal  $v_x$  pada gerak itu konstan dalam selang waktu  $t$ . Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$$

Pada waktu  $t$ , kecepatan vertikal  $v_y$ , maka percepatan vertikalnya  $a_y = -g$ . Sehingga diperoleh persamaan:

$$v_y = v_{0y} - gt = v_0 \sin \theta - gt$$

Jarak horizontal yang ditempuh peluru pada waktu  $t$ , dengan kecepatan konstan dipenuhi oleh persamaan:

$$x = v_0 \cos \theta_0 t$$

Ketinggian peluru pada waktu  $t$  dipenuhi oleh persamaan:

$$y = (v_0 \sin \theta_0 t - \frac{1}{2}gt^2)$$

Berdasarkan persamaan  $x = v_0 \cos \theta_0 t$  kita peroleh persamaan  $t = \frac{x}{v_0 \cos \theta_0}$ .

Jika Anda masukkan ke persamaan  $y = (v_0 \sin \theta_0 t - \frac{1}{2}gt^2)$ , maka diperoleh persamaan berikut.

$$y = \frac{v_0 \sin \theta_0}{v_0 \cos \theta_0} x - \frac{g}{2v_0 \cos \theta_0} x^2$$

Karena nilai  $v_0 \sin \theta_0$ ,  $\cos \theta_0$ , dan  $g$  konstan, maka persamaan di atas menjadi:

$$y = ax - bx^2$$

Persamaan  $y = ax - bx^2$  inilah yang Anda kenal dengan persamaan parabola. Pada waktu peluru mencapai ketinggian maksimum ( $h$ ), maka  $v_y = 0$ . Secara matematis ketinggian peluru dapat ditentukan melalui persamaan berikut.

$$h = \frac{v_0 \sin^2 \theta_0}{2g}$$

Jangkauan terjauh yang dapat ditempuh peluru, tergantung pada sudut elevasi peluru. Nilai jangkauan terjauh  $R$  adalah sebagai berikut.

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_0}{g}$$

### Contoh 1.8

1. Sebutir peluru ditembakkan dengan kecepatan  $100 \text{ ms}^{-1}$  dan sudut elevasi  $37^\circ$  ( $\sin 37^\circ = 0,6$ ). Jika percepatan gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukanlah:
  - a. waktu yang diperlukan peluru untuk mencapai titik tertinggi dan kecepatannya,
  - b. kedudukan titik tertinggi,
  - c. lama peluru di udara, dan
  - d. jarak terjauh yang dicapai peluru!

Diketahui : a.  $v_{0x} = v_0 \cos \theta_0 = 100 \cos 37^\circ = 80 \text{ m/s}$

b.  $v_{0y} = v_0 \sin \theta_0 = 100 \sin 37^\circ = 60 \text{ m/s}$

Ditanyakan : a.  $t_h = \dots ?$

b.  $(x_h, y_h) = \dots ?$

c.  $t_R = \dots ?$

d.  $R = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \text{a. } t_h &= \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \\ &= \frac{60}{10} = 6 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } (x_h, y_h) \\ x_h &= v_0 \cos \theta_0 t \\ &= (80) (6) \\ &= 480 \text{ m} \\ y_h &= v_0 \sin \theta_0 t \\ &= \frac{1}{2} 10 (6)^2 = 180 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi,  $(x_h, y_h) = (480 \text{ m}, 180 \text{ m})$

$$\begin{aligned} \text{c. } t_R &= 2 t_h \\ &= 2 \times 6 = 12 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{d. } R &= 2 \times x_h \\ &= 2 \times 480 \text{ m} = 960 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Sebuah peluru meriam ditembakkan dengan kelajuan 60 m/s. Pada sudut berapakah meriam tersebut harus diarahkan agar peluru mencapai tanah pada jarak 180 m? ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

Diketahui : a.  $v_0 = 60 \text{ m/s}$

b.  $R = 180 \text{ m}$

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

Ditanyakan :  $\theta_0 = \dots ?$

Jawab:

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_0}{g}$$

$$\begin{aligned} \sin 2\theta_0 &= \frac{Rg}{v_0^2} \\ &= \frac{180 \times 10}{(60)^2} \\ &= \frac{1.800}{3.600} \end{aligned}$$

$$\sin 2\theta_0 = \frac{1}{2}$$

$$2\theta_0 = 30^\circ$$

$$\theta_0 = 15^\circ$$

$$\text{atau } \theta_0 = 90^\circ - 15^\circ = 75^\circ$$

### Soal Kompetensi 1.8

1. Sebuah tim SAR ingin memberikan bantuan makanan ke daerah korban bencana gempa tektonik 5,9 SR di Jogjakarta dengan cara menjatuhkan bahan makanan dari ketinggian 200 m. Diketahui pesawat tim SAR tersebut terbang secara horizontal dengan kecepatan 250 km/jam.
  - a. Hitunglah jarak makanan harus mulai dijatuhkan agar tepat di tempat yang dituju!
  - b. Apabila pesawat tim SAR ingin menjatuhkan bahan makanan pada jarak 400 m dari tempat yang dituju, maka tentukan kecepatan vertikal yang harus diberikan kepada bahan makanan!
  - c. Hitunglah kecepatan pesawat tim SAR terbang pada kasus b!

2. Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan 98 m/s pada sudut elevasi  $30^\circ$ . Hitunglah besar dan arah kecepatan peluru setelah 2 sekon, serta lama peluru berada di udara!
3. Sebuah bola sepak ditendang sehingga menempuh lintasan parabola dan membentuk sudut  $45^\circ$  terhadap horizontal. Bola tersebut menyentuh tanah pada tempat yang jaraknya 40 m dari tempat semula. Jika percepatan gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan kelajuan awal bola, lama bola berada di udara, dan koordinat titik tertinggi!



### Kegiatan

Carilah beberapa jenis hewan yang mempunyai kebiasaan melompat. Misalnya katak, belalang, dan jangkrik. Perhatikan hewan-hewan tersebut saat melompat. Ukur jarak lompatan dan sudut elevasi lompatan binatang tersebut, kemudian hitunglah kecepatan awalnya. Jika hewan-hewan tersebut melompat dengan sudut yang berbeda, carilah alasannya. Buatlah kesimpulan dari kegiatan ini dan kumpulkan di meja guru

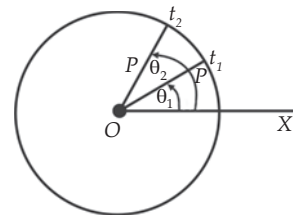
## E. Gerak Melingkar

Gerak benda yang Anda amati dalam kehidupan sehari-hari pada umumnya gabungan antara gerak translasi dan gerak melingkar. Misalnya roda yang berputar dan kipas angin yang berputar. Benda yang bergerak pada sumbu utama tanpa mengalami gerak translasi dikatakan benda mengalami gerak rotasi/melingkar. Gerak rotasi merupakan analogi gerak translasi.

### 1. Kecepatan Sudut

Perhatikan Gambar 1.7! Garis  $OP$  menyatakan jari-jari pada suatu benda bergerak yang membentuk sudut  $\theta_1$  dengan acuan garis  $OX$  pada saat  $t$ . Pada saat  $t = t_1$  sudut menjadi  $\theta_2$ . Kecepatan sudut rata-rata benda  $\bar{\omega}$  dalam selang waktu  $t_2 - t_1$  atau  $\Delta t$ . Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\bar{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$$



Gambar 1.7 Kecepatan sudut.

Kecepatan sudut pada selang waktu yang mendekati nol (kecil) disebut kecepatan sesaat. Secara matematis kecepatan sesaat ditulis sebagai berikut.

$$\bar{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

Dalam notasi matematika persamaan diatas dapat ditulis  $\bar{\omega} = \frac{d\theta}{dt}$ .

Kecepatan sesaat merupakan turunan pertama dari fungsi sudut  $\theta$  terhadap waktu  $t$ . Jika sudut  $\theta$  dalam radian, maka kecepatan sesaat dalam radian per sekon.

### Contoh 1.9

Posisi sudut suatu titik pada roda dapat dinyatakan dengan persamaan  $\theta = (5 + 10t + 2t^2)$  rad, dengan  $t$  dalam s. Tentukan:

- Posisi sudut pada  $t = 0$  dan  $t = 3$  s!
- Kecepatan sudut dari  $t = 0$  sampai  $t = 3$  s!
- Kecepatan sudut pada  $t = 0$  dan  $3$  s!

Diketahui : a.  $\theta = (5 + 10t + 2t^2)$  rad

b.  $\Delta t = 3 - 0 = 3$  s

Ditanyakan: a.  $\theta = \dots ?$

b.  $\omega = \dots ?$  ( $t = 0$  sampai  $t = 3$  s)

c.  $\bar{\omega} = \dots ?$  ( $t = 0$  dan  $t = 3$  s)

Jawab:

a.  $\theta = 5 + 10t + 2t^2$

$t \rightarrow 0$ , maka  $\theta = 5$  rad

$t \rightarrow 3$ , maka  $\theta = 53$  rad

b.  $\omega = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$

$= \frac{53 - 5}{3 - 0}$

$= 16$  rad/s

c.  $\bar{\omega} = \frac{d\theta}{dt} = (10 + 4t)$  rad/s

$t \rightarrow 0$ , maka  $\bar{\omega} = 10$  rad/s

$t \rightarrow 3$ , maka  $\bar{\omega} = 22$  rad/s

### a. Menentukan Posisi Sudut dari Fungsi Kecepatan Sudut

Pada gerak lurus, posisi benda dapat diketahui dengan cara mengintegrasikan fungsi kecepatan sesaatnya ( $v_x(t)$ ). Untuk gerak rotasi, posisi sudut juga dapat diketahui dengan cara mengintegrasikan kecepatan sudut sesaat ( $\omega(t)$ ) pada gerak melingkar. Sehingga diperoleh rumus sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \frac{d\theta}{dt} \text{ atau } \int_{\theta_0}^{\theta} \omega(t) = \omega(t) dt \\ \theta - \theta_0 &= \int_0^t \omega(t) dt \\ \theta &= \theta_0 + \int_0^t \omega(t) dt\end{aligned}$$

dengan  $\theta_0$  adalah posisi sudut awal ( $\theta_0$  pada  $t = 0$ ).

#### Contoh 1.10

Sebuah bola berputar terhadap poros horizontal tetap yang berarah timur barat. Komponen kecepatan sudut diberikan oleh persamaan  $\omega(t) = (5,8t - 2,2t)$  rad/s. Jika  $\theta_0$  ditetapkan sama dengan nol, maka tuliskan persamaan posisi sudut  $\theta_0(t)$  dan hitunglah posisi sudut pada  $t = 2$  s!

Diketahui : a.  $\omega(t) = 5,8$  rad/s

b.  $\theta_0 = 0$

c.  $t = 2$  s

Ditanyakan :  $\theta = \dots$  ?

Jawab:

$$\begin{aligned}\text{a. } \theta &= \theta_0 + \int_0^t \omega(t) dt \\ &= 0 + \int_0^t ((5,8 - 2,2)t) dt \\ \theta &= (5,8 \text{ rad/s})t - (1,1 \text{ rad/s}) t^2 \\ \text{b. } \theta &= 5,8(2) - (1,1)(2)^2 \\ &= 7,2 \text{ rad}\end{aligned}$$



## 2. Percepatan Sudut

Ketika kecepatan sudut berubah pada waktu roda bergerak, dikatakan roda mengalami percepatan. Jika  $\omega_1$  dan  $\omega_2$  masing-masing kecepatan sudut pada saat  $t_1$  dan  $t_2$ , maka rata-rata percepatan sudutnya ( $\bar{\alpha}$ ) adalah.

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

Percepatan sudut merupakan harga limit perbandingan antara perubahan kecepatan sudutnya dengan perubahan selang waktu untuk  $\Delta t$  mendekati nol ( $\Delta t \rightarrow 0$ ).

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$$

$$\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$$

Persamaan di atas menunjukkan percepatan sudut  $\alpha$  adalah turunan pertama dari fungsi kecepatan sudut terhadap waktu atau turunan kedua dari fungsi posisi sudut terhadap waktu. Demikian juga sebaliknya, kecepatan sudut dan posisi sudut benda dapat ditentukan dengan cara mengintegrasikan fungsi percepatan sudut  $\alpha(t)$ .

$$\alpha(t) = \frac{d\omega}{dt}$$

$$\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = \int_0^t \alpha(t) dt$$

$$\omega = \omega_0 + \int_0^t \alpha(t) dt$$

dengan  $\omega_0$  adalah kecepatan sudut awal ( $\omega$  pada saat  $t = 0$ ). Posisi sudut benda dapat ditentukan dengan cara mengintegrasikan persamaan

$$\omega = \omega_0 + \int_0^t \alpha(t) dt.$$

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t (\omega_0 + \omega) dt$$

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \int_0^t \alpha t dt$$

dengan  $\theta_0$ , posisi sudut pada saat  $t = 0$ .

**Contoh 1.11**

1. Sebuah cakram dilempar sehingga berputar menurut persamaan  $\theta(t) = 5 \text{ rad} - (3 \text{ rad/s})t + (2 \text{ rad/s}^3)t^3$ . Tentukan kecepatan sudut sebagai fungsi waktu, percepatan sudut sebagai fungsi waktu, dan percepatan sudut pada saat  $t = 4 \text{ s}$ !

Diketahui : a.  $\theta(t) = 5 \text{ rad} - (3 \text{ rad/s})t + (2 \text{ rad/s}^3)t^3$   
 b.  $t = 4 \text{ s}$

Ditanyakan : a.  $\omega(t) = \dots ?$   
 b.  $\alpha(t) = \dots ?$   
 c.  $\alpha(4) = \dots ?$

Jawab:

$$\text{a. } \omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(5 \text{ rad} - (3 \text{ rad/s})t + (2 \text{ rad/s}^3)t^3)}{dt}$$

$$\omega(t) = -3 \text{ rad/s} + 6t^2 \text{ rad/s}$$

$$\text{b. } \alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

$$= \frac{d(-3 \text{ rad/s} + 6 \text{ rad/s}^3 t^2)}{dt}$$

$$\alpha(t) = 12 \text{ rad/s}^3 t$$

- c. Percepatan sudut pada  $t = 4 \text{ s}$  adalah

$$\begin{aligned} \alpha(4) &= 12 \text{ rad/s}^3 (4) \\ &= 48 \text{ rad/s}^2 \end{aligned}$$

2. Sebuah piring berputar terhadap sumbunya yang percepatan sudut  $\alpha = 2 \text{ rad/s}^3 t^2 + 0,5 \text{ rad/s}^2$ . Tentukan kecepatan sudut piring pada saat  $t = 2 \text{ s}$  bila diketahui laju sudut awal  $2 \text{ rad/s}$  dan posisi sudut sebagai fungsi waktu bila  $\theta_0 = 0$ !

Diketahui : a.  $\alpha = 2 \text{ rad/s}^3 t^2 + 0,5 \text{ rad/s}^2$   
 b.  $\omega_0 = 2 \text{ rad/s}$

Ditanyakan : a.  $\omega(t) = \dots ?$   
 b.  $\theta(t) = \dots ?$

Jawab:

$$\text{a. } \omega(t) = \omega_0 \int_0^t \alpha(t) dt$$

$$= 2 + 0,5 + \frac{2}{3}t^3$$

$$\begin{aligned}
 \text{b. } \theta(t) &= \theta_0 + \int_0^t \omega(t) dt \\
 &= \theta_0 + \frac{1}{4} \text{ rad/s}^3 t^4 \\
 \theta(t) &= \theta + \frac{1}{2} \text{ rad/s} t + \frac{1}{4} \text{ rad/s}^2 t^2 + \frac{2}{12} \text{ rad/s}^1 t^4
 \end{aligned}$$

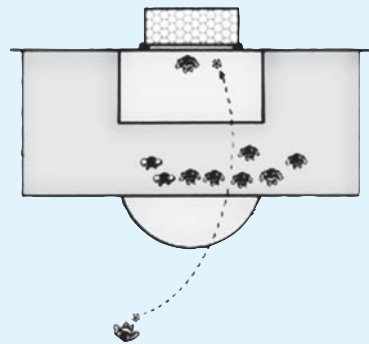
### Soal Kompetensi 1.9

1. Kincir angin bergerak dengan kecepatan  $\omega t = 12 \text{ rad} - 6 \text{ rad/s}^2 t$ . Jika sudut awal 2 rad, maka tentukan posisi sudut pada saat  $t = 5 \text{ s}$ !
2. Apakah perbedaan antara gerak rotasi dengan gerak transisi?
3. Kecepatan sudut roda pada saat  $t$  adalah  $\omega = (6 \text{ rad/s}^3)t^2$ . Tentukan percepatan sudut sebagai fungsi waktu, percepatan sudut awal, dan percepatan sudut pada saat  $t = 2 \text{ s}$ !
4. Sebuah roda berputar terhadap sumbu X dengan percepatan sudut  $\alpha = (1,86 \text{ rad/s}^3)t$ . Tentukan persamaan kecepatan sudutnya, jika kecepatan sudut awal  $-2,9 \text{ rad/s}$ ; kecepatan sudut pada saat  $t = 1 \text{ s}$ ; persamaan posisi sudut  $\theta(t)$ ; jika sudut awal  $4,2 \text{ rad}$ ; dan posisi sudut pada saat  $t = 1 \text{ s}$ !

### 1 Info Kita

#### Tendangan Pisang

Gooo.....lllll! Suara histeris terdengar di antara ribuan penonton yang menyaksikan masuknya sebuah bola ke gawang. Bola merupakan olahraga paling populer di dunia. Banyak orang yang tergila-gila atau jadi kaya raya karena bola. Anda tentu mengenal Maradona, David Beckham, Ronaldo, Ronaldinho, Thierry Henry, Zinedine Zidane, Hernan Crespo, atau masih banyak pemain bola profesional yang lain.



Sumber: Yohanes Surya, 2004

Tahukah Anda, pemain bola profesional menerapkan konsep-konsep fisika untuk dapat menghasilkan tendangan hebat. Tahun 1970-an Pele terkenal dengan tendangan pisangnya. Tahun 1998 gantian Roberto Carlos yang dipuja-puja karena tendangan pisangnya. Saat ini, David Beckham menjadi ikon sepakbola internasional juga gara-gara tendangan pisangnya.

Apa yang dimaksud dengan tendangan pisang? Anda tentu masih ingat gol manis David Beckham yang meloloskan Inggris ke piala dunia. Saat itu Beckham mengambil eksekusi tendangan bebas yang dilakukan sekitar 30 meter dari gawang Yunani. Di depan dia berdiri, pasukan Yunani membentuk pagar betis. Dengan tenang Beckham menendang bola, dan bola bergerak dengan kecepatan 128 km/jam, melambung sekitar 1 meter diatas kepala para pagar betis itu dan secara tiba-tiba membelok serta masuk ke gawang Yunani. Tepukan bergemuruh menyambut gol spektakuler tersebut.



Tendangan melengkung atau tendangan pisang yang dilakukan David Beckham sudah sejak lama menjadi perhatian para peneliti. Bahkan hingga kinipun peneliti dari Jepang dan Inggris terus menganalisa tendangan ini. Gustav Magnus pada tahun 1852 pernah meneliti kasus sebuah bola yang bergerak sambil berputar. Anggap suatu bola bergerak sambil berputar (spin). Gerakan bola menyebabkan adanya aliran udara disekitar bola. Anggap sumbu putaran bola tegak lurus dengan arah aliran bola. Akibat adanya rotasi bola, aliran udara pada sisi bola yang bergerak searah dengan arah aliran udara (A) relatif lebih cepat dibandingkan aliran udara yang bergerak berlawanan arah dengan aliran udara (B). Menurut Bernoulli, makin cepat udara mengalir makin kecil tekanannya. Akibatnya tekanan di B lebih besar dibandingkan tekanan di A. Perbedaan tekanan ini menimbulkan gaya yang menekan bola untuk membelok ke arah BA. Membeloknya bola akibat adanya perbedaan tekanan ini sering disebut *efek Magnus* untuk menghormati Gustav Magnus.

Efek Magnus maksimum jika sumbu putar bola tegak lurus dengan arah aliran udara. Efek ini mengecil ketika arah sumbu putar makin mendekati arah aliran udara dan menjadi nol ketika arah sumbu putar sejajar dengan arah aliran udara. Jika Anda perhatikan lebih jauh, yang membuat tendangan Beckham lebih spektakuler adalah efek lengkungnya yang tajam dan tiba-tiba. Hal inilah yang membuat kiper Yunani terperangah karena bola berbelok begitu cepat dengan tiba-tiba. Apa yang menyebabkan ini?

Peneliti dari Inggris, Peter Beavrmann, mengatakan bahwa efek Magnus akan mengecil jika kecepatan gerak bola terlalu besar atau rotasinya lebih lambat. Jadi, untuk mendapat efek Magnus yang besar,

seorang pemain harus membuat bola berputar sangat cepat tetapi kecepatannya tidak boleh terlalu besar. Ketika Beckham menendang bola secara keras dengan sisi sepatunya sehingga bola berotasi dengan cepat, bola akan melambung dan mulai membelok akibat adanya efek Magnus. Gesekan bola dengan udara akan memperlambat gerakan bola (kecepatan bola berkurang). Jika rotasi bola tidak banyak berubah, maka pengurangan kecepatan dapat menyebabkan efek Magnus bertambah besar. Akibatnya bola tersebut melengkung lebih tajam, masuk gawang, serta membuat penonton terpesona dan berdecak kagum.

Masih banyak peristiwa dalam sepakbola yang menggunakan konsep fisika, seperti menyundul dan tendangan pinalti. Dapatkah Anda menganalisanya? Jika tertarik, Anda bisa menganalisa juga permainan lain yang mengaplikasikan konsep-konsep fisika. Siapa tahu karena hal tersebut Anda menjadi orang terkenal.

*(Dikutip seperlunya dari, Fisika Untuk Semua, Yohanes Surya, 2004)*

### Kolom Ilmuwan

Banyak olahraga yang menerapkan hukum-hukum fisika, seperti sepakbola dan basket. Pilihlah salah satu jenis olahraga yang dalam permainannya menerapkan hukum fisika khususnya yang bersangkutan dengan kinematika dengan analisis vektor. Buatlah tulisan ilmiah dan kirimkan ke surat kabar atau majalah di kota Anda. Jika tulisan Anda dimuat, maka tunjukkan kepada guru!



### Rangkuman

1. Vektor posisi  $\mathbf{r}$  menunjuk dari titik asal partikel. Untuk gerak pada bidang, vektor posisi dinyatakan sebagai  $\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j}$ .
2. Vektor perpindahan  $\Delta \mathbf{r}$  menunjukkan posisi awal partikel ke posisi akhirnya. Vektor perpindahan dinyatakan sebagai  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ , dalam bentuk komponen dapat ditulis  $\Delta \mathbf{r} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j}$  dengan  $\Delta x = x_2 - x_1$  dan  $\Delta y = y_2 - y_1$ .
3. Kecepatan rata-rata merupakan perubahan perpindahan dalam selang waktu tertentu.  $\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{t_2 - t_1}$  dalam bentuk komponen dapat ditulis  $\bar{\mathbf{v}} = \bar{v}_x \mathbf{i} + \bar{v}_y \mathbf{j}$  dengan  $\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  dan  $\bar{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ .

4. Vektor kecepatan adalah kecepatan rata-rata untuk selang waktu  $\Delta t$  mendekati 0,  $\bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ . Dalam bentuk komponen dapat ditulis  $\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}$  dengan  $v_x = \frac{dx}{dt}$  dan  $v_y = \frac{dy}{dt}$ .
5. Vektor posisi partikel  $\mathbf{r}$  dapat ditentukan dengan cara integrasi.  

$$x = x_0 + \int v_x dt \text{ dan } y = y_0 + \int v_y dt$$
6. Percepatan rata-rata merupakan perubahan kecepatan dalam tiap satuan waktu.  

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$
. Dalam bentuk komponen dapat ditulis  

$$\bar{\mathbf{a}} = \bar{a}_x \mathbf{i} + \bar{a}_y \mathbf{j}, \text{ dengan } \bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \text{ dan } \bar{a}_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}.$$
7. Vektor percepatan adalah percepatan rata-rata untuk selang waktu  $\Delta t$  mendekati nol.  $\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{a}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$ . Dalam bentuk komponen dapat ditulis  $\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$ , dengan  $a_x = \frac{dv_x}{dt}$  dan  $a_y = \frac{dv_y}{dt}$ .
8. Vektor kecepatan  $\mathbf{v}$  dapat ditentukan dengan cara integrasi  

$$v_x = v_{0x} + \int a_x dt \text{ dan } v_y = v_{0y} + \int a_y dt.$$
9. Dalam gerak parabola terdapat gerak horizontal dan gerak vertikal secara terpisah yaitu  $v_x = v_{0x} = \text{konstan}$  dan  $x = v_{0x} t$ ;  $v_y = v_{0y} + a_y t$  dan  $y = v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2$ .
10. Titik tertinggi yang dicapai benda pada gerak parabola adalah pada saat  $v_y = 0$ . secara matematis ditulis  $t_{0h} = \frac{v_{0y}}{g} = \frac{v_0 \sin \theta_0}{g}$   

$$x_h = \frac{v_0^2}{2g} \sin 2\theta \text{ dan } y_h = \frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \theta_0$$

11. Titik terjauh yang dapat dicapai dalam gerak parabola disebut titik terjauh  $R$ . Syarat mencapai titik terjauh adalah saat  $y_R = 0$ .

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

12. Kecepatan rata-rata sudut  $\bar{\omega}$  adalah perpindahan sudut dalam selang waktu tertentu.  $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$

13. Kecepatan sudut sesaat  $\omega$  merupakan kecepatan rata-rata untuk selang waktu yang sangat singkat (mendekati nol).

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$$

14. Percepatan sudut  $\alpha$  adalah turunan pertama dari fungsi kecepatan sudut terhadap waktu (  $\omega = \omega(t)$  ) atau turunan kedua dari fungsi terhadap waktu  $\theta = \theta(t)$ .

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

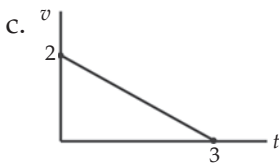
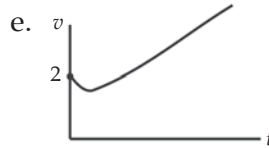
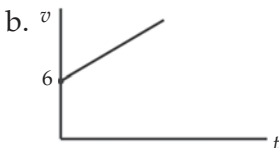
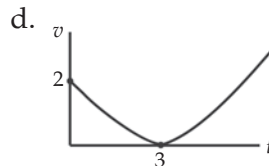
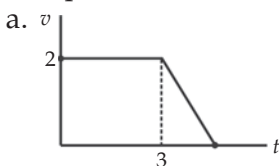
15. Jika diberikan fungsi percepatan sudut terhadap waktu  $\alpha = \alpha(t)$ , maka Anda dapat menghitung kecepatan sudut  $\omega$  dengan integrasi.

$$\omega = \omega_0 + \int \alpha dt; \omega_0 = \omega \text{ pada saat } t = 0.$$

## P e l a t i h a n

**A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!**

1. Diketahui sebuah titik berada di A (1,4) dan bergerak menuju B (4,5). Vektor posisi **AB** adalah ....
  - a.  $3\mathbf{i} + \mathbf{j}$
  - d.  $3\mathbf{i} - 2\mathbf{j}$
  - b.  $3\mathbf{i} - \mathbf{j}$
  - e.  $\mathbf{i} + \mathbf{j}$
  - c.  $3\mathbf{i} + 2\mathbf{j}$
2. Diantara satuan berikut yang sama dengan satuan percepatan adalah ....
  - a.  $\text{m s}^{-1}$
  - d.  $\text{N kg}^{-1}$
  - b.  $\text{N m}^{-1}$
  - e.  $\text{N ms}^{-1}$
  - c.  $\text{N s}^{-1}$
3. Diketahui sebuah partikel bergerak lurus dari keadaan diam menurut persamaan  $x = t^3 - 2t^2 + 3$ , dengan  $x$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Kecepatan partikel pada saat  $t = 5$  s adalah ....
  - a. 25 m/s
  - d. 50 m/s
  - b. 40 m/s
  - e. 55 m/s
  - c. 45 m/s
4. Sebuah benda bergerak menurut persamaan  $x = -3t^2 + 10t + 6$ , dengan  $x$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Besarnya percepatan benda adalah ....
  - a.  $10 \text{ m/s}^2$
  - d.  $6 \text{ m/s}^2$
  - b.  $-6 \text{ m/s}^2$
  - e.  $-10 \text{ m/s}^2$
  - c.  $16 \text{ m/s}^2$
5. Posisi suatu benda yang bergerak dinyatakan dengan persamaan  $y = t^2 - 6t + 2$ . Kecepatan benda ditunjukkan oleh grafik ....





6. Persamaan kecepatan sebuah titik materi menurut  $v_x = (2t - 4) \text{ m/s}$ . Bila pada  $t = 0$  titik materi tersebut berada di  $x = 10 \text{ m}$ , maka pada saat  $t = 2 \text{ s}$  berada pada ....
- $x = 15 \text{ m}$
  - $x = 7 \text{ m}$
  - $x = 6 \text{ m}$
  - $x = 8 \text{ m}$
  - $x = 9 \text{ m}$
7. Sebuah partikel bergerak dari keadaan diam dengan kecepatan menurut  $a = (t + 3)^2$ . Kecepatan partikel pada saat  $t = 23$  adalah ....
- 30,66 m/s
  - 300 m/s
  - 36,6 m/s
  - 32,6 m/s
  - 3,6 m/s
8. Sebuah peluru ditembakkan dengan sudut elevasi  $\theta$ . Jika jarak terjauh peluru sama dengan tinggi maksimumnya, maka nilai  $\tan \theta$  adalah ....
- 1
  - 2
  - $\sqrt{3}$
  - $\sqrt{6}$
  - 4
9. Sebuah benda ditembakkan miring ke atas dengan sudut elevasi  $60^\circ$  dan mencapai jarak terjauh  $10\sqrt{3}$ . Jika  $g = 60 \text{ m/s}^2$ , maka kecepatan pada saat mencapai titik tertinggi adalah ....
- $5\sqrt{2} \text{ m/s}$
  - $5\sqrt{3} \text{ m/s}$
  - $10 \text{ m/s}$
  - $10\sqrt{2} \text{ m/s}$
  - $10\sqrt{3} \text{ m/s}$
10. Sebutir peluru ditembakkan dari tanah condong ke atas dengan kecepatan  $v$ , sudut elevasi  $45^\circ$ , dan mengenai sasaran ditanah yang jarak mendatarnya sejauh  $2 \cdot 10^5 \text{ m}$ . Bila percepatan gravitasi  $9,8 \text{ m/s}^2$ , maka nilai  $v$  adalah ....
- $7 \cdot 10^2 \text{ m/s}$
  - $1,4 \cdot 10^3 \text{ m/s}$
  - $2,1 \cdot 10^3 \text{ m/s}$
  - $3,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$
  - $4,9 \cdot 10^3 \text{ m/s}$
11. Posisi sebuah benda dinyatakan dengan persamaan  $\mathbf{r} = (15t \sqrt{3})\mathbf{i} + (15t - 5t^2)\mathbf{j} \text{ m}$ . Setelah bergerak selama 1,5 sekon, kelajuan benda menjadi ....
- $0 \text{ ms}^{-1}$
  - $15 \text{ ms}^{-1}$
  - $11\sqrt{3} \text{ ms}^{-1}$
  - $22\sqrt{3} \text{ ms}^{-1}$
  - $15\sqrt{3} \text{ ms}^{-1}$

12. Suatu benda berotasi mengitari sebuah poros dengan posisi sudutnya.  $\theta$  dapat dinyatakan sebagai  $\theta = 2t^2 - gt + 4$ , dengan  $\theta$  dalam rad dan  $t$  dalam sekon. Kecepatan benda tersebut pada saat  $t = 1$  sekon adalah ....
  - a. -6 rad/s
  - b. -5 rad/s
  - c. +4 rad/s
  - d. -3 rad/s
  - e. +5 rad/s
13. Sebuah benda berotasi mengitari sebuah poros dengan kecepatan sudut  $\omega$  dan dapat dinyatakan sebagai  $\omega = t^2 - 5$ , dengan  $\omega$  dalam rad/s dan  $t$  dalam sekon. Percepatan sudut partikel pada benda saat  $t = 2$  adalah ...
  - a. 2 rad/s<sup>2</sup>
  - b. 3 rad/s<sup>2</sup>
  - c. 4 rad/s<sup>2</sup>
  - d. 5 rad/s<sup>2</sup>
  - e. 6 rad/s<sup>2</sup>
14. Kecepatan benda yang berotasi pada sebuah poros  $\theta = 8t \text{ rad} + t^3$ . Kecepatan pada saat  $t = 3$ , jika kecepatan awal sudut  $\omega_0 = 4 \text{ rad/s}$  adalah ...
  - a. 10 rad/s
  - b. 20 rad/s
  - c. 30 rad/s
  - d. 40 rad/s
  - e. 50 rad/s
15. Sebuah roda berputar terhadap sumbu poros tetap dan kecepatan sudut partikel pada roda dapat dinyatakan sebagai  $\omega = 2t - 3$ , dengan  $t$  dalam sekon dan  $\omega$  dalam rad/s. Jika posisi sudut awal  $\theta_0 = 1,5 \text{ rad}$ , maka posisi sudut partikel  $t = 1 \text{ s}$  adalah ....
  - a. -1,5
  - b. -1,0
  - c. +1,0
  - d. +1,5
  - e. -0,5

**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

1. Sebuah partikel  $P$  bergerak dan posisinya dinyatakan oleh  $x = 6t^2 - t^3$ , dengan  $t$  dalam sekon dan  $x$  dalam meter. Tentukan perpindahan yang ditempuh partikel tersebut antara  $t = 0$  dan  $t = 6$ , serta antara  $t = 2$  dan  $t = 4$ !
2. Vektor posisi seekor burung yang sedang terbang pada saat  $t$  dinyatakan oleh  $\mathbf{r} = 40t \mathbf{i} + (30t - 5t^2) \mathbf{j}$ . Tentukan perpindahan dan arah burung tersebut antara  $t = 1$  dan  $t = 3$ !
3. Sebutir peluru ditembakkan dengan kecepatan 40 m/s dan sudut elevasi  $60^\circ$ . Tentukan kecepatan dan kedudukan peluru setelah  $3\sqrt{3}$  sekon, jika percepatan gravitasi  $g = 10 \text{ m/s}^2$ !

4. Koordinat suatu benda dinyatakan sebagai  $x(t) = -1,6t^3 + 2,1t^2 - 42$ .
  - a. tentukan persamaan percepatan  $a(t)$ !
  - b. Tentukan percepatan pada saat  $t = 4$  s?
  - c. Berapa percepatan awal benda tersebut?
5. Diketahui sebuah penggulung dalam suatu mesin cetak berputar melalui sudut  $\theta(t) = 2,5t^2 - 0,4t$ , dengan  $t$  dalam sekon dan  $\theta$  dalam radian.
  - a. Hitunglah kecepatan sudut sebagai fungsi waktu  $t$ !
  - b. Hitunglah kecepatan sudut pada saat  $t = 2$ !
  - c. Tentukan waktu roda berhenti sesaat!

# Bab

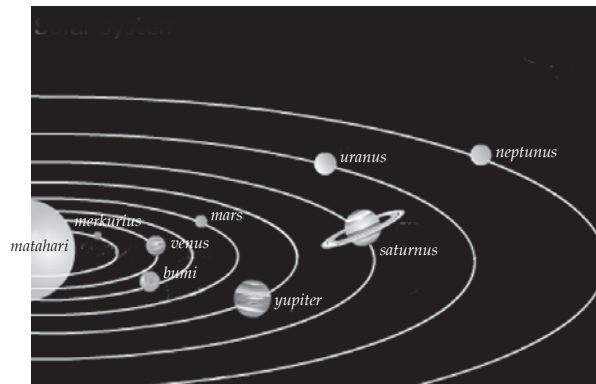
# II

## Gravitasi



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan hukum-hukum Newton.



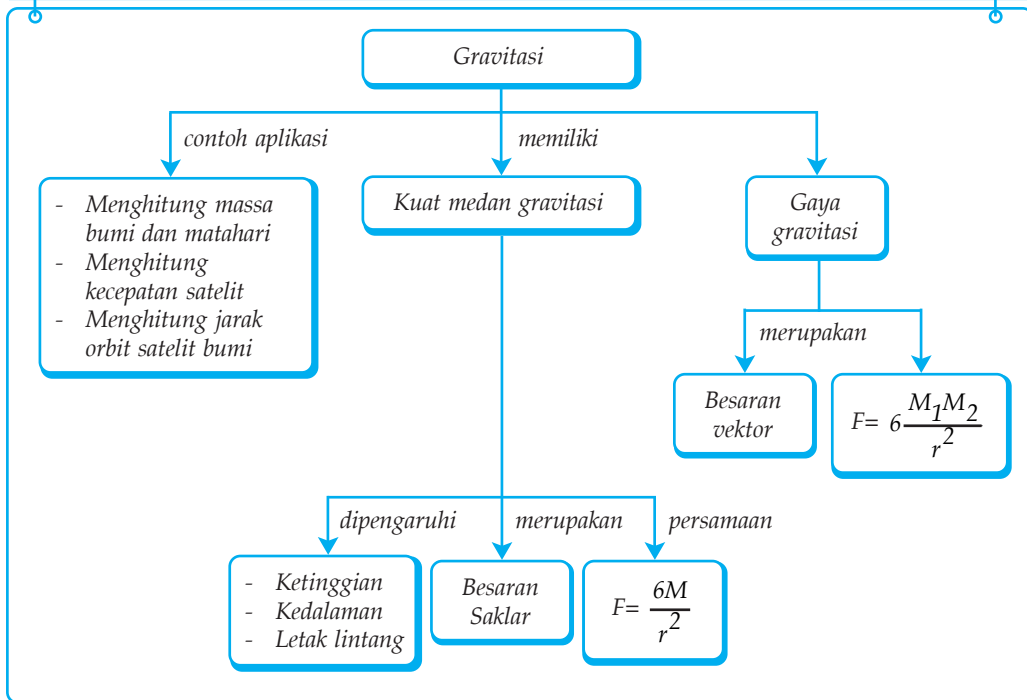
Sumber: Encarta Encyclopedia

Banyak keajaiban alam yang belum terkuak oleh manusia. Dahulu, kebanyakan orang mengira bahwa ada tiang tak terlihat yang menopang planet-planet di jagat raya. Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, diketahui bahwa tiang-tiang tersebut bernama gravitasi.

### Kata Kunci

- Gaya Gravitasi
- Medan
- Hukum Kepler
- Medan Gravitasi
- Medan Gravitasi
- Neraca Cavendish
- Kuat Medan Gravitasi
- Hukum Gravitasi Newton
- Percepatan Gravitasi
- Medan
- Garis Medan Gravitasi

## Peta Konsep



Anda pasti sering melihat fenomena gravitasi dalam keseharian. Misalnya buah kelapa jatuh dari tangkainya dan batu yang Anda lempar ke atas akan kembali jatuh ke bumi. Semua itu terjadi karena adanya gravitasi yang dimiliki bumi. Apa itu gravitasi? Secara sederhana gravitasi dapat diartikan sebagai gaya tarik yang dimiliki suatu benda. Gravitasi ada disebabkan adanya massa yang dimiliki benda.

Gravitasi merupakan gaya interaksi fundamental yang ada di alam. Para perencana program ruang angkasa secara terus menerus menyelidiki gaya ini. Sebab, dalam sistem tata surya dan penerbangan ruang angkasa, gaya gravitasi merupakan gaya yang memegang peranan penting. Ilmu yang mendalami dinamika untuk benda-benda dalam ruang angkasa disebut *mekanika celestial*. Sekarang, pengetahuan tentang mekanika celestial memungkinkan untuk menentukan bagaimana menempatkan suatu satelit dalam orbitnya mengelilingi bumi atau untuk memilih lintasan yang tepat dalam pengiriman pesawat ruang angkasa ke planet lain.

Pada bab ini Anda akan mempelajari hukum dasar yang mengatur interaksi gravitasi. Hukum ini bersifat universal, artinya interaksi bekerja dalam cara yang sama di antara bumi dan tubuh Anda, di antara matahari dan planet, dan di antara planet dan satelitnya. Anda juga akan menerapkan hukum gravitasi untuk fenomena seperti variasi berat terhadap ketinggian orbit satelit mengelilingi bumi dan orbit planet mengelilingi matahari.

## A. Perkembangan Teori Gravitasi

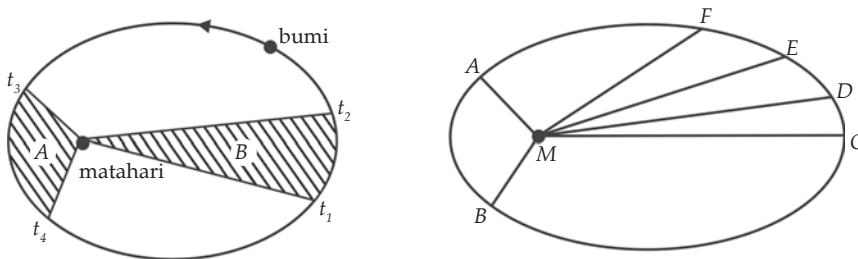
Sejak zaman Yunani Kuno, orang sudah berusaha menjelaskan tentang kinematika sistem tata surya. Oleh karena itu, sebelum membahas hukum gravitasi Newton, ada baiknya apabila Anda juga memahami pemikiran sebelum Newton menemukan hukum gravitasi.

Plato (427 – 347 SM) ilmuwan yunani mengemukakan bahwa bintang dan bulan bergerak mengelilingi bumi membentuk lintasan lingkaran sempurna. Claudius Ptolemaus pada abad ke-2 M juga memberikan pendapat yang serupa yang disebut *teori geosentris*. Teori ini menyatakan bumi sebagai pusat tata surya, sedangkan planet lain, bulan dan matahari berputar mengelilingi bumi. Namun, pendapat dari kedua tokoh tersebut tidak dapat menjelaskan gerakan yang rumit dari planet-planet.

Nicolaus Copernicus, ilmuwan asal Polandia, mencoba mencari jawaban yang lebih sederhana dari kelemahan pendapat Plato dan Ptolemaus. Ia mengemukakan bahwa matahari sebagai pusat sistem planet dan planet-planet lain termasuk bumi mengitari matahari. Anggapan Copernicus memberikan dasar yang kuat untuk mengembangkan pandangan mengenai tata surya. Namun, pertentangan pendapat di kalangan ilmuwan masih tetap ada. Hal ini mendorong para ilmuwan untuk mendapatkan data pengamatan yang lebih teliti dan konkret.

Tycho Brahe (1546–1601) berhasil menyusun data mengenai gerak planet secara teliti. Data yang Tycho susun kemudian dipelajari oleh Johannes Kepler (1571–1630). Kepler menemukan keteraturan-keteraturan gerak planet. Ia mengungkapkan tiga kaidah mengenai gerak planet, yang sekarang dikenal sebagai hukum I, II, dan III Kepler. Hukum-hukum Kepler tersebut menyatakan:

1. Semua planet bergerak di dalam lintasan elips yang berpusat di satu titik pusat (matahari).
2. Garis yang menghubungkan sebuah planet ke matahari akan memberikan luas sapuan yang sama dalam waktu yang sama.
3. Kuadrat dari periode tiap planet yang mengelilingi matahari sebanding dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet ke matahari.



**Gambar 2.1** Setiap planet bergerak dengan lintasan elips dan garis yang menghubungkan sebuah planet ke matahari akan memberikan luas sapuan yang sama dalam waktu yang sama ( $A = B$ ).

Pendapat Copernicus dan hukum Kepler memiliki kesamaan bahwa gaya sebagai penyebab keteraturan gerak planet dalam tata surya. Pada tahun 1687, Isaac Newton membuktikan dalam bukunya yang berjudul “Principia” bahwa gerakan bulan mengelilingi bumi disebabkan oleh pengaruh suatu gaya. Tanpa gaya ini bulan akan bergerak lurus dengan kecepatan tetap. (Sesuai dengan inersia), gaya ini dinamakan gaya gravitasi. Gaya gravitasi memengaruhi gerakan planet-planet dan benda-benda angkasa lainnya. Selain itu, gaya gravitasi juga penyebab mengapa semua benda jatuh menuju permukaan bumi. Pemikiran Newton merupakan buah karya luar biasa karena dapat menyatukan teori mekanika benda di bumi dan mekanika benda di langit. Hal ini dapat dilihat dari penjelasan mengenai gerak jatuh bebas dan gerak planet dalam tata surya.

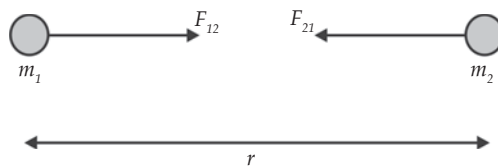
## B. Hukum Gravitasi Newton

Gravitasi bumi merupakan salah satu ciri bumi, yaitu benda-benda ditarik ke arah pusat bumi. Gaya tarik bumi terhadap benda-benda ini dinamakan gaya gravitasi bumi. Berdasarkan pengamatan, Newton membuat kesimpulan bahwa gaya tarik gravitasi yang bekerja antara dua benda sebanding dengan massa masing-masing benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda. Kesimpulan ini dikenal sebagai *hukum gravitasi Newton*. Hukum ini dapat dituliskan sebagai berikut.

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

Keterangan:

- $F$  : gaya tarik gravitasi (N)
- $m_1, m_2$  : massa masing-masing benda (kg)
- $r$  : jarak antara kedua benda (m)
- $G$  : konstanta gravitasi umum ( $6,673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ )



*Gambar 2.2 Dua benda yang terpisah sejauh  $r$  melakukan gaya tarik gravitasi satu sama lain yang besarnya sama meskipun massanya berbeda.*

Gaya gravitasi yang bekerja antara dua benda merupakan gaya aksi reaksi. Benda 1 menarik benda 2 dan sebagai reaksinya benda 2 menarik benda 1. Menurut hukum III Newton, kedua gaya tarik ini sama besar tetapi berlawanan arah ( $F_{\text{aksi}} = -F_{\text{reaksi}}$ ).

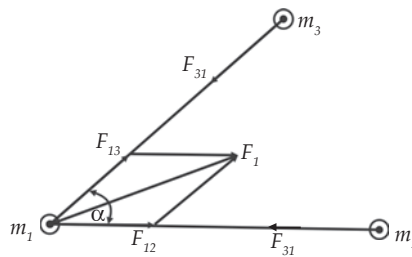
Jika suatu benda dipengaruhi oleh dua buah gaya gravitasi atau lebih, maka resultan gaya gravitasi yang bekerja pada benda tersebut dihitung berdasarkan penjumlahan vektor. Misalnya dua gaya gravitasi  $F_{12}$  dan  $F_{13}$  yang dimiliki benda bermassa  $m_2$  dan  $m_3$  bekerja pada benda bermassa  $m_1$ , maka resultan gaya gravitasi pada  $m_1$ , yaitu  $F_1$  adalah:

$$F_1 = F_{12} + F_{13}$$

Besar resultan gaya gravitasi  $F_1$  adalah

$$F_1 = \sqrt{F_{12}^2 + F_{13}^2 + 2F_{12}F_{13} \cos \alpha}$$

dengan  $\alpha$  adalah sudut antara  $F_{12}$  dan  $F_{13}$ .



*Gambar 2.3 Resultan dua gaya gravitasi  $F_{12}$  dan  $F_{13}$  akibat benda bermassa  $m_2$  dan  $m_3$  yang bekerja pada benda  $m_1$ .*

### Contoh 2.1

1. Bintang sirius merupakan bintang paling terang yang terlihat di malam hari. Bila massa bintang sirius  $5 \times 10^{31}$  kg dan jari-jarinya  $25 \times 10^9$  m, maka tentukan gaya yang bekerja pada sebuah benda bermassa 5 kg yang terletak di permukaan bintang ini?

Diketahui : a.  $m_1 = 5 \times 10^{31}$  kg  
b.  $m_2 = 5$  kg  
c.  $r = 25 \times 10^9$  m

Ditanyakan :  $F = \dots?$

Jawab:

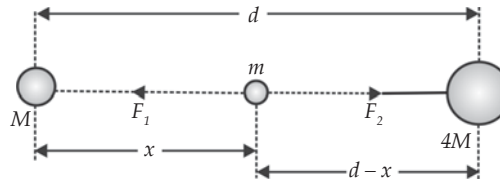
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6,67 \times 10^{-11}) \frac{(5 \times 10^{31})(5)}{(2,5 \times 10^9)^2}$$

$$= 2.668 \text{ N}$$

2. Dua bintang masing-masing massanya  $M$  dan  $4M$  terpisah pada jarak  $d$ . Tentukan letak bintang ketiga diukur dari  $M$  jika resultan gaya gravitasi pada bintang tersebut sama dengan nol!



Jawab:

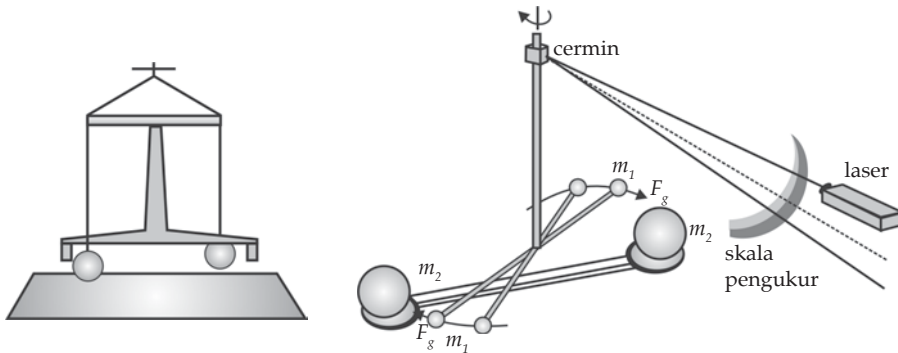


Misalnya massa bintang ketiga adalah  $m$ , dan jaraknya dari bintang yang bermassa  $M$  adalah  $X$ . Bintang ketiga bermassa  $m$  mengalami gaya gravitasi  $F_1$  berarah ke kiri yang dikerjakan oleh bintang  $M$  dan gaya gravitasi  $F_2$  berarah ke kanan yang dikerjakan oleh bintang  $4M$ . Supaya resultan gaya gravitasi pada bintang  $m$  sama dengan nol, maka kedua gaya gravitasi ini harus sama.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= F_2 \\
 \frac{GMm}{X^2} &= \frac{G4Mm}{(d-X)^2} \\
 \frac{1}{X^2} &= \frac{4}{(d-X)^2} \\
 \frac{d-X}{X} &= \sqrt{4} \\
 d-X &= 2X \quad \Rightarrow \quad X = \frac{1}{3}d
 \end{aligned}$$

## 1. Menentukan Nilai Konstanta Gravitasi Umum

Nilai  $G$  merupakan tetapan umum yang diukur secara eksperimen dan memiliki nilai numerik yang sama untuk semua benda. Nilai  $G$  ini pertama kali diukur oleh Hernry Cavendish, pada tahun 1798. Cavendish menggunakan peralatan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut!



(a) Neraca puntir Cavendish.

(b) Neraca puntir Cavendish versi modern.

**Gambar 2.4** Neraca puntir Cavendish untuk menentukan nilai  $G$ .

Cavendish menggunakan alat ini untuk menghitung massa bumi. Dua bola timah hitam digantungkan pada ujung-ujung sebuah tiang yang digantungkan pada kawat sedemikian rupa sehingga tiang dapat berputar dengan bebas. Batangan yang menyangga dua bola besar diputar sedemikian rupa sehingga bola besar dan bola kecil saling mendekati. Gaya tarik gravitasi antara bola besar dan bola kecil menyebabkan tiang tersebut berputar. Dengan mengukur besar putaran, Cavendish dapat menghitung gaya tarik antara bola yang massanya diketahui pada jarak tertentu dengan menggunakan hukum gravitasi. Cavendish tidak hanya memperkuat teori gravitasi Newton, tetapi juga berhasil menentukan nilai  $G$ . Nilai yang diterima sampai sekarang ini adalah  $G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ .

## 2. Pembuktian Hukum Gravitasi Newton

Newton membuktikan hukum gravitasinya dengan mengamati gerakan bulan. Bulan mengelilingi bumi satu kali dalam 27,3 hari. Lintasannya mirip lingkaran berjari-jari  $3,8 \times 10^8 \text{ m}$ . Menurut teori gerak melingkar, benda bergerak melingkar karena dipercepat oleh percepatan sentripetal yang arahnya menuju pusat lingkaran. Besar percepatan yang menyebabkan lintasan bulan berbentuk lingkaran adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} a &= \frac{V^2}{r} = \frac{(\omega r)^2}{r} = \omega^2 r = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 r = \frac{4\pi^2 r}{T^2} \\ &= \frac{4 \times (3,14)^2 \times (3,8 \times 10^8)}{(2,36 \times 10^6)^2} \\ &= 0,0027 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Sekarang hitunglah besar percepatan sentripetal ini dengan rumus Newton.

$$\begin{aligned} F &= \frac{GM_{\text{bumi}}M_{\text{bulan}}}{r^2} \\ M_{\text{bulan}} a &= \frac{GM_{\text{bumi}}M_{\text{bulan}}}{r^2} \\ a &= \frac{GM_{\text{bumi}}}{r^2} = \frac{6,67 \times 10^{-11} (5,97 \times 10^{24})}{(38 \times 10^8)^2} \\ &= 0,0027 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Terlihat bahwa hasil perhitungan ini ternyata sama dengan hasil pengamatan. Ini membuktikan bahwa rumus Newton dapat dipertanggung-jawabkan!

## Soal Kompetensi 2.1

1. Buktikan bahwa dimensi konstanta gravitasi  $G$  adalah  $M^1L^3T^{-2}$ !
2. Berapakah gaya gravitasi total pada bulan yang disebabkan adanya gaya gravitasi bumi dan matahari dengan mengandaikan posisi bulan, bumi, matahari membentuk sudut siku-siku?
3. Sebuah satelit penelitian yang memiliki massa 200 kg mengorbit bumi dengan jari-jari 30.000 km diukur dari pusat bumi. Berapa besar gaya gravitasi bumi yang bekerja pada satelit tersebut? Berapa persenkah gaya gravitasi tersebut dibandingkan dengan berat satelit di permukaan bumi? ( $m_b = 5,98 \times 10^{24}$  kg)
4. Buktikan adanya kesesuaian hukum gravitasi Newton dengan hukum Keppler!

## C. Kuat Medan Gravitasi

Besarnya kuat medan gravitasi ditunjukkan dengan besarnya percepatan gravitasi. Makin besar percepatan gravitasi, makin besar pula kuat medan gravitasinya. Besarnya percepatan gravitasi akibat gaya gravitasi dapat dihitung dengan hukum II Newton dan hukum gravitasi Newton.

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

$$M_1 a = \frac{GM_1M_2}{r^2} \Rightarrow a = \frac{GM_1}{r^2}$$

$M_1$  menyatakan massa bumi selanjutnya di tulis  $M$  saja. Percepatan  $a$  sering dinamakan percepatan akibat gravitasi bumi dan diberi simbol  $g$ .

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

Keterangan:

$g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$  atau  $N/kg$ )

$G$  : tetapan umum gravitasi ( $N m^2/kg^2$ )

$M$  : massa bumi (kg)

$r$  : jari-jari bumi (m)

Untuk benda yang terletak dekat permukaan bumi maka  $r \approx R$  (jari-jari benda dapat dianggap sama dengan jari-jari bumi), maka persamaannya menjadi menjadi:

$$g = \frac{GM}{R^2} = g_0$$

Tetapan  $g_0$  disebut percepatan akibat gravitasi bumi di permukaan bumi. Percepatan akibat gravitasi tidak tergantung pada bentuk, ukuran, sifat, dan massa benda yang ditarik, tetapi percepatan ini dipengaruhi oleh ketinggian kedalaman dan letak lintang.

## 1. Ketinggian

Percepatan akibat gravitasi bumi pada ketinggian  $h$  dari permukaan bumi dapat dihitung melalui persamaan berikut.

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

Tabel 2.1 Hubungan  $g$  dengan Ketinggian ( $h$ )

Ketinggian (km)	$g$ (m/s <sup>2</sup> )
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

### Contoh 2.2

Suatu benda mengalami percepatan gravitasi bumi sebesar  $6,4 \text{ m/s}^2$ . Hitung ketinggian benda tersebut jika jari-jari bumi  $6,375 \text{ km}$  dan massa bumi  $5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ .

Diketahui : a.  $M = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$   
 b.  $R = 6.375 \text{ km} = 6,375 \times 10^6 \text{ m}$   
 c.  $g = 6,4 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan : a.  $h = \dots?$

Jawab:

$$g = \frac{GM}{(R + h)^2} \Rightarrow R + h = \sqrt{\frac{GM}{g}}$$

$$6,375 \times 10^6 + h = \sqrt{\frac{(6,67 \times 10^{-11}) \times (5,98 \times 10^{24})}{6,4}}$$

$$6,375 \times 10^6 + h = 6,23 \times 10^6$$

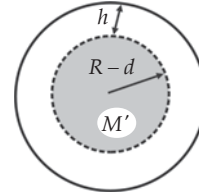
$$6,375 \times 10^6 + h = 7,894 \times 10^6$$

$$\begin{aligned} h &= 7,894 \times 10^6 - 6,375 \times 10^6 \\ &= 1,519 \times 10^6 \text{ m} \\ &= 1.519 \text{ km} \end{aligned}$$

## 2. Kedalaman

Percepatan akibat gravitasi bumi pada kedalaman  $d$ , dapat dianggap berasal dari tarikan bagian bumi berupa bola yang berjari-jari  $(R - d)$ . Jika massa jenis rata-rata bumi  $\rho$ , maka massa bola dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$M' = \frac{4}{3}\pi(R-d)^3 \rho$$



*Gambar 2.5 Percepatan gravitasi pada kedalaman tertentu.*

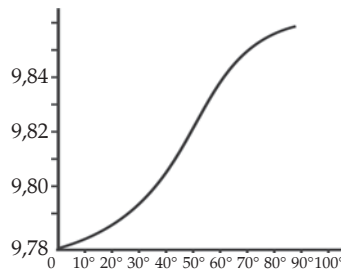
Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh percepatan gravitasi bumi pada kedalaman  $d$  adalah sebagai berikut.

$$g = \frac{Gm'}{(R-d)^2} = \frac{\frac{4}{3}\pi(R-d)^3 \rho}{(R-d)^2}$$

$$g = G\frac{4}{3}\pi(R-d)^3 \rho$$

## 3. Letak Lintang

Anda ketahui bahwa jari-jari bumi tidak rata. Makin ke arah kutub, makin kecil. Hal ini menyebabkan percepatan gravitasi bumi ke arah kutub makin besar. Percepatan gravitasi bumi terkecil berada di ekuator. Gambar 2.6 melukiskan kurva  $g$  sebagai fungsi sudut lintang.



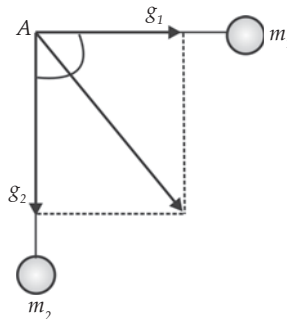
*Gambar 2.6 Pengaruh susut lintang terhadap gravitasi.*

**Tabel 2.2. Percepatan gravitasi di berbagai tempat**

Tempat	Lintang	Gravitasi (m/s <sup>2</sup> )
Kutub utara	90°	9,832
Greenland	70°	9,825
Stockholm	59°	9,818
Brussels	51°	9,811
Banff	51°	9,808
New York	41°	9,803
Chicago	42°	9,803
Denver	40°	9,796
San Fransisco	38°	9,800
Canal Zone	9°	9,782
Jawa	6° Selatan	9,782

*Sumber: Physics; Haliday, Resrick, 3 ed.*

Seperti halnya dengan gaya gravitasi, percepatan merupakan besaran vektor. Misalnya percepatan gravitasi pada suatu titik A yang diakibatkan oleh dua benda bermassa  $m_1$  dan  $m_2$  harus ditentukan dengan cara menjumlahkan vektor-vektor percepatan gravitasinya. Untuk lebih jelasnya, perhatikan Gambar 2.7 berikut!



**Gambar 2.7** Percepatan gravitasi yang diakibatkan oleh dua benda.

Percepatan gravitasi di titik A yang disebabkan oleh benda bermassa  $m_1$  dan  $m_2$  sebagai berikut.

$$g_1 = \frac{Gm_1}{r_1^2} \text{ dan } g_2 = \frac{Gm_2}{r_2^2}$$

Besar percepatan gravitasi di titik A dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

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

dengan  $\theta$  merupakan sudut antara  $g_1$  dan  $g_2$ .

## D. Aplikasi Hukum Gravitasi Newton

Sebelum hukum gravitasi ditemukan oleh Newton, data-data tentang gerakan bulan dan planet-planet telah banyak dikumpulkan oleh para ilmuwan. Berdasarkan hukum gravitasi Newton, data-data tersebut digunakan untuk menghitung besaran lain tentang benda ruang angkasa yang tidak mungkin diukur dalam laboratorium.

### 1. Menghitung Massa Bumi

Massa bumi dapat dihitung dengan menggunakan nilai  $G$  yang telah diperoleh dari percobaan Cavendish. Anggap massa bumi  $M$  dan jari-jari bumi  $R = 6,37 \times 10^6$  m (bumi dianggap bulat sempurna). Berdasarkan rumus percepatan gravitasi bumi, Anda bisa menghitung besarnya massa bumi.

$$\begin{aligned}g_o &= \frac{GM}{R^2} \Rightarrow M = \frac{g_o R^2}{G} \\&= \frac{9,8(6,37 \times 10^6)^2}{6,67 \times 10^{-11}} \\&= 5,96 \times 10^{24} \text{ kg}\end{aligned}$$

### 2. Menghitung Massa Matahari

Telah Anda ketahui bahwa jari-jari rata-rata orbit bumi  $r_b = 1,5 \times 10^{11}$  m dan periode bumi dalam mengelilingi matahari  $T_b = 1$  tahun  $= 3 \times 10^7$  s. Berdasarkan kedua hal tersebut serta dengan menyamakan gaya matahari dan gaya sentripetal bumi, maka dapat diperkirakan massa matahari.

$$\begin{aligned}F_g &= F_s \\ \frac{GM_M M_B}{r_B^2} &= \frac{M_B v_B^2}{r_B} \quad (M_M = \text{massa matahari}, M_B = \text{massa bumi}) \\ \text{Karena } v_B &= \frac{2\pi r_B}{T_B}, \text{ maka} \\ \frac{GM_M M_B}{r_B^2} &= \frac{M_B 4\pi^2 r_B^2}{T_B^2 r_B} \\ M_M &= \frac{4\pi^2 r_B^3}{GT_B^2} \\ &= \frac{4(3,14)^2 (1,5 \times 10^{11})^3}{(6,67 \times 10^{-11})(3 \times 10^7)^2} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}\end{aligned}$$

### 3. Menghitung Kecepatan Satelit

Suatu benda yang bergerak mengelilingi benda lain yang bermassa lebih besar dinamakan satelit, misalnya bulan adalah satelit bumi. Sekarang banyak satelit buatan diluncurkan untuk keperluan komunikasi, militer, dan riset teknologi. Untuk menghitung kecepatan satelit dapat digunakan dua cara, yaitu hukum gravitasi dan gaya sentrifugal.

#### a. Menghitung Kecepatan Satelit Menggunakan Hukum Gravitasi

Anggap suatu satelit bermassa  $m$  bergerak melingkar mengelilingi bumi pada ketinggian  $h$  dari permukaan bumi. Massa bumi  $M$  dan jari-jari bumi  $R$ . Anda tinjau gerakan satelit dari pengamat di bumi. Di sini gaya yang

bekerja pada satelit adalah gaya gravitasi,  $F = \frac{GMm}{r^2}$ . Berdasarkan rumus hukum II Newton, Anda dapat mengetahui kecepatan satelit.

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

$$m \cdot a = \frac{GMm}{r^2}$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Karena  $r = R + h$ , maka

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}, \text{ dikalikan dengan } \frac{R^2}{R^2}, \text{ atau dapat dituliskan}$$

$$= \sqrt{\frac{GM}{R^2} \frac{R^2}{R+h}}, \text{ ingat } \frac{GM}{R^2} = g_0, \text{ maka}$$

$$= \sqrt{g_0 \frac{R^2}{R+h}}$$

$$v = R \sqrt{\frac{g_0}{R+h}}$$



## b. Menghitung Kecepatan Satelit Menggunakan Gaya Sentrifugal

Sebuah satelit memiliki orbit melingkar, sehingga dalam acuan ini, satelit akan merasakan gaya sentrifugal ( $mv^2/r^2$ ). Gaya sentrifugal muncul karena pengamatan dilakukan dalam sistem non inersial (sistem yang dipercepat, yaitu satelit). Gaya sentrifugal besarnya sama dengan gaya gravitasi.

$$F_{\text{sentrifugal}} = F_{\text{gravitasi}}$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Karena  $r = R + h$ , maka

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}, \text{ dikalikan dengan } \frac{R^2}{R^2}, \text{ maka}$$

$$= \sqrt{\frac{GM}{R^2} \frac{R^2}{R+h}}, \text{ ingat } \frac{GM}{R^2} = g_0, \text{ maka}$$

$$= \sqrt{g_0 \frac{R^2}{R+h}}$$

$$v = R \sqrt{\frac{g_0}{R+h}}$$

## 4. Menghitung Jarak Orbit Satelit Bumi

Apabila satelit berada pada jarak  $r$  dari pusat bumi, maka kelajuan satelit saat mengorbit bumi dapat dihitung dengan menyamakan gaya gravitasi satelit dan gaya sentripetalnya.

$$F_{\text{sentrifugal}} = F_{\text{gravitasi}}$$

$$m \frac{v^2}{r} = mg$$

$$m \frac{v^2}{r} = m \left( \frac{R_B}{r} \right)^2 g$$

$$v = R_B \sqrt{\frac{g}{r}}$$

Untuk posisi orbit geosinkron, yaitu bila periode orbit satelit sama dengan periode rotasi bumi, maka jari-jari orbit satelit dapat ditentukan sebagai berikut.

$$v = R_B \sqrt{\frac{g}{r}} \text{ atau } v^2 = \frac{R_B^2 g}{r}$$

karena  $v = \frac{2\pi r}{T}$ , maka

$$\begin{aligned} \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} &= g \frac{R_B^2}{r} \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{T^2 g R_B^2}{4\pi^2}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{(86400)^2 (9,8) (6,4 \times 10^6)^2}{4(3,14)^2}} \\ &= 4,24 \times 10^7 \text{ m} \end{aligned}$$



### Kegiatan

Misalkan Anda diminta oleh sebuah perusahaan swasta untuk meluncurkan sebuah satelit ke suatu titik di atas permukaan bumi. Satelit tersebut akan digunakan oleh perusahaan untuk siaran televisi, prakiraan cuaca, dan komunikasi. Tentukan posisi satelit diukur dari permukaan bumi dan kecepatan satelit selama mengorbit bumi!

## 5. Kecepatan Lepas

*Kecepatan lepas* adalah kecepatan minimum suatu benda agar saat benda tersebut dilemparkan ke atas tidak dapat kembali lagi. Kecepatan lepas sangat dibutuhkan untuk menempatkan satelit buatan pada orbitnya atau pesawat ruang angkasa. Besarnya kecepatan lepas yang diperlukan oleh suatu benda sangat erat kaitannya dengan energi potensial gravitasi yang dialami oleh benda tersebut. Besar kecepatan lepas dirumuskan sebagai berikut

$$v_l = \sqrt{2 \frac{GM}{R}}$$

Kecepatan lepas ( $v_l$ ) tidak bergantung pada massa benda. Namun, untuk mempercepat benda sampai mencapai kecepatan lepas diperlukan energi yang sangat besar dan tentunya bergantung pada massa benda yang ditembakkan. Sebuah benda yang ditembakkan dari bumi dengan besar kecepatan  $v_l$ , kecepatannya akan nol pada jarak yang tak terhingga, dan jika lebih kecil dari  $v_l$  benda akan jatuh lagi ke bumi.

### Contoh 2.3

1. Hitung besar kecepatan minimum sebuah benda yang ditembakkan dari permukaan bumi agar benda tersebut mencapai jarak tak terhingga!

Jawab:

$$\begin{aligned}v_l &= \sqrt{2 \frac{GM}{R}} \\&= \sqrt{2 \frac{(6,67 \times 10^{-11})(5,97 \times 10^{24})}{6,37 \times 10^6}} \\&= 1,2 \times 10^4 \text{ m/s}\end{aligned}$$

2. Diketahui dalam atom hidrogen, elektron dan proton terpisah sejauh  $5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$ .
  - a. Hitunglah gaya gravitasi antara dua partikel tersebut!
  - b. Bila kecepatan orbit elektron  $2,2 \times 10^6 \text{ m/s}$ , maka apakah gaya gravitasi tersebut cukup kuat untuk mempertahankan elektron tetap pada orbitnya?

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

b.  $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

c.  $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

d.  $r = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$

Ditanyakan : a.  $F_g = \dots?$

b.  $F_s = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned}\text{a. } F_g &= \frac{G m_p m_e}{r^2} \\&= (6,67 \times 10^{-11}) \frac{(1,67 \times 10^{-27})(9,1 \times 10^{-31})}{(5,3 \times 10^{-11})^2} \\&= 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{b. } F_s &= \frac{m_e v_e^2}{r} \\&= \frac{(9,1 \times 10^{-31})(2,2 \times 10^6)^2}{(5,3 \times 10^{-11})} \\&= 8,31 \times 10^{-8} \text{ N}\end{aligned}$$

Karena  $F_g \ll F_s$ , maka gaya gravitasi tidak mampu untuk mempertahankan elektron pada orbitnya.

## Soal Kompetensi 2.2

1. Jika percepatan gravitasi di permukaan suatu planet sama dengan  $g$ , maka berapakah gravitasi suatu titik yang berjarak  $R$  dari permukaan planet, dengan  $R$  adalah jari-jari planet?
2. Berdasarkan rumus  $v = \frac{2\pi r}{T}$ , maka buktikan bahwa persamaan periode satelit adalah  $T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{g_0 R^2}}$ !
3. Buktikan dan jelaskan bahwa  $g = g_0(1 - \frac{h}{R})$  dan makna persamaan tersebut!  
( $g_0$  = percepatan gravitasi di permukaan bumi,  $g$  = percepatan gravitasi di ketinggian  $h$ , dan  $h$  = ketinggian di atas permukaan bumi)
4. Buktikan dari salah satu daftar pada tabel di bawah ini!

**Tabel 2.3 Percepatan Gravitasi Planet-Planet**

Planet	Percepatan Gravitasi (N/kg)
Merkurius	0,38
Venus	0,9
Bumi	1
Mars	0,38
Yupiter	2,87
Saturnus	1,32
Uranus	0,93
Neptunus	1,23

## T o k o h

### Johannes Kepler (1571 – 1630)



Sumber: Jendela Iptek, Cahaya

Johannes Kepler adalah ahli astronomi dan matematika dari Jerman, penemu hukum Kepler, teleskop Kepler, teori cahaya, dan bapak astronomi modern. Kepler dilahirkan di Well der Stadt, Wurttemberg, Jerman, pada tanggal 27 Desember 1571. Masa kecil Kepler penuh dengan penderitaan. Ia lahir sebelum waktunya. Kepler tak terurus,

badannya kurus, lemah, dan sakit-sakitan. Ayahnya tak mau memberinya makan. Untunglah kepala desa Wurttemberg baik hati. Kepler dijadikan anak angkat dan dibiayai sekolahnya.

Pada tahun 1593, Kepler menjadi guru. Dalam usia 25 tahun, Kepler menerbitkan bukunya yang berjudul *The Cosmic Mystery* (1596) dalam bahasa Latin. Dengan karyanya ini, Kepler menjadi ilmuwan terkenal pertama yang secara publik mendukung Copernicus. Karyanya ini juga menarik perhatian Tycho Brahe. Kepler kemudian diangkat menjadi pembantunya di observatorium Benatek, Praha. Tahun berikutnya, Tycho Brahe meninggal. Ia meninggalkan catatan dan data tentang posisi 777 bintang tetap yang masih berantakan dan belum lengkap. Selanjutnya Kepler menyusun dan melengkapinya menjadi 1.005 bintang.

Setelah mempelajari data-data Tycho Brahe selama 8 tahun, Kepler menemukan bentuk orbit planet yang sebenarnya. Kepler merangkum penemuan-penemuannya dalam *The New Astronomy* (1609). Isinya antara lain hukum Kepler I “Orbit planet berbentuk elip dengan Matahari terletak pada salah satu fokusnya,” dan hukum Kepler II, “Garis yang menghubungkan sebuah planet dengan matahari itu menyapu luas area yang sama dalam interval waktu yang sama.” Sepuluh tahun kemudian Kepler berhasil menemukan hukum Kepler III, “Kuadrat kala revolusi planet berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet dengan matahari.” Hukum Kepler III ini dimuat dalam bukunya yang berjudul *Harmony of the Worlds* (1619).

Hukum Kepler ini memberi inspirasi kepada Newton dalam menemukan teori gravitasi. Hukum Kepler ditemukan setelah Kepler bekerja keras selama 18 tahun. Kepler meninggal dunia di Regensburg, Bavaria, pada tanggal 15 November 1630, pada umur 59 tahun.

(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)

### Kolom Ilmuwan

Anda telah membaca kisah Johannes Kepler pada kolom tokoh. Carilah informasi mengenai tiga hukum yang ditetapkan Kepler di buku, majalah, atau di internet. Berdasarkan data yang Anda peroleh, buatlah sebuah tulisan mengenai ketiga hukum tersebut. Sertakan persamaan matematis, contoh penggunaan, dan kegunaan ketiga hukum Kepler. Kumpulkan tulisan Anda di meja guru!

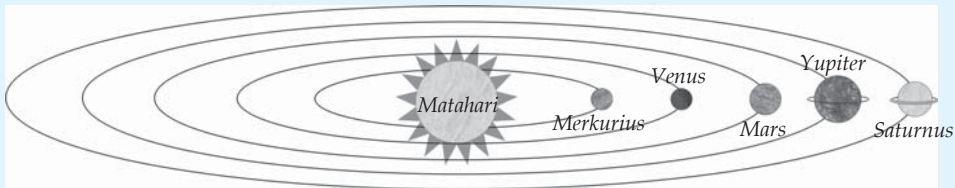


## Rangkuman

1. Gravitasi adalah gaya tarik yang dimiliki suatu benda.
2. Persamaan hukum gravitasi Newton adalah  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ .
3. Besar resultan gaya gravitasi adalah  $F = \sqrt{F_{12}^2 + F_{13}^2 + 2F_{12}F_{13}\cos\alpha}$ .
4. Persamaan kuat medan gravitasi adalah  $g = \frac{Gm}{r^2}$ .
5. Bunyi hukum kekekalan energi mekanik adalah bila tidak ada gaya lain yang bekerja pada suatu benda selain gaya gravitasi, maka jumlah energi mekaniknya adalah tetap.
6. Persamaan kecepatan lepas adalah  $v_l = \sqrt{2 \frac{GM}{R}}$

## Info Kita

### Keajaiban Langit



Akhir Maret hingga awal April tahun 2004, terdapat pemandangan langit yang menakjubkan. Lima planet, yaitu Merkurius, Venus, Mars, Jupiter, dan Saturnus muncul bersama di sekitar bulan. Kelima planet tersebut bisa terlihat bersama karena mereka berada pada sisi yang sama terhadap matahari. Jajaran planet tersebut paling jelas terlihat beberapa saat setelah matahari tenggelam. Mereka akan mengiringi terbitnya bulan sabit.

Setiap beberapa tahun sekali, orbit kelima planet memang berada di sisi yang sama terhadap matahari. Kondisi ini membuat planet-planet itu bisa terlihat bersamaan, meskipun Merkurius kadang sulit diamati karena posisinya agak rendah.

Myles Standish, seorang astronom di Laboratorium Propulsi Jet Nasa di Pasadena, California mengatakan bahwa peristiwa unik yang bisa dilihat menggunakan mata telanjang itu akan terulang lagi pada bulan April 2036. Namun, apakah itu benar, hanya waktu yang akan membuktikannya.

Untuk melihat Merkurius, Anda dapat memandang ke arah sisi sebelah kanan bulan. Planet terdekat dengan matahari ini akan tampak terang dengan latar belakang warna merah mawar cahaya matahari. Setelah menemukan Merkurius, dengan menarik garis khayalan lurus ke atas, akan ditemukan Venus yang sangat terang. Kemudian akan nampak Mars dengan sinarnya yang kemerahan. Selanjutnya ada Saturnus yang kelihatan berwarna kuning. Jika Anda menggunakan teleskop, maka Anda bisa melihat cincin Saturnus yang indah. Sementara Jupiter akan terlihat setelah empat planet yang lain agak menurun di horizon langit. Di langit malam itu, Venus menjadi “bintang”nya. Planet yang mempunyai ukuran lebih kecil dari bumi terlihat mendominasi langit malam.

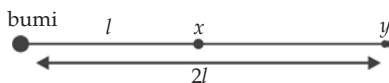
(Dikutip seperlunya dari Suplemen Anak *Suara Merdeka*, “Yunior”, edisi 209, April 2004)

## P e l a t i h a n

### A. Pilihlah jawaban yang tepat dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!

- Dimensi dari tetapan gravitasi umum  $G$  adalah ....
  - $ML^2T^{-2}$
  - $M^3L^3T^{-2}$
  - $M^{-1}L^3T^{-2}$
  - $M^2L^3T^{-2}$
  - $M^{-3}L^3T^{-2}$
- Kuat medan gravitasi pada permukaan bumi setara dengan ....
  - gaya gravitasi
  - energi potensial gravitasi
  - potensial gravitasi
  - tetapan gravitasi
  - percepatan gravitasi

3. Planet X mempunyai massa  $a$  kali massa bumi dan jari-jari  $b$  kali jari-jari bumi. Berat suatu benda yang berada di planet X dibandingkan berat benda tersebut di bumi menjadi ... kali.
- $a \times b$
  - $a \times b^2$
  - $a/b$
  - $a/b^2$
  - $(ab)^{-1}$
4. Dua buah bulan dari planet Yupiter mempunyai jari-jari yang sama, sedangkan massanya berbanding 3 : 2. Perbandingan percepatan gravitasi pada permukaan kedua bulan tersebut adalah ....
- 9 : 4
  - 2 : 3
  - 3 : 2
  - 6 : 1
  - 4 : 9
5. Percepatan gravitasi di permukaan bumi besarnya  $g$  dan jari-jari bumi  $R$ . Percepatan gravitasi benda yang terletak pada jarak  $R$  dari permukaan bumi adalah ....
- $2g$
  - $4g$
  - $\frac{1}{4}g$
  - $\frac{1}{4}g$
  - $\frac{1}{16}g$
6. Perhatikan gambar di bawah ini!



- Gambar di atas menunjukkan dua titik  $x$  dan  $y$  berada sejauh  $l$  dan  $2l$  dari pusat bumi. Potensial gravitasi di  $x = -8 \text{ kJ/kg}$ . Jika sebuah benda bermassa 1 kg di bawa dari  $x$  ke  $y$ , maka usaha yang dilakukan pada massa tersebut adalah ....
- 4 kJ
  - 2 kJ
  - +2 kJ
  - 4 kJ
  - +8 kJ
7. Planet Mercury memiliki jari-jari  $2,6 \times 10^6 \text{ m}$  dan massa  $3,3 \times 10^{23} \text{ kg}$ . Tetapan gravitasi umum  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ , maka energi yang dibutuhkan untuk mengangkat sebuah massa 12 kg dari permukaan luar planet adalah ....
- 0,025 J
  - 19,6 J
  - $85 \times 10^6 \text{ J}$
  - $1.0 \times 10^8 \text{ J}$
  - $2,3 \times 10^{28} \text{ J}$



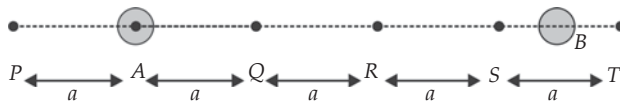
8. Sebuah benda di bumi beratnya  $w_1$  dan berat di suatu planet adalah  $w_2$ . Jika massa planet tiga kali massa bumi dan jari-jari planet dua kali jari-jari bumi, maka perbandingan berat benda di bumi dengan di planet adalah ....

- a. 3 : 4
- b. 4 : 3
- c. 2 : 1
- d. 1 : 2
- e. 3 : 2

9. Bumi memiliki radius  $R$  dan percepatan jatuh bebas pada permukaannya  $g$ . Percepatan jatuh bebas pada ketinggian  $h$  di atas permukaan bumi adalah ....

- a.  $\frac{g}{R+h}$
- b.  $\frac{gR}{R+h}$
- c.  $\frac{gR}{(R+h)^2}$
- d.  $\frac{gh^2}{(R+h)^2}$
- e.  $\frac{gR^2}{(R+h)^2}$

10. Perhatikan gambar di bawah ini!



Lima buah titik  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $S$ , dan  $T$  terletak segaris lurus dan berada dalam pengaruh medan gravitasi benda  $A$  dan  $B$ . Jika  $m_A = 9 m_B$ , maka titik yang mendapat pengaruh medan gravitasi terbesar adalah titik ....

- a.  $P$
- b.  $Q$
- c.  $R$
- d.  $S$
- e.  $T$

11. Satelit  $A$  dan  $B$  mempunyai massa yang sama mengelilingi bumi dan orbitnya berbentuk lingkaran. Satelit  $A$  berada pada ketinggian orbit  $R$  dan  $B$  pada  $2R$  di atas permukaan bumi. Perbandingan energi potensial satelit  $A$  dan  $B$  adalah ....

- a. 1 : 2
- b. 2 : 1
- c. 3 : 1
- d. 2 : 3
- e. 3 : 2

12. Kuat medan gravitasi di suatu titik di luar bumi yang berada sejauh  $x$  dari pusat bumi adalah  $5 \text{ N/kg}$ . Jika kuat medan gravitasi di permukaan bumi adalah  $10 \text{ N/kg}$ , maka besar jari-jari bumi adalah ....

- a.  $\frac{1}{10}$  kali
- b.  $\frac{1}{5}$  kali
- c.  $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$  kali
- d.  $(\sqrt{2})$  kali
- e.  $\frac{1}{2}$  kali

13. Sebuah satelit komunikasi mempunyai berat  $w$  ketika berada di permukaan bumi. Berapa gaya gravitasi bumi yang akan menarik satelit ketika satelit mengorbit di dalam satu orbit lingkaran dengan jari-jari tiga kali jari-jari bumi?

- a.  $9w$
- b.  $\frac{1}{9}ww$
- c.  $w/4$
- d.  $w/3$
- e.  $\frac{1}{2}w$

14. Perhatikan gambar di bawah ini!



$P$  dan  $Q$  adalah pusat-pusat dua bola kecil masing-masing bermassa  $m$  dan  $4m$ . Besar kuat medan gravitasi kedua bola ini di  $R$  bernilai sama. Nilai perbandingan  $x$  dan  $y$  adalah ....

- a.  $1 : 16$
- b.  $1 : 4$
- c.  $1 : 2$
- d.  $2 : 1$
- e.  $4 : 1$

15. Periode bulan mengelilingi bumi  $27,3$  hari. Jika percepatan akibat gravitasi bumi di permukaan bumi adalah  $9,8 \text{ m/s}^2$  dan jari-jari bumi  $6,375 \text{ km}$ , maka jarak bulan ke bumi adalah ....

- a.  $3,83 \times 10^8 \text{ m}$
- b.  $2,24 \times 10^8 \text{ m}$
- c.  $5,73 \times 10^8 \text{ m}$
- d.  $3,33 \times 10^5 \text{ m}$
- e.  $3,84 \times 10^8 \text{ m}$

**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

1. Sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian  $h$  meter di atas permukaan bumi. Benda mencapai tanah dalam waktu 10 detik. Jika benda yang sama dijatuhkan dari ketinggian  $h$  di atas permukaan bulan, maka hitung waktu yang dibutuhkan benda untuk mencapai permukaan bulan! (massa bulan  $\frac{1}{81}$  massa bumi dan jari-jari bulan 0,27 jari-jari bumi)
2. Dua buah gugus bintang yang berjarak 15 tahun cahaya (1 tahun cahaya sama dengan  $9,46 \times 10^{15} \text{ m}$ ) terdiri atas 3 juta bintang. Jika tiap bintang massanya  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ , maka hitunglah gaya tarik dua gugus bintang tersebut!
3. Percepatan akibat gravitasi di planet Jupiter  $25,9 \text{ m/s}^2$ . Jika massa jenis planet Jupiter,  $1,33 \text{ gr/cm}^3$ , maka hitunglah jari-jarinya!
4. Massa jenis rata-rata planet Mars  $3,96 \text{ g/cm}^3$ . Jika jari-jari Mars 3.435 km, maka hitunglah percepatan akibat gravitasi di permukaan Mars!
5. Hitunglah gaya tarik gravitasi antara bumi dan bulan, jika jarak bumi-bulan  $3,8 \times 10^8 \text{ m}$ , massa bumi  $5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ , dan massa bulan  $7,36 \times 10^{22} \text{ kg}$ !
6. Hitung berat orang di bulan jika beratnya di bumi 600 Newton. Anggap jari-jari bumi 3,7 kali jari-jari bulan dan massa bumi 80 kali massa bulan!
7. Orang yang beratnya 800 N di bumi, diperkirakan akan mempunyai berat sebesar 300 N di Mars. Jika massa Mars 0,11 kali massa bumi dan jari-jari bumi 6.375 km, maka hitunglah jari-jari Mars!
8. Anggap bumi sebagai bola pejal berjari-jari 6.37 km dan massa jenis rata-ratanya  $5,5 \text{ g/cm}^3$ . Hitunglah percepatan akibat gravitasi bumi!
9. Sebuah satelit mengelilingi bumi pada ketinggian 800 km dari permukaan bumi. Hitunglah periode dan kecepatan satelit jika jari-jari bumi = 6.375 km dan  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ !
10. Pada titik sudut  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , dan  $D$  sebuah persegi panjang diletakkan masing-masing massa sebesar 100 kg dan 10 kg. Diketahui Panjang  $AB = CD = 6 \text{ m}$ , dan  $AC = BD = 8 \text{ m}$  ( $AD$  diagonal). Hitung gaya gravitasi yang dialami di titik  $D$ !

## Bab

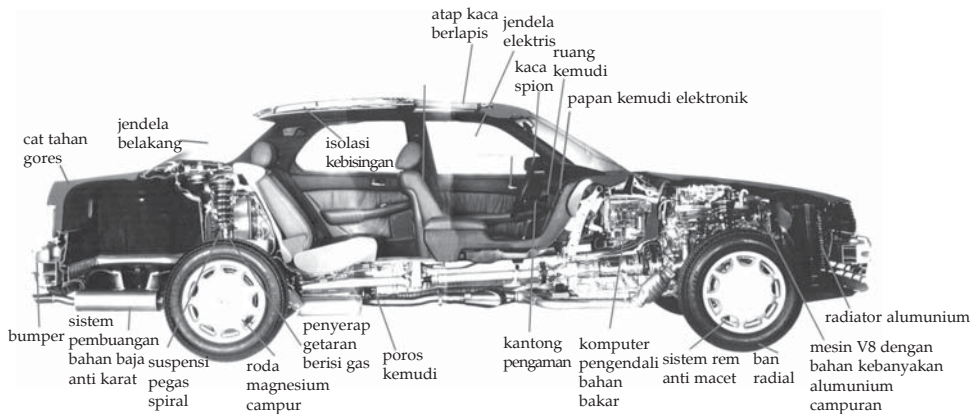
## III

# Elastisitas dan Getaran Harmonik



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menganalisis pengaruh gaya pada sifat elastisitas bahan dan dapat menganalisis hubungan antara gaya dengan getaran.

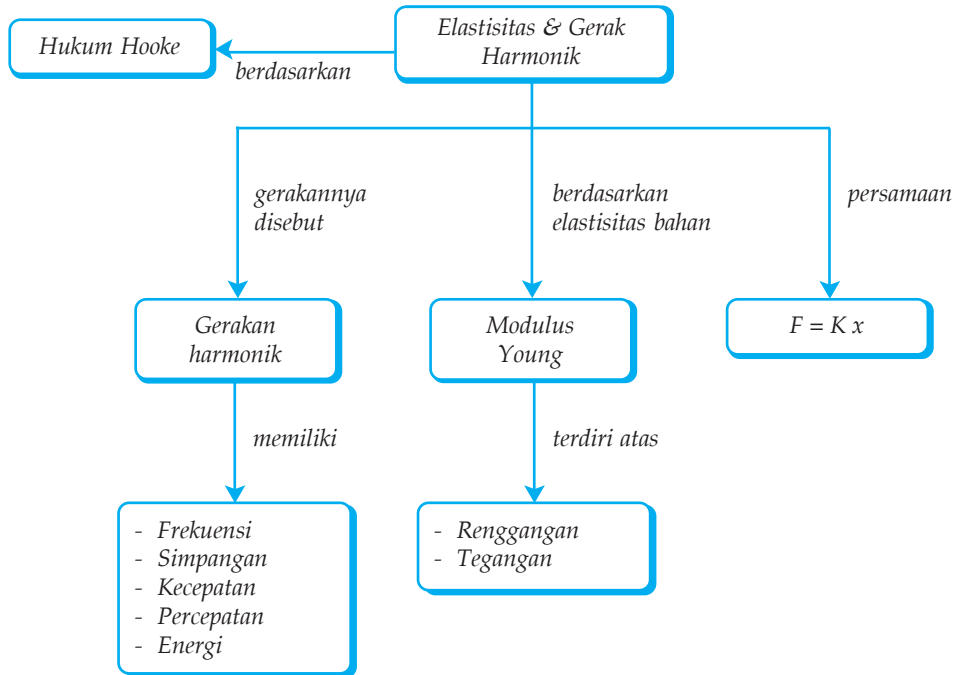


Berdasarkan pemahaman yang baik tentang sifat elastisitas bahan, para produsen mobil dapat menciptakan mobil yang nyaman dan aman di kendalai. Coba amati gambar mobil di atas. Komponen apa saja yang menerapkan prinsip elastisitas?

### Kata Kunci

- Elastisitas
- Tegangan
- Regangan
- Modulus Young
- Energi Potensial Pegas
- Susunan Seri Pegas
- Getaran Harmonik
- Susunan Paralel Pegas
- Kecepatan Getaran Harmonik
- Percepatan Getaran Harmonik
- Energi Getaran Harmonik
- Hukum Hooke

## Peta Konsep



Di SMP, Anda telah mempelajari konsep energi potensial dan energi kinetik. *Energi Potensial* adalah energi yang dimiliki benda karena kedudukannya. Energi ini tersembunyi dalam benda, tetapi jika diberi kesempatan dapat dimanfaatkan. Contoh benda-benda yang memiliki energi potensial, antara lain, karet ketapel, tali busur, dan pegas.

Energi potensial elastis atau energi potensial pegas yang disebabkan oleh gaya selalu menentang perubahan bentuk benda. Sifat elastis zat merupakan faktor yang selalu diperhitungkan dalam dunia teknik, terutama teknik bangunan. Hal ini erat kaitannya dengan ilmu kekuatan bahan (*spaningleer*). Ilmu ini mempelajari gaya-gaya yang timbul di dalam bahan (kayu, beton, dan baja). Gaya-gaya tersebut meliputi gaya tarik, tegangan geser, lenturan, puntiran, dan sebagainya. Pengetahuan tentang hal ini untuk mengetahui perubahan bentuk yang terjadi pada bahan karena adanya gaya-gaya tersebut.

## A. Pengertian Elastisitas

Semasa kecil Anda mungkin pernah bermain karet gelang, tanah liat, atau plastisin. Saat Anda menarik karet gelang, karet makin panjang. Jika tarikan dihilangkan, maka bentuk karet kembali seperti semula. Lain halnya dengan karet, tanah liat saat ditekan akan berubah bentuk. Jika tekanan dihilangkan, ternyata bentuk tanah liat tidak kembali seperti semula. Sifat sebuah benda yang dapat kembali ke bentuk semula disebut elastis. Benda-benda yang mempunyai elastisitas atau sifat elastis seperti karet gelang, pegas, dan plat logam disebut benda elastis. Untuk mengetahui lebih dalam tentang perilaku berbagai jenis benda dalam menanggapi gaya yang dikenainya, lakukanlah kegiatan berikut.



### Kegiatan 3.1

#### Elastisitas Bahan

##### A. Tujuan

Anda dapat mengetahui batas elastisitas suatu benda.

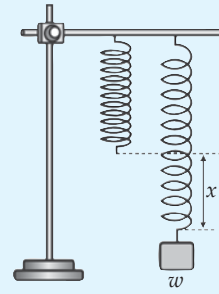
##### B. Alat dan Bahan

1. Pegas
2. Beban
3. Statif

##### C. Langkah Kerja

1. Buatlah sebuah pegas yang terbuat dari kawat tembaga!
2. Gantungkan pegas tersebut sehingga ujung lainnya tergantung bebas!

3. Pada ujung yang bebas tersebut berilah beban secara bergantian berturut-turut 50 g, 100 g, 150 g, 200 g, dan 250 g!
4. Catatlah pertambahan panjang pegas setiap pemberian beban!
5. Lakukanlah penambahan beban terus-menerus sampai pegas tidak elastis lagi!
6. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!

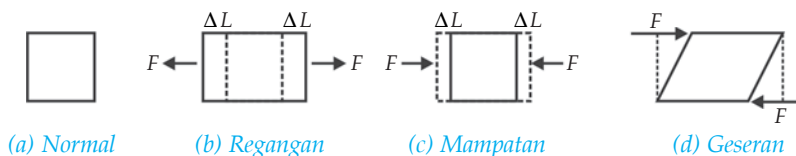


Berdasarkan pengalaman sehari-hari, bila Anda menarik karet gelang dengan simpangan yang kecil (karet gelang diberi gaya yang kecil), maka karet gelang dapat kembali ke bentuk semula. Namun, bila karet gelang ditarik dengan gaya yang besar, maka bentuknya tidak kembali seperti semula. Pada keadaan terakhir ini, karet gelang sudah tidak bersifat elastis. Jadi, sifat elastis zat padat memiliki batas tertentu. Pegas atau benda-benda lain yang dikenai gaya besar akan hilang sifat elastisitasnya. Gaya pada benda elastis akan menimbulkan tegangan, sehingga benda bertambah panjang.

## B. Tegangan, Regangan, dan Modulus Elastisitas

Benda yang dikenai gaya tertentu akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk bergantung pada arah dan letak gaya-gaya tersebut diberikan. Ada tiga jenis perubahan bentuk yaitu regangan, mampatan, dan geseran.

1. **Regangan.** Rengangan merupakan perubahan bentuk yang dialami sebuah benda jika dua buah gaya yang berlawanan arah (menjauhi pusat benda) dikenakan pada ujung-ujung benda. Perhatikan Gambar 3.1 (b)!
2. **Mampatan.** Mampatan adalah perubahan bentuk yang dialami sebuah benda jika dua buah gaya yang berlawanan arah (menuju pusat benda) dikenakan pada ujung-ujung benda. Perhatikan Gambar 3.1 (c)!
3. **Geseran.** Geseran adalah perubahan bentuk yang dialami sebuah benda jika dua buah gaya yang berlawanan arah dikenakan pada sisi-sisi bidang benda. Perhatikan Gambar 3.1 (d)!



**Gambar 3.1** Perubahan bentuk benda akibat pengaruh suatu gaya.

Tegangan (*stress*) pada benda, misalnya kawat besi, didefinisikan sebagai gaya persatuan luas penampang benda tersebut. Tegangan diberi simbol  $\sigma$  (dibaca sigma). Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

$F$  : besar gaya tekan/tarik (N)

$A$  : luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$\sigma$  : tegangan ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

Bila dua buah kawat dari bahan yang sama tetapi luas penampangnya berbeda diberi gaya, maka kedua kawat tersebut akan mengalami tegangan yang berbeda. Kawat dengan penampang kecil mengalami tegangan yang lebih besar dibandingkan kawat dengan penampang lebih besar. Tegangan benda sangat diperhitungkan dalam menentukan ukuran dan jenis bahan penyangga atau penopang suatu beban, misalnya penyangga jembatan gantung dan bangunan bertingkat.

Regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara penambahan panjang benda  $\Delta X$  terhadap panjang mula-mula  $X$ . Regangan dirumuskan sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X}$$

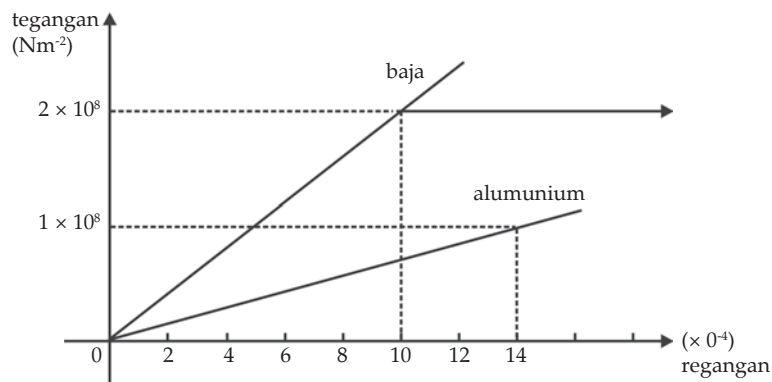
Keterangan:

$\varepsilon$  : regangan strain (tanpa satuan)

$\Delta X$  : pertambahan panjang (m)

$X$  : panjang mula-mula (m)

Makin besar tegangan pada sebuah benda, makin besar juga regangannya. Artinya,  $\Delta X$  juga makin besar. Berdasarkan berbagai percobaan di laboratorium, diperoleh hubungan antara tegangan dan regangan untuk baja dan aluminium seperti tampak pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Grafik perbandingan tegangan terhadap regangan untuk baja dan aluminium.



Berdasarkan grafik pada Gambar 3.2, untuk tegangan yang sama, misalnya  $1 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , regangan pada aluminium sudah mencapai 0,0014, sedangkan pada baja baru berkisar pada 0,00045. Jadi, baja lebih kuat dari aluminium. Itulah sebabnya baja banyak digunakan sebagai kerangka (otot) bangunan-bangunan besar seperti jembatan, gedung bertingkat, dan jalan layang.

Selama gaya  $F$  yang bekerja pada benda elastis tidak melampaui batas elastisitasnya, maka perbandingan antara tegangan ( $\sigma$ ) dengan regangan ( $\epsilon$ ) adalah konstan. Bilangan (konstanta) tersebut dinamakan modulus elastis atau modulus Young ( $E$ ). Jadi, modulus elastis atau modulus Young merupakan perbandingan antara tegangan dengan regangan yang dialami oleh suatu benda. Secara matematis ditulis seperti berikut.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta X}{X}} = \frac{FX}{A\Delta X}$$

Keterangan:

$E$  : modulus Young ( $\text{N/m}^2$  atau Pascall)

Nilai modulus Young untuk beberapa jenis bahan ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut.

**Tabel 3 Modulus Young Beberapa Jenis Bahan**

Bahan	Modulus Young (Pa)
Aluminium	$7 \times 10^{10}$
Baja	$20 \times 10^{10}$
Besi	$21 \times 10^{10}$
Karet	$0,05 \times 10^{10}$
Kuningan	$9 \times 10^{10}$
Nikel	$21 \times 10^{10}$
Tembaga	$11 \times 10^{10}$
Timah	$1,6 \times 10^{10}$
Beton	$2,3 \times 10^{10}$
Kaca	$5,5 \times 10^{10}$
Wolfram	$41 \times 10^{10}$

Sumber: Fisika, Kane & Sterheim, 1991.

### Contoh 3.1

Seutas kawat mempunyai luas penampang  $4 \text{ mm}^2$ . Kawat tersebut diregangkan oleh gaya sebesar  $3,2 \text{ N}$  sehingga bertambah panjang  $0,03 \text{ cm}$ . Jika diketahui panjang kawat mula-mula  $60 \text{ cm}$ , maka hitunglah tegangan kawat, regangan kawat, dan modulus Young kawat tersebut!

Diketahui : a.  $A = 4 \text{ mm}^2 = 4 \times 10^{-6} \text{ m}^2$   
b.  $F = 3,2 \text{ N}$   
c.  $\Delta X = 0,03 \text{ cm}$   
d.  $X = 60 \text{ cm}$

Ditanyakan: a.  $\sigma = \dots?$   
b.  $\varepsilon = \dots?$   
c.  $E = \dots?$

Jawab:

a. Tegangan ( $\sigma$ )

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} \\ &= \frac{3,2}{4 \times 10^{-6}} \\ &= 0,8 \times 10^6 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

Jadi, tegangan kawat adalah  $0,8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ .

b. Regangan ( $\varepsilon$ )

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\Delta X}{X} \\ &= \frac{0,30}{60} \\ &= 5 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

Jadi, regangan kawat adalah  $5 \times 10^{-4}$ .

c. Modulus Young ( $E$ )

$$\begin{aligned}E &= \frac{\sigma}{\varepsilon} \\ &= \frac{0,8 \times 10^6}{5 \times 10^{-4}} \\ &= 1,6 \times 10^9 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

Jadi, modulus Young kawat tersebut adalah  $1,6 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ .

### Soal Kompetensi 3.1

1. Jelaskan yang dimaksud bahan elastis sempurna, bahan tidak elastis, dan modulus elatisitas!
2. Modulus elastisitas dari bahan kuningan  $9 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ , apakah artinya?
3. Hasil percobaan untuk menentukan hubungan antara gaya dan pertambahan panjang suatu bahan elastis diberikan dalam tabel di bawah ini.

Gaya (N)	0	1	2	3	4	5	6
Pertambahan Panjang (cm)	0	35	75	115	15,5	13,5	20

Berdasarkan tabel di atas, buatlah grafik gaya terhadap pertambahan panjang, hitunglah batas elastis bahan pada grafik, dan tentukan tetapan pegas bahan elastis tersebut!

4. Sebuah pegas yang digantungkan vertikal panjangnya 15 cm. Ketika pegas diregangkan oleh gaya 0,75 N. Panjang pegas menjadi 30 cm. Berapa panjang pegas jika diregangkan oleh gaya sebesar 1 N?
5. Seutas kawat baja yang digunakan untuk menyangga jembatan gantung mampu menahan tegangan beban sampai  $1,61 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$ . Berapakah luas penampang minimum dari kawat tersebut, bila beban dengan massa  $2,0 \times 10^5 \text{ kg}$  melewati jembatan?

## C. Hukum Hooke

Suatu benda yang dikenai gaya akan mengalami perubahan bentuk (volume dan ukuran). Misalnya suatu pegas akan bertambah panjang dari ukuran semula, apabila dikenai gaya sampai batas tertentu. Perhatikan Gambar 3.3 berikut! Pemberian gaya sebesar  $F$  akan mengakibatkan pegas bertambah panjang sebesar  $\Delta X$ . Besar gaya  $F$  berbanding lurus dengan  $\Delta X$ . Secara matematis dirumuskan dengan persamaan berikut.

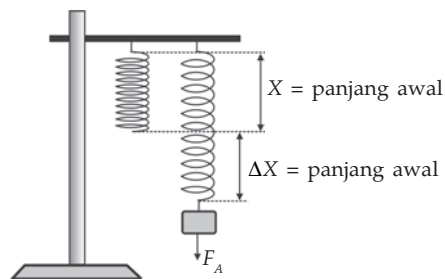
$$F = k \Delta X$$

Keterangan:

$F$  : gaya yang dikerjakan pada pegas (N)

$\Delta X$  : penambahan panjang pegas (m)

$k$  : konstanta pegas (N/m)



Gambar 3.3 Skema pertambahan panjang pada pegas.

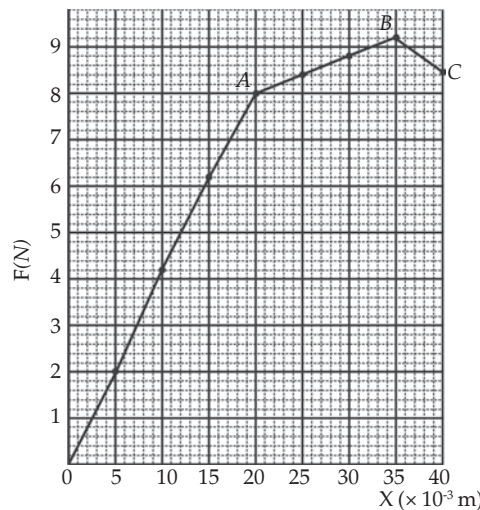
Persamaan di atas dapat dinyatakan dengan kata-kata sebagai berikut. “Jika gaya tarik tidak melampaui batas elastisitas pegas, maka pertambahan panjang pegas berbanding lurus (sebanding) dengan gaya tariknya. Pernyataan tersebut dikemukakan pertama kali oleh Robert Hooke, seorang arsitek yang ditugaskan untuk membangun kembali gedung-gedung di London yang mengalami kebakaran pada tahun 1666. Oleh karena itu, pernyataan di atas dikenal sebagai hukum Hooke. Hubungan antara Hukum Hooke dengan modulus Young adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{F}{A\Delta X} \Rightarrow F = \frac{EA}{X}\Delta X = k\Delta X$$

Hubungan antara tetapan/konstanta gaya ( $k$ ) dengan modulus Young ( $E$ ), dituliskan sebagai berikut.

$$k = \frac{EA}{X}$$

Sifat pegas seperti yang dinyatakan oleh hukum Hooke tidak terbatas pada pegas yang diregangkan. Pada pegas yang dimampatkan juga berlaku Hukum Hooke, selama pegas masih pada daerah elastisitas. Sifat pegas seperti itu banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari, misalnya pada neraca pegas, bagian-bagian tertentu mesin, dan peredam kejut pada kendaraan bermotor.



Sumber: Fisika, Kane & Sterheim, 1991.

**Gambar 3.4** Grafik pertambahan panjang kawat terhadap berat beban.

Grafik pada Gambar 3.4 menunjukkan gaya terhadap penambahan panjang untuk seutas kawat aluminium yang panjangnya 2 m dan luas penampangnya  $1 \text{ mm}^2$ . Titik *A* disebut batas elastisitas, penambahan panjang sebanding dengan gaya tarik. Daerah *OA* disebut daerah elastis, dan berlaku hukum Hooke. Pada daerah *OA*, jika gaya tarik dihilangkan, maka kawat akan kembali ke bentuk awalnya.

Jika kawat terus ditarik hingga melampaui batas elastisitas *A*, maka kawat akan memasuki daerah plastik (daerah *AC*). Pada daerah ini pertambahan panjang tidak lagi berbanding lurus dengan gaya tarik, yang berarti hukum Hooke tidak berlaku. Jika gaya tarik dihilangkan, maka kawat tidak kembali ke bentuk semula. Gaya maksimum yang dapat diberikan pada kawat tanpa mematahkannya terjadi di titik *B* atau disebut titik tekuk. Saat mencapai titik *C*, bahan akan patah atau putus. Oleh karena itu, titik *C* disebut titik patah (*breaking point*).



### Kegiatan 3.2

#### Hukum Hooke

##### A. Tujuan

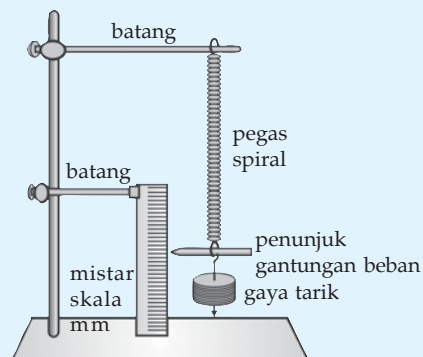
Anda dapat menyelidiki hubungan antara gaya dengan pertambahan panjang pegas.

##### B. Alat dan Bahan

1. Mistar
2. Pegas spiral
3. Beban
4. Statip

##### C. Langkah Kerja

1. Pasanglah sebuah pegas spiral dan mistar pada susunan statip seperti ditunjukkan gambar di samping!
2. Gantungkan sebuah beban di ujung pegas, kemudian amati pertambahan panjangnya!
3. Masukkan data pengamatan dalam tabel seperti tabel berikut!



**Tabel Hasil Pengamatan**

Massa Beban	Gaya Tarik $F = m g \text{ (N)}$	Panjang Pegas $X \text{ (cm)}$	Pertambahan Panjang $\Delta X$	$\frac{F}{\Delta X}$

4. Ulangi langkah 2 sampai 3 dengan menambah berat beban!
5. Ulangi langkah 1 – 4 dengan pegas yang berbeda!
6. Buatlah grafik hasil pengamatan!

**Pertanyaan:**

1. Apa yang terjadi jika pegas diberi beban?
2. Mengapa pegas dapat bertambah panjang?
3. Apa yang terjadi jika pegas yang telah diberi beban, kemudian beban diambil lagi?
4. Bagaimana cara menentukan konstanta pegas?
5. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!

**T o k o h**

**Robert Hooke  
(1635 – 1703)**

Robert Hooke dilahirkan dipulau Wight. Ia sudah menjadi yatim pada usia 13 tahun. Ketika masih muda, Hooke bekerja sebagai pramusaji dan menggunakan uangnya untuk kuliah di Oxford University. Pada tahun 1655, Hooke membantu Robert Boyle dalam menemukan pompa udara.

Di Royal Society, Hooke bekerja sebagai kurator berbagai eksperimen. Ia mendemonstrasikan ide-ide baru yang menarik kepada para anggota Royal Society setiap minggunya. Selain itu, Hooke juga seorang arsitek yang terkenal di zamannya.

Hooke paling dikenang karena hukum elastisitas-nya. Hukum ini menyatakan bahwa sejauh mana suatu benda padat itu menjadi tidak karuan bentuknya berbanding lurus dengan gaya yang diberlakukan terhadapnya. Timbangan pegas untuk menimbang hasil bumi di pasar swalayan menggunakan prinsip ini.

Banyak ilmuwan yang mengakui kontribusi Hooke dalam temuannya. Misalnya, Newton, Halley, dan Robert Boyle. Hooke meninggal dunia setelah melakukan ribuan kali eksperimen dalam hidupnya.

(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)

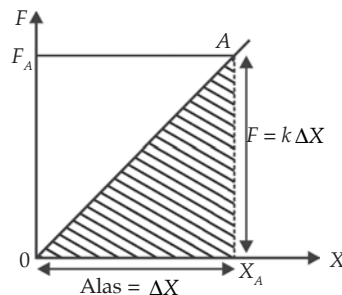
## Kolom Diskusi

Diskusikan dengan teman sebangku Anda mengenai kelelahan (*fatigue*) yang dapat dialami sebatang logam. Diskusikan mengapa hal tersebut bisa terjadi, apa akibat buruknya, sebutkan contoh alat yang mengalami masalah ini, dan bagaimana cara mengatasinya. Mintalah kepada guru Anda agar memilih salah satu kelompok diskusi mempresentasikan hasil diskusinya. Buatlah kesimpulan setelah presentasi selesai dan kumpulkan dimeja guru Anda!

## 1. Energi Potensial Elastisitas

Apakah Anda punya ketapel? Cobalah tarik ketapel Anda dan rasakan adanya tenaga tarikan yang melawan gaya tarikan tangan Anda. Jika gaya tarikan tangan dilepas, maka ketapel akan melemparkan benda yang ditaruh di dalam sarungnya. Tenaga apa yang sebenarnya dimiliki ketapel? Untuk mengetahuinya pelajailah bahasan berikut dengan saksama.

Di SMP Anda telah mempelajari bahwa usaha dapat dihitung sebagai luas daerah di bawah grafik gaya  $F$  dan perpindahan  $s$ . Menggunakan cara yang sama, usaha yang dilakukan untuk menarik pegas juga dapat dihitung sebagai luas daerah di bawah grafik gaya  $F$  dan pertambahan panjang pegas  $\Delta X$ . Perhatikan Gambar 3.5 berikut!



Gambar 3.5 Grafik antara gaya yang bekerja sebesar  $F$  dan pertambahan panjang pegas  $\Delta X$ .

Anda dapat menghitung luas daerah yang diarsir (luas segitiga) pada Gambar 3.5 sebagai berikut.

$$W = \frac{1}{2} F \Delta X$$

Karena  $F = k \Delta X$ , maka

$$W = \frac{1}{2} k \Delta X \times \Delta X$$

$$W = \frac{1}{2} k \Delta X^2$$

Seluruh usaha ( $W$ ) yang dilakukan oleh gaya  $F$  tersimpan menjadi energi potensial elastis pegas karena tidak terjadi perubahan energi kinetik pegas. Oleh karena itu, sebuah pegas yang memiliki konstanta pegas  $k$  dan terentang sejauh  $\Delta X$  dari keadaan setimbangnya, memiliki energi potensial elastis sebesar  $E_p$ .

$$E_p = \frac{1}{2} k \Delta X^2$$

Contoh penggunaan gaya pegas adalah ketapel. Jika ketapel diregangkan, kemudian dilepaskan, ketapel dapat melontarkan batu. Dalam hal ini, energi potensial elastis berubah menjadi energi kinetik batu.

$$E_{p(\text{ketapel})} = E_{k(\text{batu})}$$

$$\frac{1}{2} k \Delta X^2 = \frac{1}{2} m v^2$$

Keterangan:

$k$  : konstanta pegas karet ketapel (N/m)

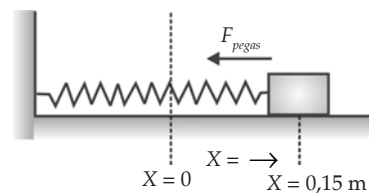
$\Delta X$  : pertambahan panjang karet (m)

$m$  : massa benda (kg)

$v$  : kecepatan benda (m/s)

### Contoh 3.2

Sebuah balok dihubungkan dengan sebuah pegas yang memiliki tetapan  $k = 2.200 \text{ Nm}^{-1}$ . Balok bergerak di atas bidang datar tanpa gesekan. Tentukan usaha yang dilakukan oleh pegas, jika balok bergeser 0,15 m dari kedudukan semula!





Diketahui : a.  $k = 2.200 \text{ Nm}^{-1}$

b.  $\Delta X = 0,15 \text{ m}$

Ditanyakan :  $W = \dots?$

Jawab:

$$W = -\frac{1}{2}k \Delta X^2$$

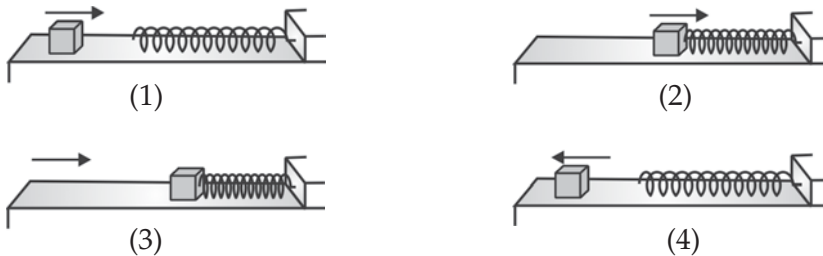
$$= -\frac{1}{2}(2.200)(0,15)^2$$

$$= -24,75 \text{ J} \text{ (tanda negatif menunjukkan arah gaya pegas berlawanan dengan arah pergeseran)}$$

## 2. Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada Sistem Pegas

Apabila pegas tidak ditarik ataupun ditekan, besar energi potensial elastisitasnya nol  $E_p = 0$ . Hal ini dikarenakan pegas tidak mengalami perubahan panjang ( $\Delta X = 0$ ). Sesuai dengan persamaan energi potensial

pegas  $E_p = \frac{1}{2}k\Delta X^2$ , besar energi potensial pegas mencapai maksimum jika perubahan panjangnya maksimum. Sebaliknya, jika perubahan panjangnya minimum, maka besar energi potensial mencapai harga minimum.



Gambar 3.6 Sistem pegas.

Perhatikan Gambar 3.6! Misalnya, sebuah balok yang massanya  $m$  bergerak dengan kecepatan  $v_1$  dan menumbuk sebuah pegas. Sesuai dengan hukum kekekalan energi mekanik, maka jumlah energi mekanik sebelum bertumbukan sama dengan jumlah energi mekanik setelah bertumbukan. Secara matematis dituliskan seperti berikut.

$$\begin{aligned} E_{M \text{ awal}} &= E_{M \text{ akhir}} \\ E_{M \text{ balok}} + E_{M \text{ pegas}} &= E'_{M \text{ awal}} + E'_{M \text{ akhir}} \\ E_{kb} + E_{pb} + E_{pp} &= E'_{kb} + E'_{pb} + E'_{pp} \end{aligned}$$

Apabila gaya gesekan memengaruhi sistem, maka besar usaha yang dilakukan oleh gaya gesekan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$W_{\text{gesekan}} = (E'_{\text{kb}} + E'_{\text{pb}} + E'_{\text{pp}}) - (E_{\text{kb}} + E_{\text{pb}} + E_{\text{pp}})$$

Keterangan:

- $E_{\text{kb}}$  : energi kinetik benda sebelum tumbukan
- $E_{\text{pb}}$  : energi potensial benda sebelum tumbukan
- $E_{\text{pp}}$  : energi potensial pegas sebelum tumbukan
- $E'_{\text{kb}}$  : energi kinetik benda setelah tumbukan
- $E'_{\text{pb}}$  : energi potensial benda setelah tumbukan
- $E'_{\text{pp}}$  : energi potensial pegas setelah tumbukan

### Contoh 3.3

Sebuah balok massanya 1.200 gram bergerak dengan kecepatan 50 cm/s pada sebuah papan luncur yang licin. Pada ujung papan terdapat sebuah pegas  $k = 30 \text{ N/m}$ . Apabila papan menumbuk pegas, maka hitunglah perubahan panjang maksimum pegas akibat tertekan balok!

- Diketahui :
- a.  $m = 1.200 \text{ g} = 1,2 \text{ kg}$
  - b.  $v = 50 \text{ cm/s} = 0,5 \text{ m/s}$
  - c.  $k = 30 \text{ N/m}$

Ditanyakan :  $\Delta X = \dots?$

Jawab:

$$E_{\text{kb}} + E_{\text{pb}} + E_{\text{pp}} = E'_{\text{kb}} + E'_{\text{pb}} + E'_{\text{pp}}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + 0 + 0 = 0 + 0 + \frac{1}{2}k\Delta X^2$$

$$\Delta X^2 = \frac{mv^2}{k}$$

$$\Delta X = v\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$= 0,5\sqrt{\frac{12}{30}}$$

$$= 0,1 \text{ m}$$

$$= 10 \text{ cm}$$

Jadi, perubahan panjang maksimum pegas akibat tertekan balok adalah 10 cm.

### 3. Susunan Pegas

Dua buah pegas atau lebih dapat disusun seri, paralel, atau gabungan seri dan paralel. Susunan pegas dapat diganti dengan sebuah pegas pengganti. Berikut hal-hal yang berkaitan dengan pegas pengganti dari susunan pegas seri dan paralel.

#### a. Susunan Seri

Untuk memudahkan pembahasan, diambil pegas-pegas yang tetapan pegasnya sama. Rumus dasar yang digunakan adalah rumus modulus Young dan Hukum Hooke ( $k = \frac{EA}{X}$ ). Jadi, tetapan pegas berbanding lurus dengan luas penampang pegas  $A$ , modulus Young  $E$ , dan berbanding terbalik dengan panjang pegas  $X$ . Persamaan ini menyatakan tetapan pegas tunggal. Jika dua buah pegas disusun secara seri seperti terlihat pada Gambar 3.7, maka panjang pegas menjadi  $2X$ . Oleh karena itu, persamaan pegasnya ( $k_s$ ) menjadi seperti berikut.

$$k_s = \frac{EA}{2X} = \frac{1}{2} \left( \frac{EA}{X} \right) = \frac{1}{2} k$$

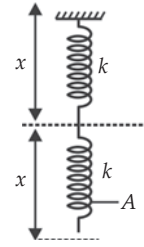
Jadi, bila 2 pegas yang tetapan pegasnya sama dirangkakan secara seri, maka susunan ini akan memberi tetapan pegas susunan sebesar  $\frac{1}{2} k$ . Sedangkan untuk  $n$  pegas yang tetapannya sama dan disusun seri, maka berlaku persamaan berikut

$$k_s = \frac{k}{n}$$

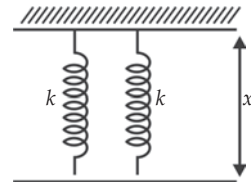
#### b. Susunan Paralel

Bila pegas disusun paralel, maka panjang pegas ( $X$ ) tetap. Sedangkan luas penampang pegas berubah dari  $A$  menjadi  $2A$ , bila pegas yang disusun sebanyak dua buah. Jadi, untuk dua buah pegas yang disusun secara paralel, tetapan pegasnya ( $k_p$ ) menjadi seperti berikut.

$$k_p = \frac{E(2A)}{X} = 2 \left( \frac{EA}{X} \right) = 2k$$



Gambar 3.7 Pegas disusun seri.



Gambar 3.8 Pegas disusun paralel.

Bila ada  $n$  pegas yang tetapan pegasnya sama disusun secara paralel, maka akan menghasilkan pegas yang lebih kuat. Karena tetapan pegasnya menjadi lebih besar.

$$k_p = nk$$

### Contoh 3.4

1. Dua buah pegas yang disusun paralel berturut-turut mempunyai konstanta sebesar 200 N/m dan 300 N/m. Jika diujungnya diberi beban sebesar 4 kg dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah pertambahan panjang pegas!

Diketahui :

- a.  $k_1 = 200 \text{ N/m}$
- b.  $k_2 = 300 \text{ N/m}$
- c.  $m = 4 \text{ kg}$
- d.  $g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan:  $\Delta X = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} k_p &= k_1 + k_2 \\ &= 200 + 300 \\ &= 500 \text{ N/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= k_p \times \Delta X \Rightarrow \Delta X = \frac{F}{k_p} \\ &= \frac{4 \times 10}{500} \\ &= 0,08 \text{ m} \\ &= 8 \text{ cm} \end{aligned}$$

2. Dua buah pegas yang disusun secara seri berturut-turut besar konstantanya 200 N/m dan 100 N/m. Apabila pada pegas tersebut diberi beban 40 N, hitunglah pertambahan panjang pegas!

Diketahui :

- a.  $k_1 = 200 \text{ N/m}$
- b.  $k_2 = 100 \text{ N/m}$
- c.  $F = 40 \text{ N}$

Ditanyakan:  $\Delta X = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_s} &= \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \\ &= \frac{1}{200} + \frac{1}{100} \\ &= \frac{3}{200} \end{aligned}$$

$$k_s = \frac{200}{3}$$

$$\begin{aligned} F &= k_s \Delta X \Rightarrow \Delta X = \frac{F}{k_s} \\ &= \frac{40}{\frac{200}{3}} \\ &= \frac{3}{5} \text{ m} \\ &= 60 \text{ cm} \end{aligned}$$

#### 4. Penerapan Sifat Elastis Bahan

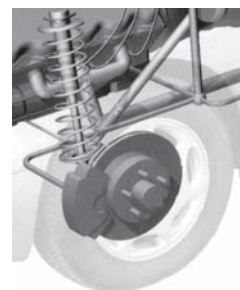
Dalam kehidupan sehari-hari, alat yang menerapkan sifat elastis bahan banyak dijumpai. Misalnya, pada mainan anak-anak seperti pistol-pistolan, mobil-mobilan, dan ketapel; perlengkapan rumah tangga seperti kursi sudut dan *spring-bed*. Di sini akan dikemukakan beberapa contoh pemanfaatan peranan sifat elastis bahan.

##### a. Alat Ukur Gaya Tarik Kereta Api

Alat ini dilengkapi dengan sejumlah pegas yang disusun sejajar. Pegas-pegas ini dihubungkan ke gerbong kereta api saat kereta akan bergerak. Hal ini dilakukan untuk diukur gaya tarik kereta api sesaat sebelum meninggalkan stasiun.

##### b. Peredam Getaran atau Guncangan Pada Mobil

Penyangga badan mobil selalu dilengkapi pegas yang kuat sehingga guncangan yang terjadi pada saat mobil melewati jalan yang tidak rata dapat diredam. Dengan demikian, keseimbangan mobil dapat dikendalikan.



Sumber: Kamus Visual

##### c. Peranan Sifat Elastis dalam Rancang Bangun

Untuk menentukan jenis logam yang akan digunakan dalam membangun sebuah jembatan, pesawat, rumah, dan sebagainya maka modulus Young, tetapan pegas, dan sifat elastis, logam secara umum harus diperhitungkan.

Gambar 3.9 Peredam getaran pada mobil.



Sumber: CD Clipart

**Gambar 3.10** Pengetahuan mengenai modulus Young bahan sangat penting dalam membuat berbagai bangunan.

#### d. Contoh-Contoh Pemanfaatan Sifat Elastis dalam Olahraga

Di bidang olahraga, sifat elastis bahan diterapkan, antara lain, pada papan luncuran pada cabang olah raga loncat indah dan tali busur pada olahraga panahan. Karena adanya papan yang memberikan gaya Hooke pada atlit, maka atlit dapat meloncat lebih tinggi daripada tanpa papan. Sedangkan tali busur memberikan gaya pegas pada busur dan anak panah.

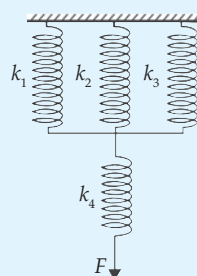


Sumber: Kamus Visual

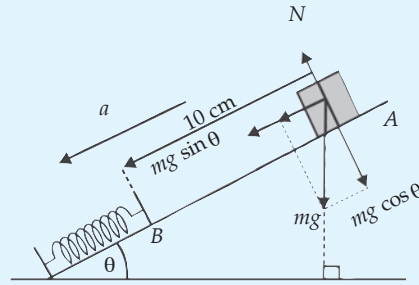
**Gambar 3.11** Pemanfaatan bahan elastis pada olahraga.

### Soal Kompetensi 3.2

1. Berdasarkan hukum Hooke, jelaskan makna bertambahnya panjang batang ( $\Delta X$ ) berbanding lurus dengan gaya  $F$ , berbanding lurus dengan panjang mula-mula ( $X$ ), dan berbanding terbalik dengan luas penampang batang ( $A$ )!
2. Perhatikan gambar disamping! 4 buah pegas identik mempunyai konstanta masing-masing  $k_1 = 200 \text{ Nm}^{-1}$ ,  $k_2 = 400 \text{ Nm}^{-1}$ ,  $k_3 = 200 \text{ Nm}^{-1}$ , dan  $k_4 = 200 \text{ Nm}^{-1}$ . Jika pada susunan pegas tersebut diberi beban sebesar 580 N, maka hitunglah konstanta pegas susunan dan pertambahan panjang susunan pegas!



3. Di dalam sebuah lift tergantung sebuah pegas yang konstantanya  $500 \text{ Nm}^{-1}$ . Ujung bagian bawah pegas tersebut digantungi beban yang massanya  $2,5 \text{ kg}$  ( $g = 10 \text{ ms}^{-2}$ ). Hitunglah pertambahan panjang pegas jika lift diam dan pertambahan panjang pegas jika lift bergerak ke bawah dengan percepatan  $2 \text{ ms}^{-2}$ !
4. Balok A yang bermassa  $2 \text{ kg}$  menggelincir dari atas sebuah bidang miring yang sudut miringnya  $30^\circ$ . Balok tersebut menumbuk pegas yang terletak  $10 \text{ m}$  dari posisi semula. Jika koefisien gesekan antara balok A dengan bidang miring  $0,2$ . Hitunglah berapa jauh pegas tertekan, jika konstanta pegas  $100 \text{ N/m}$ !

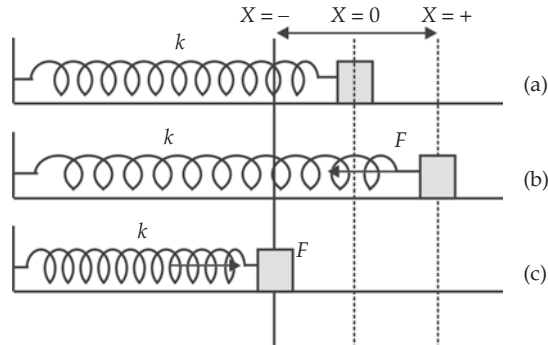


## D. Getaran Harmonik

Pernahkan Anda mengamati apa yang terjadi ketika senar gitar dipetik lalu dilepaskan? Anda akan melihat suatu gerak bolak-balik melewati lintasan yang sama. Gerakan seperti ini dinamakan gerak periodik. Contoh lain gerak periodik adalah gerakan bumi mengelilingi matahari (revolusi bumi), gerakan bulan mengelilingi bumi, gerakan benda yang tergantung pada sebuah pegas, dan gerakan sebuah bandul. Di antara gerak periodik ini ada gerakan yang dinamakan gerak harmonik.

Gerak harmonik merupakan gerak sebuah benda dimana grafik posisi partikel sebagai fungsi waktu berupa sinus (dapat dinyatakan dalam bentuk sinus atau kosinus). Gerak semacam ini disebut gerak osilasi atau getaran harmonik. Contoh lain sistem yang melakukan getaran harmonik, antara lain, dawai pada alat musik, gelombang radio, arus listrik AC, dan denyut jantung. Galileo di duga telah mempergunakan denyut jantungnya untuk pengukuran waktu dalam pengamatan gerak.

Untuk memahami getaran harmonik, Anda dapat mengamati gerakan sebuah benda yang diletakkan pada lantai licin dan diikatkan pada sebuah pegas (Gambar 3.12). Anggap mula-mula benda berada pada posisi  $X = 0$  sehingga pegas tidak tertekan atau teregang. Posisi seperti ini dinamakan posisi keseimbangan. Ketika benda ditekan ke kiri ( $X = -$ ) pegas akan mendorong benda ke kanan, menuju posisi keseimbangan. Sebaliknya jika benda ditarik ke kanan, pegas akan menarik benda kembali ke arah posisi keseimbangan ( $X = +$ ).



**Gambar 3.12** Gerak benda pada lantai licin dan terikat pada pegas untuk posisi normal (a), teregang (b), dan tertekan (c).

Gaya yang dilakukan pegas untuk mengembalikan benda pada posisi keseimbangan disebut *gaya pemulih*. Besarnya gaya pemulih menurut Robert Hooke dirumuskan sebagai berikut.

$$F_p = -kX$$

Tanda minus menunjukkan bahwa gaya pemulih selalu pada arah yang berlawanan dengan simpangannya. Jika Anda gabungkan persamaan di atas dengan hukum II Newton, maka diperoleh persamaan berikut.

$$F_p = -kX = ma$$

atau

$$a = -\left(\frac{k}{m}\right)X$$

Terlihat bahwa percepatan berbanding lurus dan arahnya berlawanan dengan simpangan. Hal ini merupakan karakteristik umum getaran harmonik. Syarat suatu gerak dikatakan getaran harmonik, antara lain:

1. Gerakannya periodik (bolak-balik).
2. Gerakannya selalu melewati posisi keseimbangan.
3. Percepatan atau gaya yang bekerja pada benda sebanding dengan posisi/simpangan benda.
4. Arah percepatan atau gaya yang bekerja pada benda selalu mengarah ke posisi keseimbangan.

## 1. Periode dan Frekuensi Getaran Harmonik

### a. Periode dan Frekuensi Sistem Pegas

Anda telah mempelajari gerak melingkar beraturan di kelas X. Pada dasarnya, gerak harmonik merupakan gerak melingkar beraturan pada salah satu sumbu utama. Oleh karena itu, periode dan frekuensi pada pegas



dapat dihitung dengan menyamakan antara gaya pemulih ( $F = -kX$ ) dan gaya sentripetal ( $F = -4\pi^2 mf^2X$ ).

$$-4\pi^2 mf^2X = -kX$$

$$4\pi^2 mf^2 = k$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ atau } T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Periode dan frekuensi sistem beban pegas hanya bergantung pada massa dan konstanta gaya pegas.

### Contoh 3.5

Jika massa beban yang digantung pada ujung bawah pegas 1 kg, maka periode getarannya 3 sekon. Jika massa beban dilipatkan menjadi 4 kg, maka tentukan periode getarannya!

Diketahui : a.  $m_1 = 1 \text{ kg}$

b.  $T_1 = 3 \text{ s}$

c.  $m_2 = 4 \text{ kg}$

Ditanyakan:  $T_2 = \dots?$

Jawab:

Hubungan periode pegas  $T$ , massa beban  $m$  dinyatakan dengan rumus:

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \frac{2\pi \sqrt{\frac{m_2}{k}}}{2\pi \sqrt{\frac{m_1}{k}}} \Rightarrow T_2 = T_1 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \\ &= 3 \sqrt{\frac{4}{1}} \\ &= 6 \text{ s} \end{aligned}$$

### b. Periode dan Frekuensi Bandul Sederhana

Sebuah bandul sederhana terdiri atas sebuah beban bermassa  $m$  yang digantung di ujung tali ringan (massanya dapat diabaikan) yang panjangnya  $l$ . Jika beban ditarik ke satu sisi dan dilepaskan, maka beban berayun melalui titik keseimbangan menuju ke sisi yang lain. Jika amplitudo ayunan kecil, maka bandul melakukan getaran harmonik. Periode dan frekuensi getaran pada bandul sederhana sama seperti pada pegas. Artinya, periode dan frekuensinya dapat dihitung dengan menyamakan gaya pemulih dan gaya sentripetal.

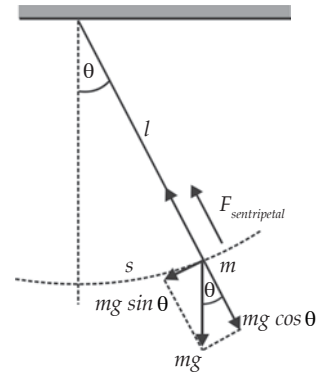
Persamaan gaya pemulih pada bandul sederhana adalah  $F = -mg \sin \theta$ . Untuk sudut  $\theta$  kecil ( $\theta$  dalam satuan radian), maka  $\sin \theta = \theta$ . Oleh karena itu persamaannya dapat ditulis  $F = -mg \left(\frac{x}{l}\right)$ . Karena persamaan gaya sentripetal adalah  $F = -4\pi^2 m f^2 x$ , maka Anda peroleh persamaan sebagai berikut.

$$-4\pi^2 m f^2 x = -mg \left(\frac{x}{l}\right)$$

$$4\pi^2 f^2 = \frac{g}{l}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \text{ atau } T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Periode dan frekuensi bandul sederhana tidak bergantung pada massa dan simpangan bandul, tetapi hanya bergantung pada panjang tali dan percepatan gravitasi setempat.



Gambar 3.13 Gaya yang bekerja pada bandul sederhana.

### Contoh 3.6

Sebuah ayunan bandul sederhana memiliki panjang tali 64 cm, massa beban 0,1 kg. Saat beban diberi simpangan 10 cm dan dilepaskan, terjadi getaran selaras ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Hitunglah periode ayunan dan kecepatan maksimum benda tersebut!

Diketahui : a.  $l = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$   
 b.  $m = 0,1 \text{ kg}$   
 c.  $A = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$   
 d.  $g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan : a.  $T = \dots?$   
 b.  $v_{\text{maks}} = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \text{a. } T &= 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{0,64}{10}} \end{aligned}$$

$$= 2\pi \times 0,8 \sqrt{\frac{1}{10}}$$

$$= 2\pi \times 0,8 \times \frac{1}{10} \sqrt{10}$$

$$= 0,16\pi \sqrt{10} \text{ s}$$

$$\text{b. } v = v_{\text{maks}} \cos \omega t = \omega A \cos \omega t$$

$$v_{\text{maks}} = \frac{2\pi}{T} A$$

$$= \frac{2\pi}{0,16\pi \sqrt{10}} \times 0,1$$

$$= \frac{0,2}{0,16\sqrt{10}}$$

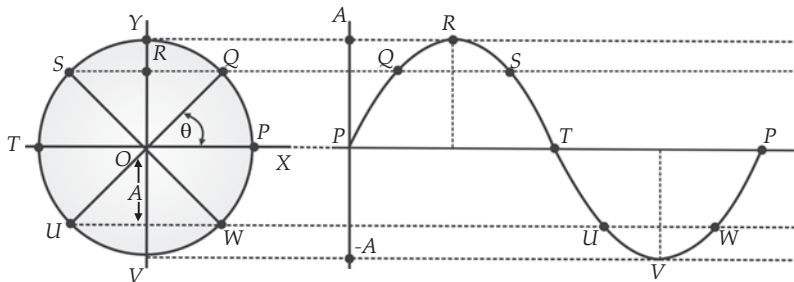
$$= 1,25 \sqrt{10} \text{ m/s}$$

## 2. Persamaan Getaran Harmonik

Persamaan getaran harmonik diperoleh dengan memproyeksikan gerak melingkar terhadap sumbu untuk titik yang bergerak beraturan.

### a. Simpangan Getaran Harmonik

Simpangan getaran harmonik sederhana dapat dianggap sebagai proyeksi partikel yang bergerak melingkar beraturan pada diameter lingkaran. Gambar 3.14 melukiskan sebuah partikel yang bergerak melingkar beraturan dengan kecepatan sudut  $\omega$  dan jari-jari  $A$ . Anggap mula-mula partikel berada di titik  $P$ .



*Gambar 3.14 Proyeksi gerak melingkar beraturan terhadap sumbu Y merupakan getaran harmonik sederhana.*

Perhatikan Gambar 3.14! Setelah selang waktu  $t$  partikel berada di titik  $Q$  dan sudut yang ditempuh adalah  $\theta = \omega t = \frac{2\pi t}{T}$ . Proyeksi titik  $Q$  terhadap diameter lingkaran (sumbu  $Y$ ) adalah titik  $Qy$ . Jika garis  $OQy$  Anda sebut  $y$  yang merupakan simpangan gerak harmonik sederhana, maka Anda peroleh persamaan sebagai berikut.

$$Y = A \sin \theta = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi t}{T}$$

Besar sudut dalam fungsi sinus ( $\theta$ ) disebut *sudut fase*. Jika partikel mula-mula berada pada posisi sudut  $\theta_0$ , maka persamaanya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Y = A \sin \theta = A \sin(\omega t + \theta_0) = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \theta_0\right)$$

Sudut fase getaran harmoniknya adalah sebagai berikut.

$$\theta = (\omega t + \theta_0) = \left(\frac{2\pi t}{T} + \theta_0\right) \text{ atau } \theta = 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi}\right) = 2\pi\Phi$$

Karena  $\Phi$  disebut fase, maka fase getaran harmonik adalah sebagai berikut.

$$\Phi = \frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi}$$

Apabila sebuah benda bergetar harmonik mulai dari  $t = t_1$  hingga  $t = t_2$ , maka beda fase benda tersebut adalah sebagai berikut.

$$\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \frac{t_2 - t_1}{T} = \frac{\Delta t}{T}$$

Beda fase dalam getaran harmonik dinyatakan dengan nilai mulai dari nol sampai dengan satu. Bilangan bulat dalam beda fase dapat dihilangkan, misalnya beda fase  $2\frac{1}{4}$  ditulis sebagai beda fase  $\frac{1}{4}$ .

### Contoh 3.7

Sebuah benda melakukan gerak sederhana dengan periode  $T$ . Berapakah waktu yang diperlukan benda agar simpangan sama dengan  $\frac{1}{2}$  amplitudonya?

Jawab:

$$Y = A \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$\frac{1}{2}A = A \sin(\omega t + \theta_0)$$

Bila  $\theta_0 = 0$ , maka

$$\sin \omega t = \frac{1}{2}$$

$$\omega t = \frac{1}{6}\pi$$

$$\frac{2\pi t}{T} = \frac{1}{6}\pi$$

$$t = \frac{1}{12}T$$

### b. Kecepatan Getaran Harmonik

Kecepatan benda yang bergerak harmonik sederhana dapat diperoleh dari turunan pertama persamaan simpangan.

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt}(A \sin(\omega t + \theta_0))$$

$$v_y = \omega A \cos(\omega t + \theta_0)$$

Mengingat nilai maksimum dari fungsi cosinus adalah satu, maka kecepatan maksimum ( $v_{\text{maks}}$ ) gerak harmonik sederhana adalah sebagai berikut.

$$v_{\text{maks}} = \omega A$$

### c. Percepatan Getaran Harmonik

Percepatan benda yang bergerak harmonik sederhana dapat diperoleh dari turunan pertama persamaan kecepatan atau turunan kedua persamaan simpangan.

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t + \theta_0)]}{dt} = \omega A \frac{d[\cos(\omega t + \theta_0)]}{dt}$$

$$a_y = \omega A [-\sin(\omega t + \theta_0)]$$

$$a_y = -\omega^2 A \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$a_y = -\omega^2 y$$

Karena nilai maksimum dari simpangan adalah sama dengan amplitudonya ( $y = A$ ), maka percepatan maksimumnya ( $a_{\text{maks}}$ ) gerak harmonik sederhana adalah sebagai berikut.

$$a_{\text{maks}} = -\omega^2 A$$

### Contoh 3.8

Sebuah partikel bergerak harmonik sederhana dengan frekuensi 50 Hz dan mempunyai amplitudo 0,2 m. Hitunglah kecepatan dan percepatan partikel pada titik seimbang, kecepatan dan percepatan partikel pada simpangan maksimum, dan persamaan simpangan gerak harmonik!

Diketahui : a.  $f = 50 \text{ Hz}$   
b.  $A = 0,2 \text{ m}$

Ditanyakan : a.  $v_y$  dan  $a_y = \dots?$  (pada titik seimbang)  
b.  $v_y$  dan  $a_y = \dots?$  (pada simpangan maksimum)  
c. Persamaan simpangan = ...?

Jawab:

a. Pada titik seimbang, simpangan ( $y$ ) = 0 sehingga  $\theta = \omega t = 0$  dan  $\theta_0 = 0$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 2 \times 10^{-2} \text{ s}$$

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi f \\ &= 2\pi \times 50 \\ &= 100\pi \text{ rad/s}\end{aligned}$$

Kecepatan partikel pada titik seimbang

$$v_y = A\omega \cos(\omega t + \theta_0)$$

Karena  $\theta = \omega t = 0$  dan  $\theta_0 = 0$

$$\begin{aligned}v_y &= A\omega \cos 0 \\ &= 0,2 \times 100\pi \times 1 \\ &= 20\pi \text{ m/s}\end{aligned}$$

Percepatan partikel pada titik seimbang

$$\begin{aligned}a_y &= -A\omega^2 \sin 0 \\ a_y &= 0\end{aligned}$$

b. Pada simpangan maksimum,  $\theta = \omega t = 90^\circ$  dan  $\theta_0 = 0$

$$\begin{aligned}v_y &= A\omega \cos(\theta + \theta_0) \\ &= 0,2 \times 100\pi \cos(90^\circ - 0^\circ) \\ &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_y &= -A \omega^2 \sin(90^\circ + 0) \\
 &= -0,2 \times (100\pi)^2 + 0 \\
 a_y &= -2.000 \pi^2 \text{ m/s}^2 \\
 \text{c. Persamaan simpangan} \\
 y &= A \sin(\omega t + \theta_0)
 \end{aligned}$$

### 3. Energi Getaran Harmonik

Benda yang bergerak harmonik memiliki energi potensial dan energi kinetik. Jumlah kedua energi ini disebut energi mekanik.

#### a. Energi Kinetik Gerak Harmonik

Cobalah Anda tinjau lebih lanjut energi kinetik dan kecepatan gerak harmoniknya.

Karena  $E_k = \frac{1}{2} m v_y^2$  dan  $v_y = A \omega \cos \omega t$ , maka

$$\begin{aligned}
 E_k &= \frac{1}{2} m (A \omega \cos \omega t)^2 \\
 &= \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t
 \end{aligned}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t \text{ atau } E_k = \frac{1}{2} k A^2 \cos^2 \omega t$$

Energi kinetik juga dapat ditulis dalam bentuk lain seperti berikut.

$$\begin{aligned}
 E_k &= \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t \\
 &= \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 (1 - \sin^2 \omega t) \\
 &= \frac{1}{2} m \omega^2 (A^2 - A^2 \sin^2 \omega t) \\
 &= \frac{1}{2} m \omega^2 (A^2 - y^2)
 \end{aligned}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \omega^2 (A^2 - y^2) \text{ atau } E_k = \frac{1}{2} k (A^2 - y^2)$$

$$E_{k \text{ maks}} = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2, \text{ dicapai jika } \cos^2 \omega t = 1. \text{ Artinya, } \omega t \text{ harus bernilai } \frac{\pi}{2}, 3\frac{\pi}{2}, \dots, \text{ dan seterusnya.}$$

$$y = A \cos \omega t$$

$$= A \cos \frac{\pi}{2}$$

$$= A \text{ (di titik setimbang)}$$

$$E_{k \text{ min}} = 0, \text{ dicapai bila } \cos^2 \omega t = 0. \text{ Artinya, } \omega t \text{ harus bernilai } 0, \pi, \dots, \text{ dan seterusnya.}$$

$$y = A \cos \omega t$$

$$= A \cos 0$$

$$= A \text{ (di titik balik)}$$

Jadi, energi kinetik maksimum pada gerak harmonik dicapai ketika berada di titik setimbang. Sedangkan energi kinetik minimum dicapai ketika berada di titik balik.

## b. Energi Potensial Gerak Harmonik

Besar gaya yang bekerja pada getaran harmonik selalu berubah yaitu berbanding lurus dengan simpangannya ( $F = ky$ ). Secara matematis energi potensial yang dimiliki gerak harmonik dirumuskan sebagai berikut.

$$E_p = \frac{1}{2} ky^2$$

$$= \frac{1}{2} m \omega^2 (A \sin \omega t)^2$$

$$= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t$$

$$E_{p \text{ maks}} = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2, \text{ dicapai jika } \sin^2 \omega t = 1. \text{ Artinya } \omega t \text{ harus bernilai } \frac{\pi}{2},$$

$$3\frac{\pi}{2}, \dots, \text{ dan seterusnya.}$$

$$y = A \sin \frac{\pi}{2}$$

$$= A \text{ (di titik balik)}$$

$$E_{p \text{ min}} = 0, \text{ dicapai jika } \sin^2 \omega t = 0. \text{ Artinya, } \omega t \text{ harus bernilai } 0, \pi, \dots, \text{ dan seterusnya.}$$

$$y = A \sin \omega t$$

$$= A \sin 0$$

$$= 0 \text{ (di titik setimbang)}$$



### c. Energi Mekanik

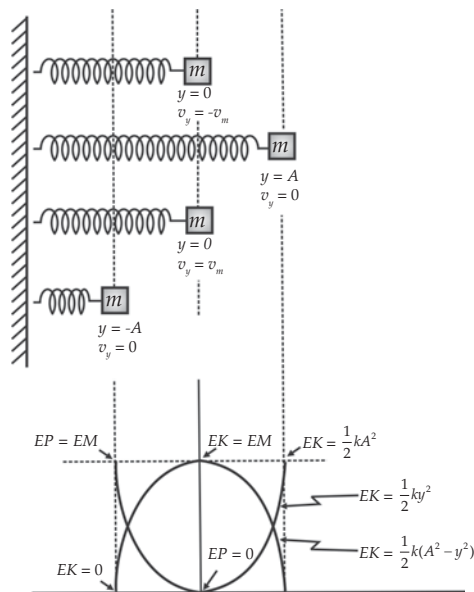
Energi mekanik sebuah benda yang bergerak harmonik adalah jumlah energi kinetik dan energi potensialnya.

$$\begin{aligned}
 E_m &= E_k + E_p \\
 &= \left(\frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t\right) + \left(\frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t\right) \\
 &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) \\
 &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2
 \end{aligned}$$

$$E_m = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

Berdasarkan persamaan  $E_m = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$ , ternyata energi mekanik suatu benda yang bergetar harmonik tidak tergantung waktu dan tempat. Jadi, energi mekanik sebuah benda yang bergetar harmonik dimanapun besarnya sama. Perhatikan Gambar 3.15!

$$\begin{aligned}
 E_m &= E_{k \text{ maks}} = E_{p \text{ maks}} \\
 &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} k A^2
 \end{aligned}$$



**Gambar 3.15** Kedudukan gerak harmonik sederhana pada saat  $E_p$  dan  $E_k$  bernilai maksimum dan minimum.

**Contoh 3.9**

Benda yang massanya 400 g bergetar harmonik dengan amplitudo 5 cm dan frekuensi 100 Hz. Hitunglah energi kinetik, energi potensial, dan energi mekaniknya (energi total) saat simpangannya 2,5 cm!

Diketahui : a.  $m = 400 \text{ g} = 0,4 \text{ kg}$   
 b.  $A = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$   
 c.  $f = 100 \text{ Hz}$   
 d.  $y = 2,5 \text{ cm}$

Ditanyakan : a.  $E_k = \dots?$   
 b.  $E_p = \dots?$   
 c.  $E_m = \dots?$

Jawab:

a. Energi kinetik

$$\begin{aligned} y &= A \sin \theta \Rightarrow \sin \theta = \frac{y}{A} \\ &= \frac{2,5}{5} \\ &= 0,5 \\ \theta &= 30^\circ \end{aligned}$$

$$\cos \theta = \cos 30^\circ = \frac{1}{2}\sqrt{3}; \quad \omega = 2\pi f$$

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \theta \\ &= \frac{1}{2} m 4\pi^2 f^2 A^2 \cos^2 30^\circ \\ &= \frac{1}{2} (0,4) \times 4 \times (3,14)^2 \times (100)^2 \times (0,05)^2 \times \left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)^2 \\ &= 147,894 \text{ J} \end{aligned}$$

b. Energi potensial

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \theta \\ &= \frac{1}{2} m 4\pi^2 f^2 A^2 \sin^2 30^\circ \\ &= \frac{1}{2} (0,4) \times 4 \times (3,14)^2 \times (100)^2 \times (0,05)^2 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 \\ &= 49,298 \text{ J} \end{aligned}$$

c. Energi Mekanik

Cara I

$$\begin{aligned}E_m &= E_p + E_k \\&= 147,894 + 49,298 \\&= 197,192 \text{ J}\end{aligned}$$

Cara II

$$\begin{aligned}E_m &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \\&= \frac{1}{2} m 4\pi^2 f^2 A^2 \\&= \frac{1}{2} (0,4) \times 4 \times (3,14)^2 \times (100)^2 \times (0,05)^2 \\&= 197,192 \text{ J}\end{aligned}$$

d. Kecepatan Benda yang Bergetar Harmonik

Untuk menghitung kecepatan maksimum benda atau pegas yang bergetar harmonik dapat dilakukan dengan menyamakan persamaan kinetik dan energi total mekaniknya.

$$\begin{aligned}E_k &= E_m \\ \frac{1}{2} m v_{\text{maks}}^2 &= \frac{1}{2} k A^2 \\ v_m^2 &= \frac{k}{m} A^2\end{aligned}$$

$$v_m = A \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sedangkan untuk menghitung kecepatan benda di titik sembarang dilakukan dengan menggunakan persamaan kekekalan energi mekanik

$$\begin{aligned}E_p + E_k &= \frac{1}{2} k A^2 \\ \frac{1}{2} k y^2 + \frac{1}{2} m v_y^2 &= \frac{1}{2} k A^2 \\ k y^2 + m v_y^2 &= k A^2 \\ m v_y^2 &= k(A^2 - y^2) \\ v_y^2 &= \frac{k}{m} (A^2 - y^2)\end{aligned}$$

$$v_y = \pm \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - y^2)}$$

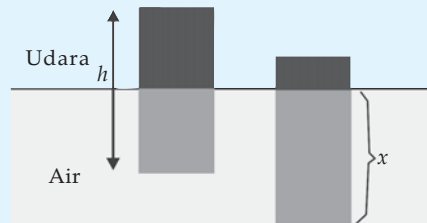
Diketahui  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}g$ , maka

$$v_y = \pm \omega \sqrt{(A^2 - y^2)}$$

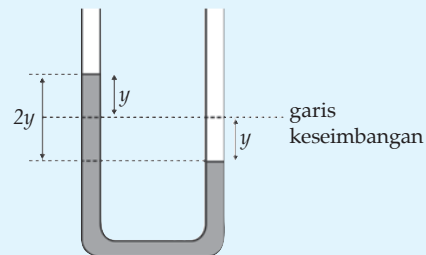
### Soal Kompetensi 3.3

1. Ikatan atom-atom dalam suatu material dapat dianggap sebagai pegas. Anggap terdapat 3 buah atom yang berdekatan dan saling berinteraksi. Dua atom yang terluar dianggap diam dan atom yang di tengah bergetar dengan frekuensi  $10^{14}$  Hz. Hitung konstanta gaya pegas yang menggantikan interaksi antar atom ini, jika massa atom  $4 \times 10^{-27}$  kg!

2. Perhatikan gambar di samping! Sebuah balok kayu terapung pada air. Tinggi balok  $h$ , massa jenis air  $\rho_a$ , massa jenis balok  $\rho_b$ , dan percepatan gravitasi bumi  $g$ . Apabila balok tersebut ditekan sedalam  $x$  kemudian dilepaskan, maka balok akan bergetar pada titik keseimbangan. Tentukan periode getaran balok tersebut!



3. Perhatikan gambar di samping! Sebuah pipa kaca berbentuk U dengan diameter 1 cm diisi dengan raksa sebanyak 2 kg ( $\rho = 13,6$  g/cm<sup>3</sup>). Raksa dalam pipa tersebut digoyang sehingga terjadi getaran. Hitunglah periode getaran raksa tersebut!



4. Dua buah partikel melakukan getaran harmonik. Kedua partikel berangkat dari titik kesetimbangan ( $\theta_0 = 0$ ). Periode masing-masing partikel adalah  $T_1 = \frac{1}{3}$  sekon dan  $T_2 = \frac{1}{5}$  sekon. Hitunglah sudut fase, fase, dan beda fase setelah partikel bergerak  $\frac{1}{4}$  sekon!

5. Benda yang massanya 800 g bergetar harmonik dengan frekuensi 200 Hz. Jika Amplitudonya 10 cm dan simpangannya 5 cm, maka hitunglah energi potensial, kinetik, dan mekaniknya!



## Rangkuman

1. Benda elastis adalah benda yang dapat kembali ke bentuknya semula bila gaya yang bekerja diiadakan.
2. Sifat elastis suatu bahan ada batasnya.
3. Elastisitas bahan dapat dilihat dari modulus elastis bahan yang dikenal dengan nama modulus Young.
4. Modulus Young didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada tiap satuan luas penampang pertambahan panjang untuk tiap satuan panjang benda  $\left( E = \frac{\sigma}{\epsilon} \right)$ .
5. Pertambahan panjang suatu benda elastis sebanding dengan gaya yang bekerja pada benda itu  $(F = k \Delta X)$ .
6. Energi potensial elastis menunjukkan kemampuan bahan elastis untuk melakukan usaha bila kedudukan setimbangnya terganggu.
7. Gerak harmonik sederhana adalah gerak bolak-balik suatu partikel melalui titik keseimbangannya tanpa teredam.

## Kolom Ilmuwan

Semua jenis kendaraan di jaman modern ini telah dilengkapi dengan sistem peredam kejut. Biasanya, harga kendaraan sebanding dengan kualitas sistem peredam kejutnya. Carilah informasi tentang cara kerja sistem peredam kejut yang ada pada beberapa jenis kendaraan (kendaraan roda dua, mobil, kereta, dan atau pesawat). Berdasarkan informasi tersebut, buatlah artikel bebas yang membahas mengenai sistem peredam kejut. Anda dapat menyajikan cara kerja, kelebihan, kekurangan dari suatu sistem peredam kejut. Sertakan juga saran yang bisa menambah fungsi atau mengurangi kelemahan sistem tersebut. Kumpulkan tulisan Anda dan mintalah kepada guru untuk memilih salah satu siswa agar mempresentasikan hasil tulisannya!

## P e l a t i h a n

**A. Pilihlah jawaban yang tepat dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!**

1. Sebuah balok bermassa  $m$  menumbuk pegas horizontal (konstanta pegas  $k$ ). Akibat tumbukan ini, pegas tertekan maksimal sejauh  $x_0$  dari posisi normalnya. Bila koefisien gesek antara balok dan lantai  $\mu$  dan percepatan gravitasi bumi  $g$ , maka kelajuan balok pada saat mulai bertumbukan adalah ....

- |   |  |
|---|--|
| a. $\sqrt{x_0} \left( 2\mu g + \frac{k}{m} x_0 \right)^{\frac{1}{2}}$ | d. $x_0 \left( 2\mu g + \frac{k}{m} x_0 \right)^{\frac{1}{2}}$ |
| b. $\left( 2\mu g + \frac{k}{m} x_0 \right)^{\frac{1}{2}}$            | e. $x_0 \left( 2\mu g + \frac{k}{m} x_0 \right)$               |
| c. $\sqrt{x_0} \left( 2\mu g + \frac{k}{m} x_0 \right)$               |  |

2. Sebuah pegas menggantung, dalam keadaan normal panjangnya 20 cm. Bila pada ujung pegas digantungkan sebuah benda yang mempunyai massa 50 g, maka panjang pegas menjadi 25 cm. Jika kemudian benda tersebut disimpangkan sejauh 4 cm, maka energi potensial elastik sistem adalah ....

- |            |          |
|------------|----------|
| a. 0,008 J | d. 0,4 J |
| b. 0,016 J | e. 2 J   |
| c. 0,2 J   |          |

3. Seorang pelajar yang bermassa 50 kg bergantung pada ujung sebuah pegas sehingga pegas bertambah panjang 10 cm. Tetapan pegas tersebut adalah ....

- |           |             |
|-----------|-------------|
| a. 5 N/m  | d. 500 N/m  |
| b. 20 N/m | e. 5000 N/m |
| c. 50 N/m |             |

4. Sebuah pegas yang digantung vertikal panjangnya 15 cm. Jika diregangkan dengan gaya 0,5 N, maka panjang pegas menjadi 27 cm. Panjang pegas jika diregangkan dengan gaya 0,6 N adalah ....

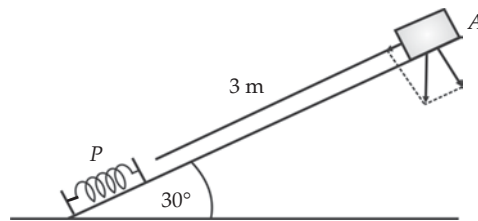
- |            |            |
|------------|------------|
| a. 32,4 cm | d. 29,0 cm |
| b. 31,5 cm | e. 28,5 cm |
| c. 29,4 cm |            |

5. Sebuah benda bergerak harmonik sederhana dalam arah vertikal dengan amplitudo 50 mm dan periode 4 s. Perpindahan benda setelah 2,5 sekon adalah ....
- 35 mm
  - 35 mm
  - 25 mm
  - 25 mm
  - 50 mm
6. Dua buah osilator bergetar dengan fase sama pada  $t = 0$ . Frekuensi getaran tersebut 10 Hz dan 40 Hz. Setelah  $\frac{5}{4}$  sekon kedua gelombang tersebut berselisih sudut fase sebesar ....
- $0^\circ$
  - $30^\circ$
  - $45^\circ$
  - $90^\circ$
  - $180^\circ$
7. Untuk benda yang mengalami getaran harmonik, maka pada ....
- simpangan maksimum kecepatan dan percepatannya maksimum
  - simpangan maksimum kecepatan dan percepatannya minimum
  - simpangan maksimum kecepatannya maksimum dan percepatannya nol
  - simpangan maksimum kecepatannya nol dan percepatannya maksimum
  - simpangan maksimum energinya maksimum
8. Sebuah benda yang massanya  $m$  dihubungkan dengan sebuah pegas yang tetapan pegasnya  $k$ . Sistem tersebut melakukan gerak harmonik sederhana tanpa gesekan. Perbandingan antara energi kinetiknya pada waktu hendak melewati titik seimbang dengan energi potensialnya ketika benda mendapat simpangan maksimum adalah ....
- kurang dari satu
  - sama dengan satu
  - lebih besar dari satu
  - sama dengan  $m/k$
  - sama dengan  $k/m$
9. Pada saat energi kinetik benda yang bergetar selaras sama dengan energi potensialnya, maka ....
- sudut fasenya  $180^\circ$
  - fasenya  $\frac{3}{4}$
  - sudut fasenya  $45^\circ$
  - fasenya  $\frac{1}{4}$
  - percepatannya nol
10. Pada benda yang mengalami getaran harmonik, jumlah energi kinetik dan energi potensialnya adalah ....
- maksimum pada simpangan maksimum
  - maksimum pada simpangan nol
  - tetap besarnya pada simpangan berapapun
  - berbanding lurus dengan simpangannya
  - berbanding terbalik dengan simpangannya

### B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!

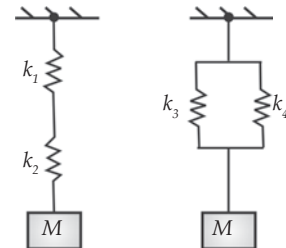
1. Sebuah pegas tergantung tanpa beban panjangnya 30 cm. Kemudian ujung bawah pegas digantungi beban 100 gram sehingga panjang pegas menjadi 35 cm. Jika beban tersebut ditarik ke bawah sejauh 5 cm, dan percepatan gravitasi bumi  $10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah energi potensial elastik pegas!
2. Suatu benda bermassa  $0,050 \text{ kg}$  diikatkan pada sebuah benang elastis yang panjangnya  $0,50 \text{ m}$  dalam keadaan tidak meregang. Massa tersebut diputar hingga melakukan gerak melingkar beraturan menurut bidang horisontal dengan radius  $0,70 \text{ m}$ . Jika konstanta elastisitas benang  $40 \text{ N/m}$ , sekitar berapakah kecepatan linear benda tersebut?

3. Perhatikan gambar di samping! Benda  $A$  memiliki massa  $0,5 \text{ kg}$  dan mula-mula diam, meluncur pada papan licin sepanjang  $3 \text{ m}$  yang membentuk sudut  $30^\circ$  dengan bidang datar. Benda  $A$  menumbuk pegas  $P$  yang salah satu ujungnya tertancap pada ujung papan. Jika konstanta pegas  $900 \text{ Nm}^{-1}$ , maka tentukan pemendekan maksimum pegas!



4. Sebuah benda bermassa  $50 \text{ gram}$  bergerak harmonik sederhana dengan amplitudo  $10 \text{ cm}$  dan periode  $0,2 \text{ s}$ . Hitunglah besar gaya yang bekerja pada sistem saat simpangannya setengah amplitudo!

5. Perhatikan gambar di samping! Beberapa pegas disusun secara seri dan paralel. Ujung pegas digantungi beban yang sama besar. Bila konstanta pegas  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$ , maka hitunglah perbandingan periode susunan seri dan paralel!



6. Sebuah benda yang bermassa  $0,150 \text{ kg}$  bergerak harmonik sederhana pada sebuah ujung pegas yang memiliki konstanta pegas  $200 \text{ N/m}$ . Ketika benda berada  $0,01 \text{ m}$  dari posisi setimbangnya, kelajuan benda menjadi  $0,2 \text{ m/s}$ . Hitunglah energi total benda ketika posisinya  $0,005 \text{ m}$  dari posisi setimbangnya!
7. Sebuah partikel melakukan ayunan harmonik sederhana. Tenaga kinetik partikel adalah  $E_k$  tenaga potensialnya  $E_p$  dan tenaga total  $E_T$ . Hitunglah perbandingan  $E_k/E_T$  dan  $E_p/E_T$ , ketika partikel berada di tengah-tengah antara posisi seimbang dan posisi amplitudonya!



8. Sebuah pegas yang panjangnya 20 cm digantungkan vertikal. Kemudian ujung bawahnya diberi beban 200 gram sehingga panjangnya bertambah 10 cm. Beban ditarik 5 cm ke bawah kemudian dilepas hingga beban bergetar harmonik. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah frekuensi getarannya!
9. Per sebuah mobil bergetar ke atas ke bawah dengan periode  $\sqrt{2}$  detik ketika ban mobil melewati suatu halangan. Massa mobil dan pengemudi adalah 300 kg. Jika pengemudi menaikkan beberapa temannya, sehingga massa mobil dan penumpang menjadi 600 kg, maka tentukan periode baru getaran per ketika melewati halangan tersebut!
10. Sebuah benda bergetar selaras sederhana pada pegas dengan tetapan gaya 80 N/m. Amplitudo getaran tersebut 20 cm dan kecepatan maksimumnya sebesar 4 m/s. hitunglah massa benda tersebut!

# Bab

# IV

## Usaha dan Energi



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menganalisis hubungan antara usaha, perubahan energi dengan hukum kekekalan energi mekanik, serta dapat menerapkan hukum kekekalan energi mekanik untuk menganalisis gerak dalam kehidupan sehari-hari.



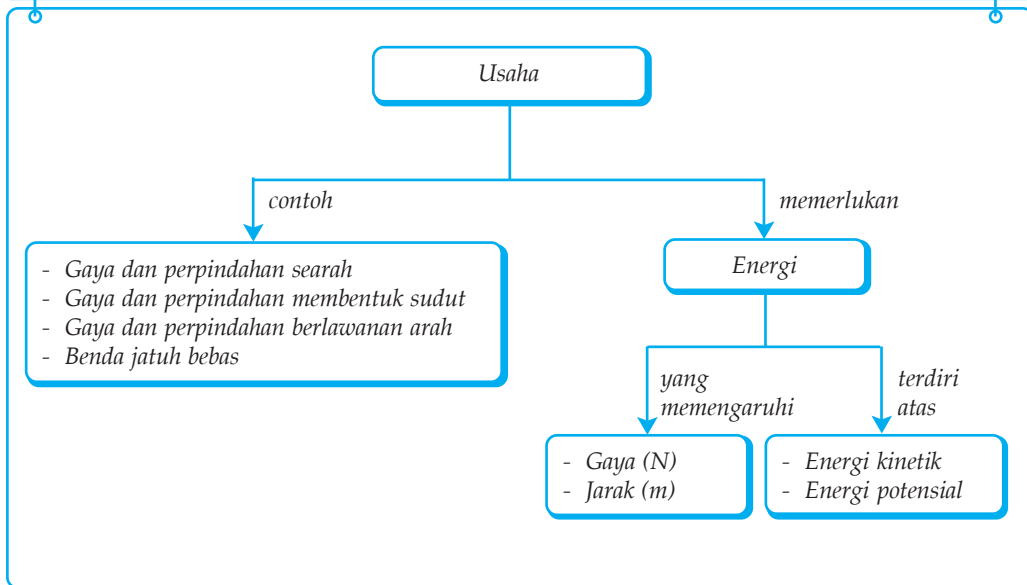
Sumber: Encarta Encyclopedia

Banyak dari kendaraan rekreasi dipekan raya atau taman hiburan yang menggunakan energi kinetik. Misalnya, kereta luncur (*roller coaster*). Kereta ini mula-mula dinaikkan ke atas lereng yang curam, dan kemudian dilepaskan. Kereta ini melaju direlnya tanpa ada mesin yang menjalankannya sepanjang lintasan. Hal ini bisa terjadi karena puncak lereng lebih tinggi dari bagian lintasan rel yang lain. Kereta luncur mendapat simpanan energi potensial yang banyak, yang kemudian berubah menjadi energi kinetik saat gaya gravitasi menarik kereta ini.

### Kata Kunci

- |          |                        |                                  |
|----------|------------------------|----------------------------------|
| • Usaha  | • Perubahan Energi     | • Energi Kinetik                 |
| • Energi | • Energi Mekanik       | • Energi Potensial               |
| • Gerak  | • Sumber-Sumber Energi | • Hukum Kekekalan Energi Mekanik |

## Peta Konsep



Di SMP, Anda telah mempelajari bahwa energi di jagad raya terdapat dalam berbagai bentuk. Misalnya energi mekanik, energi kimia, energi elektromagnetik, energi nuklir, energi bunyi, energi panas, energi listrik, dan energi cahaya. Berasal dari manakah energi di jagad raya? Energi di jagad raya berasal dari matahari. Apabila matahari tidak ada, maka tidak akan ada energi di bumi. Energi mengalami perubahan dari bentuk satu menjadi energi bentuk lain. Misalnya, seseorang mendorong mobil, maka orang tersebut mengubah energi kimia menjadi energi kinetik. Pada kasus ini dapat dinyatakan bahwa proses perubahan energi merupakan usaha.

Konsep usaha dan konsep energi merupakan konsep menarik dalam fisika. Banyak soal fisika dapat diselesaikan lebih mudah dengan konsep ini dibandingkan dengan menggunakan hukum Newton. Pada bab ini Anda akan mempelajari konsep usaha dan energi serta aplikasinya dalam berbagai soal fisika. Selain itu, Anda juga akan mempelajari hubungan konsep energi-energi dengan hukum kekekalan energi mekanik. Pada pembahasan energi Anda akan mempelajari berbagai jenis energi seperti energi kinetik dan energi potensial.

## A. Usaha

Di dalam kehidupan sehari-hari, mungkin Anda sering mendengar kata usaha. Pengertian usaha dalam kehidupan sehari-hari adalah mengarahkan kemampuan yang dimilikinya untuk mencapai tujuan atau kerja yang dilakukan orang atau mesin. Apapun hasil kerja itu, berhasil atau tidak,

asalkan orang atau mesin itu melakukan sesuatu, dikatakan orang atau mesin tersebut melakukan usaha. Pengertian usaha dalam fisika didefinisikan sebagai perkalian antara besar gaya yang menyebabkan benda berpindah dengan besar perpindahan benda yang searah dengan arah gaya tersebut. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$W = F \cdot s$$

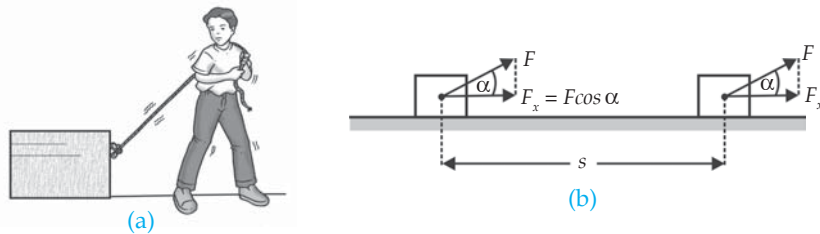
Keterangan:

$W$  : usaha (J)

$F$  : gaya yang beraksi pada benda (N)

$s$  : jarak perpindahan (m)

## 1. Usaha yang Dilakukan Gaya Membentuk Sudut Sembarang



**Gambar 4.1** Usaha yang dilakukan oleh gaya  $F$  menyebabkan perpindahan sejauh  $s$ .

Perhatikan Gambar 4.1! Toni menarik balok dengan suatu gaya konstan  $F$  dan menyebabkan balok berpindah sejauh  $s$  dan tidak searah dengan arah gaya  $F$ . Komponen gaya  $F$  yang segaris dengan perpindahan adalah  $F_x = F \cos \alpha$ , dengan  $\alpha$  merupakan sudut apit antara arah gaya dan bidang horizontal. Berdasarkan definisi usaha tersebut diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} W &= F_x \cdot s \\ &= F \cos \alpha \\ &= F \cdot s \cos \alpha \end{aligned}$$

### Contoh 4.1

Sebuah benda mengalami dua gaya. Gaya pertama sebesar 30 N membentuk sudut  $37^\circ$  dengan sumbu X positif. Jika benda berpindah sejauh 3 m pada arah sumbu X positif. Hitunglah besarnya usaha yang dilakukan gaya tersebut!

Diketahui : a.  $F = 30 \text{ N}$

b.  $\alpha = 37^\circ$

c.  $s = 3 \text{ m}$

Ditanyakan :  $W = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} W &= F \cdot s \cos \alpha \\ &= 30 \cdot 3 \cdot 0,8 \\ &= 72 \text{ J} \end{aligned}$$

## 2. Usaha yang Bernilai Negatif

Usaha boleh bernilai negatif. Berdasarkan persamaan  $W = F \cdot s \cos \alpha$ , ketika  $\alpha$  berada pada rentang  $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ , usaha bernilai negatif. Hal ini disebabkan  $\cos \alpha$  bernilai negatif. Misalnya, pada kasus benda yang dilempar ke atas. Selama benda bergerak ke atas benda berpindah setinggi  $h$  meter, pada benda bekerja gaya berat  $w$  yang arahnya ke bawah. Pada kasus ini arah gaya berat ke bawah berlawanan dengan arah perpindahan benda. Ketika benda dilemparkan, benda mendapat sejumlah energi untuk melawan gaya berat benda. Jadi, usaha yang dilakukan oleh gaya berat adalah negatif. Kasus lain yang bernilai negatif adalah usaha yang dilakukan oleh gaya gesekan.



*Gambar 4.2 Gaya berat pada benda yang dilempar ke atas bernilai negatif.*

## 3. Usaha yang Dilakukan Gaya Membentuk Sudut $90^\circ$

Berdasarkan persamaan  $W = F \cdot s \cos \alpha$ , jika  $\alpha = 90^\circ$ , maka perpindahan benda tegak lurus terhadap gaya yang beraksi pada benda. Karena nilai  $\cos 90^\circ = 0$ , maka diperoleh  $W = 0$ . Ketika  $W = 0$ , dikatakan gaya tersebut tidak melakukan usaha. Pada kasus ini dapat diartikan bahwa perpindahan benda bukan disebabkan oleh gaya tersebut.

Perhatikan Gambar 4.3! Misalkan, Rinto membawa sebuah buku sambil berjalan dengan kecepatan tetap. Untuk membawa buku yang beratnya  $w = m \cdot g$ , Rinto mengeluarkan gaya ke atas sebesar  $F$  yang sama dengan berat buku ( $w$ ). Namun, karena gaya  $F$  arahnya tegak lurus dengan perpindahan, maka dikatakan Rinto tidak melakukan usaha. Bagaimana dengan gerak mendatar Rinto? Pada gerak mendatar, Rinto bergerak dengan kecepatan konstan (percepatan ( $a$ ) = 0), sehingga besarnya gaya mendatar nol (ingat  $F = m \cdot a = m \cdot 0 = 0$ ). Menurut definisi usaha, jika gaya nol, maka usahanya juga nol. Jadi, usaha total yang dilakukan Rinto sama dengan nol (Rinto tidak melakukan usaha).



*Gambar 4.3 Tidak ada usaha jika arah gaya tegak lurus ( $90^\circ$ ).*

## 4. Gaya Tidak Melakukan Usaha Jika Benda Tidak Berpindah

Telah Anda ketahui bahwa gaya dikatakan tidak melakukan usaha jika gaya yang bekerja pada suatu benda memiliki resultan nol. Bagaimana jika resultan gayanya tidak sama dengan nol tetapi benda tidak berpindah atau bergeser? Pada kasus-kasus tertentu, gaya yang beraksi pada benda tidak mengubah kedudukan benda. Misalnya ketika Anda mendorong tembok. Anda dikatakan tidak melakukan usaha karena tembok yang anda dorong tidak berpindah ( $s = 0$ ; maka  $W = 0$ )



*Gambar 4.4 Orang yang mendorong tembok tidak melakukan usaha karena tembok tidak bergerak.*

Contoh yang lain adalah peristiwa atlet besi yang menahan barbel di atas kepala. Saat mengangkat barbel, atlet memberikan sejumlah gaya yang sebanding dengan berat barbel. Gaya ini mengubah posisi barbel dari lantai ke atas kepala atlet. Pada saat mengangkat barbel dari atas lantai ke atas kepalanya atlet dikatakan melakukan usaha. Namun, setelah barbel berada di atas kepala, atlet dikatakan tidak melakukan usaha, meskipun ia mengerahkan segenap tenaga untuk menahan barbel tersebut. Hal ini disebabkan barbel tidak mengalami perpindahan ( $s = 0$ ; maka  $W = 0$ ).

## 5. Usaha oleh Berbagai Gaya

Pada kehidupan nyata, jarang dijumpai adanya gaya tunggal yang bekerja pada benda. Misalnya, saat Anda berjalan. Gaya-gaya yang bekerja pada saat Anda berjalan adalah gaya berat, gaya normal, dan gaya gesekan. Bagaimanakah cara menentukan usaha yang dilakukan oleh berbagai gaya? Untuk dapat menentukan usahanya, Anda harus mengetahui besar gaya dan arahnya.

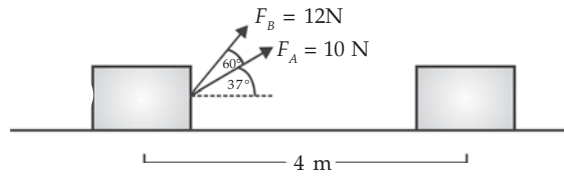
### a. Masing-Masing Gaya Bekerja Serentak pada Perpindahan yang Sama

Usaha total yang dilakukan oleh beberapa gaya yang bekerja serentak dapat dihitung sebagai hasil kali resultan komponen gaya yang segaris dengan perpindahan dan besarnya perpindahan.

$$W = (F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + \dots + F_{xn})s = \left( \sum_{n=1}^n F_{xn} \right) s$$

### Contoh 4.2

Perhatikan gambar di samping! Dua orang siswa A dan B menarik peti yang terletak pada lantai dengan arah  $37^\circ$  dan  $60^\circ$  terhadap lantai. Tentukan usaha



yang dilakukan oleh siswa A dan B jika besarnya gaya kedua siswa tersebut 10 N dan 12 N dan peti berpindah ke kanan sejauh 4 m!

- Diketahui :
- a.  $F_1 = 10 \text{ N}$
  - b.  $F_2 = 12 \text{ N}$
  - c.  $s = 4 \text{ m}$
  - d.  $\alpha_1 = 37^\circ$
  - e.  $\alpha_2 = 60^\circ$

Ditanyakan:  $W = \dots?$

Jawab:

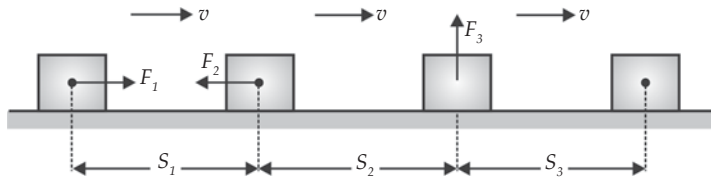
$$\begin{aligned} W &= (F_1 + F_2)s = (10 \cos 37^\circ + 12 \cos 60^\circ) 4 \\ &= (10 \cdot 0,8 + 12 \cdot 0,5) 4 \\ &= 8 \text{ J} \end{aligned}$$

### b. Masing-Masing Gaya Bekerja pada Perpindahan yang Berbeda

Mengingat bahwa usaha adalah besaran skalar, maka usaha yang dilakukan oleh beberapa gaya pada perpindahan yang berbeda dapat dihitung sebagai hasil penjumlahan aljabar dari usaha yang dilakukan oleh masing-masing gaya secara individual. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n = \sum_{n=1}^n W_n$$

Perhatikan usaha yang dilakukan oleh beberapa gaya seperti terlihat pada Gambar 4.5 berikut!



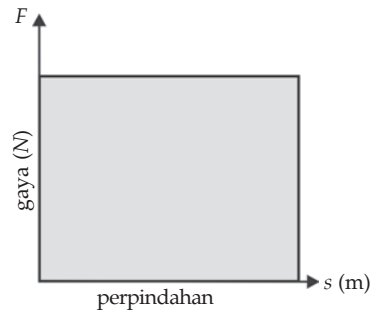
*Gambar 4.5 Usaha yang dilakukan oleh beberapa gaya pada perpindahan yang berbeda.*

Berdasarkan Gambar 4.5, diperoleh besarnya usaha yang dilakukan adalah:

$$\begin{aligned}
 W &= W_1 + W_2 + W_3 \\
 &= F_1 s_1 \cos 0^\circ + F_2 s_2 \cos 180^\circ + F_3 s_3 \cos 90^\circ \\
 &= F_1 s_1 + (-F_2 s_2) + 0 \\
 &= F_1 s_1 - F_2 s_2
 \end{aligned}$$

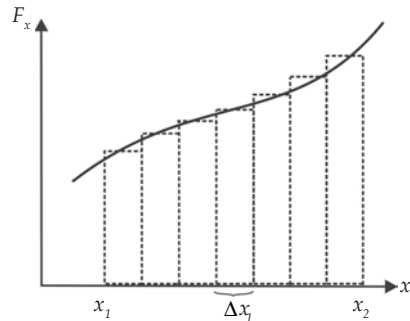
## 6. Menghitung Usaha dengan Grafik

Usaha yang dilakukan oleh sebuah gaya dapat dilukiskan secara grafis, yaitu dengan menarik garis komponen gaya sebagai fungsi perpindahannya. Perhatikanlah Gambar 4.6! Luas daerah diarsir di bawah grafik  $F-s$  menyatakan usaha yang dilakukan oleh gaya sebesar  $F$  untuk perpindahan benda sejauh  $s$ . Sehingga untuk menghitung usaha yang dilakukan oleh suatu gaya, Anda cukup menghitung luas daerah di bawah grafik gaya terhadap perpindahan. Hal ini berlaku untuk segala jenis grafik gaya.



Gambar 4.6 Grafik  $F$  terhadap  $s$ .

Perhatikan Gambar 4.7! Usaha yang dilakukan sebuah benda dengan perpindahan  $\Delta x$  digambarkan oleh luas daerah di bawah kurva gaya sebagai fungsi posisi. Pada gambar terlihat bahwa telah dibagi selang dari  $x_1$  ke  $x_2$  menjadi kumpulan selang-selang yang mempunyai panjang  $\Delta x$ .



Gambar 4.7 Kurva gaya yang berubah-ubah sebagai fungsi posisi.

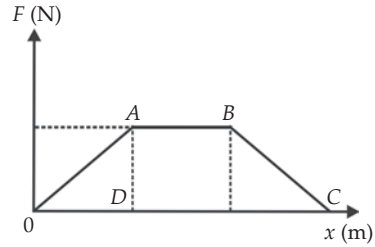
Untuk tiap selang  $\Delta x$ , usaha yang dilakukan adalah luas persegi di bawah kurva  $F-x$ . Jumlah seluruh luas persegi

panjang tiap selang  $\Delta x$  merupakan luas daerah di bawah kurva. Oleh karena itu, dapat didefinisikan usaha total yang dilakukan oleh gaya yang berubah-ubah dari  $x_1$  ke  $x_2$  adalah luas total di bawah kurva untuk selang  $x_1$  ke  $x_2$ . Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya  $F$  untuk perpindahan  $\Delta x = x_2 - x_1$  sama dengan luas daerah di bawah kurva  $F-x$  dengan batas  $x_1$  dan  $x_2$ .



### Contoh 4.3

Perhatikan gambar disamping! Sebuah balok mengalami gaya  $F$  yang arahnya sejajar sumbu  $X$ . Gaya yang bekerja ini merupakan fungsi perpindahan. Hitunglah usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut ketika balok berpindah dari:



- $x = 0$  ke  $x = 1$  meter dan
- $x = 0$  ke  $x = 3$  meter!

Jawab:

Usaha dihitung dengan menghitung luas di bawah grafik gaya fungsi perpindahan.

- Usaha dari  $x = 0$  ke  $x = 1$  meter sama dengan luas segitiga  $OAD$  (perhatikan gambar).

$$W_a = \text{luas } OAD$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \times 1 \times 4 \\ &= 2 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, usaha yang dilakukan benda dari  $x = 0$  ke  $x = 1$  m sebesar 2 J

- Usaha dari  $x = 0$  ke  $x = 3$  sama dengan luas trapesium  $OABC$  (perhatikan gambar).

$$W_b = \text{luas } OABC$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(1 + 3) 4}{2} \\ &= 8 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, usaha yang dilakukan benda dari  $x = 0$  ke  $x = 3$  m sebesar 8 J

## 7. Usaha yang Dilakukan Oleh Gaya Berat

Anggap sebuah benda bermassa  $m$  dilepaskan dari ketinggian  $h$  di atas permukaan bumi. Benda akan jatuh karena pengaruh gaya gravitasi. Besarnya usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi adalah:

$$W_{\text{grav}} = F_{\text{grav}} \times h = m \cdot g \cdot h$$

Usaha ini positif karena arah gaya dan perpindahan sama-sama ke bawah. Sekarang Anda lihat kasus di mana benda dinaikkan dari lantai perlahan-lahan hingga ketinggian  $h$ . Di sini arah perpindahan (ke atas)

berlawanan dengan arah gaya berat (ke bawah) sehingga usahanya negatif  $W = - (m g h)$ . Ketika benda berpindah secara horizontal gaya gravitasi tidak melakukan usaha karena arah perpindahan tegak lurus arah gaya (ingat pembahasan di depan).

Berdasarkan ketiga hal tersebut, dapat disimpulkan sebagai berikut.

- Jika benda berpindah sejauh  $h$  vertikal ke atas, maka besarnya usaha gaya gravitasi adalah  $W = - (m g h)$ .
- Jika benda berpindah sejauh  $h$  vertikal ke bawah, maka besarnya usaha gaya gravitasi adalah  $W = m g h$ .
- Jika benda berpindah sejauh  $h$  mendatar, maka besarnya usaha gravitasi adalah  $W = 0$ .

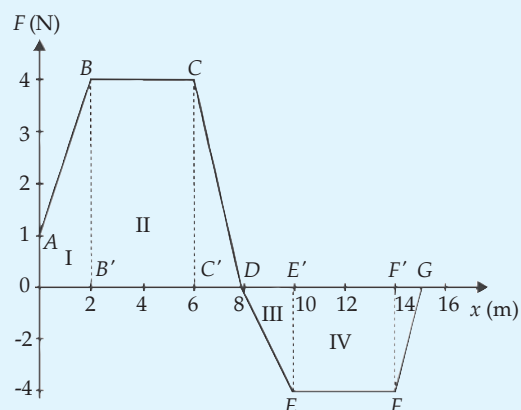
#### Soal Kompetensi 4.1

1. Seorang petugas PLN bermassa 65 kg sedang menaiki tangga untuk memperbaiki jaringan listrik pada sebuah tiang listrik. Jika tangga terdiri dari 30 anak tangga dan panjang setiap anak tangga adalah 30 cm, berapakah usaha yang telah dilakukan petugas tersebut?
2. Sebuah balok yang memiliki massa 5 kg mula-mula diam di kaki sebuah bidang datar yang memiliki kemiringan terhadap arah horizontal  $\alpha = 45^\circ$ . Koefisien gesek statis dan kinetik balok dengan bidang miring masing-masing  $\mu_s = 0,5$  dan  $\mu_k = 0,25$ . Pada balok bekerja gaya  $F$  dengan arah ke atas sejajar bidang sebesar 60 N, sehingga balok bergeser ke atas sepanjang bidang datar dan sampai ke puncak bidang.

- a. Hitunglah usaha pada masing-masing gaya!
- b. Hitunglah usaha total gaya-gaya tersebut pada balok!

3. Perhatikan gambar grafik di samping!

Sebuah balok bermassa 3 kg bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan mendatar akibat pengaruh gaya  $F$  yang berubah-ubah terhadap posisi. Berapakah usaha yang dilakukan gaya  $F$  untuk memindahkan balok dari titik asal ( $x = 0$ ) ke posisi  $x = 15$  m?



4. Buktikan bahwa usaha gaya gravitasi hanya tergantung pada ketinggian saja tidak tergantung pada bentuk lintasannya!

## James Prescott Joule (1818 – 1889)



Sumber: Jendela Iptek, Energi

James Prescott Joule adalah ahli fisika, penemu hukum Joule, dan efek Joule-Thomson. Joule, lahir di Salford, Lancashire, Inggris, pada tanggal 24 Desember 1818. Ayahnya seorang pengusaha bir yang kaya. Joule tidak pernah duduk di bangku sekolah sampai umur 17 tahun karena sakit-sakitan. Guru didatangkan ke rumahnya, bahkan ayahnya menyediakan sebuah laboratorium. Pelajaran yang cukup sulit baginya adalah matematika.

Setelah umur 17 tahun, ia baru tahu rasanya duduk di bangku sekolah. Ia diterima di Universitas Manchester di bawah bimbingan John Dalton. Joule tidak hanya rajin belajar tapi juga rajin mengadakan eksperimen dan menulis. Pada tahun 1840 dalam makalahnya yang berjudul *On the Production of Heat by Voltaic Electricity*, ia mengemukakan rumusan yang dikenal sebagai Hukum Joule, yang bunyinya “Panas yang dihasilkan berbanding lurus dengan hambatan konduktor dikalikan dengan kuadrat kuat arus listriknya.”

Karena Joule hanya anak pabrikan bir yang belajar sendiri dan lemah dalam matematika, masyarakat ilmiah menolak makalah-makalahnya. Untuk menarik perhatian kepada ide-idenya, Joule memberikan ceramah publik dan meyakinkan sebuah surat kabar di Manchester untuk menerbitkan naskah ceramahnya. Hal ini menarik perhatian William Thomson. Joule dan Thomson kemudian bekerja sama dan menemukan Efek Joule-Thomson, yang menyatakan bahwa bila gas dibiarkan berkembang tanpa melakukan kerja keluar, maka suhu gas itu akan turun. Prinsip ini kemudian digunakan secara luas dalam industri lemari es dan AC (*Air Conditioner*).

Karya Joule-lah yang memantapkan hukum pertama termodinamika yang biasa disebut Hukum Kekekalan Energi, energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya dialihkan atau diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Nama Joule kemudian dipakai sebagai nama satuan usaha dan energi.

Joule tetap menjadi ilmuwan amatir seumur hidupnya. Ia meninggal di Sale, Cheshire, pada tanggal 11 Oktober 1889 pada umur 71 tahun. Pada akhir hidupnya ia menyesal dan kecewa karena banyak penemuan ilmiah dipakai untuk kepentingan perang.

(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)

## B. Energi

Di SMP, Anda telah mempelajari bahwa energi merupakan kemampuan untuk melakukan usaha. Pada bagian pengantarjuga telah disinggung beberapa bentuk energi. Anda tentu juga tahu tentang hukum kekekalan energi. Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan melainkan hanya dapat diubah bentuknya. Proses perubahan bentuk energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya disebut *konversi energi*. Alat untuk mengubah energi disebut *konventor energi*.

Perubahan energi terjadi ketika usaha sedang dilakukan. Misalnya, ketika Anda melakukan usaha dengan mendorong mobil hingga mobil tersebut bergerak maju. Pada proses usaha sedang berlangsung, sebagian energi kimia yang tersimpan dalam tubuh Anda diubah menjadi energi mekanik. Di sini Anda berfungsi sebagai pengubah energi (konverter energi).



Sumber: Encarta Encyclopedia

*Gambar 4.8 Air merupakan salah sumber energi yang dapat membangkitkan listrik. Listrik merupakan salah energi yang banyak digunakan manusia.*

Anda telah mengenal berbagai sumber energi, antara lain, energi matahari, energi panas bumi, energi angin, energi air, dan energi nuklir. Sumber utama semua energi adalah energi matahari. Energi listrik merupakan salah satu bentuk energi yang sering digunakan. Dari jaringan listrik PLN di rumah, Anda dapat melakukan berbagai kegiatan, antara lain, menyalakan lampu, komputer, menyetrika baju, mendengarkan radio, melihat siaran televisi. Hal ini menunjukkan bahwa energi listrik dapat diubah menjadi bentuk energi lain yang Anda butuhkan.

Energi listrik diperoleh dari berbagai sumber. Misalnya dari air terjun atau bendungan (PLTA), diesel (PLTD), panas bumi (PLTG), batubara (PLTU), dan nuklir (PLTN). Sumber energi fosil (minyak bumi, gas alam, batubara) merupakan jenis sumber energi yang tidak dapat diperbaharui. Oleh karena itu, Anda harus menghemat energi supaya sumber energi yang dimiliki tidak cepat habis.

## Kolom Diskusi 4.1

Untuk mengatasi agar tidak kehabisan sumber energi diupayakan dengan tiga cara yaitu konveksi, intensifikasi, dan Diversifikasi. Diskusikan dengan teman-teman Anda, apa yang dimaksud dengan ketiga hal tersebut. Diskusikan juga langkah-langkah yang sudah dilakukan pemerintah dan masyarakat yang menunjukkan upaya mengatasi agar tidak kehabisan energi. Buatlah kesimpulan dari diskusi tersebut dan kumpulkan di meja guru!

### 1. Energi Potensial

Energi potensial diartikan sebagai energi yang dimiliki benda karena keadaan atau kedudukan (posisinya). Misalnya, energi pegas (per), energi ketapel, energi busur, dan energi air terjun. Energi potensial juga dapat diartikan sebagai energi yang tersimpan dalam suatu benda. Misalnya energi kimia dan energi listrik. Contoh energi kimia adalah energi minyak bumi dan energi nuklir.

#### a. Energi Potensial Gravitasi

Energi potensial gravitasi adalah energi yang dimiliki benda karena kedudukan ketinggian dari benda lain. Secara matematis ditulis sebagai berikut.

$$E_p = m g h$$

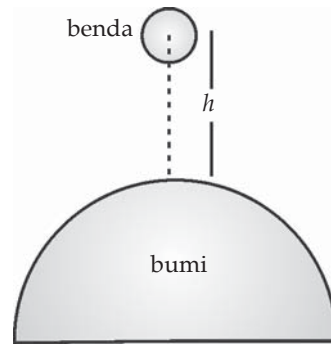
Keterangan:

$E_p$  : energi potensial gravitasi (N)

$m$  : massa benda (kg)

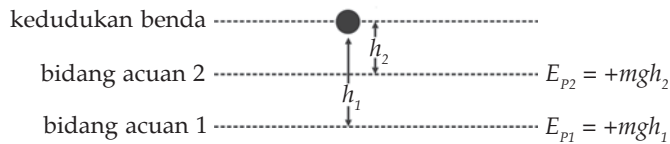
$g$  : percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

$h$  : ketinggian terhadap acuan (m)



*Gambar 4.9 Benda memiliki energi potensial karena kedudukannya.*

Energi potensial gravitasi tersebut adalah energi potensial benda terhadap bidang acuan yang terletak pada jarak  $h$  di bawah benda. Energi potensial gravitasi terhadap bidang acuan lain tentu saja berbeda besarnya. Misalnya, terhadap bidang acuan yang jaraknya  $h_1$ , di bawah kedudukan benda, maka energi potensial gravitasinya adalah  $m g h_1$ . Bidang acuan tidak harus berada di bawah kedudukan benda. Dapat saja dipilih bidang acuan yang letaknya di atas kedudukan benda. Dalam hal demikian energi potensial gravitasi memiliki nilai negatif. Namun, biasanya bidang acuan dipilih di bawah kedudukan benda.



**Gambar 4.10** Energi potensial gravitasi benda untuk berbagai bidang acuan.



## Kegiatan 4.1

### Energi Potensial

#### A. Tujuan

Anda dapat menentukan faktor-faktor yang memengaruhi energi potensial gravitasi.

#### B. Alat dan Bahan

1. Sebuah bejana atau loyang
2. Plastisin atau tanah liat basah
3. Tiga butir kelereng (2 memiliki ukuran dan massa sama, yang satu memiliki massa 2 kali massa kelereng yang lain)

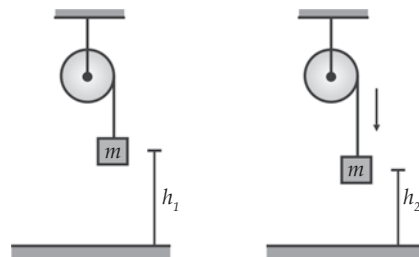
#### C. Langkah Kerja

1. Jatuhkan dua buah kelereng yang sama ukuran dan massanya ke dalam bejana yang telah diisi plastisin!
2. Ukurlah kedalaman bekas lekukan yang dihasilkan oleh tumbukan kedua kelereng pada permukaan plastisin!
3. Jatuhkan kedua kelereng tadi, namun dari ketinggian yang berbeda (ketinggian kelereng yang satu = 2 kali ketinggian kelereng lainnya)!
4. Ukurlah kedalaman bekas lekukan yang dihasilkan oleh tumbukan kedua benda pada permukaan plastisin!
5. Ulangi langkah kerja 1 sampai 4 namun menggunakan dua buah kelereng yang berbeda massanya (satu kecil satu besar)!
6. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!

### b. Hubungan Antara Usaha dengan Energi Potensial Gravitasi

Misalnya sebuah balok bermassa  $m$  diikat pada seutas tali dan tali digulung pada suatu katrol licin. Anggap katrol dan tali tak bermassa. Balok mula-mula berada pada ketinggian  $h_1$ , beberapa saat kemudia balok berada pada ketinggian  $h_2$ . Perhatikan Gambar 4.11

Turunnya balok disebabkan adanya tarikan gaya gravitasi. Besarnya usaha gaya gravitasi sama dengan gaya



**Gambar 4.11** Hubungan usaha dan energi potensial.

gravitasi ( $mg$ ) dikalikan dengan perpindahan ( $h_1 - h_2$ ). Secara matematis ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} W &= mg(h_1 - h_2) \\ &= mgh_1 - mgh_2 \\ &= E_{p1} - E_{p2} \\ &= (E_{p1} - E_{p2}) \end{aligned}$$

$$W = -\Delta E_p$$

Dengan  $\Delta E_p$  merupakan negatif perubahan energi potensial gravitasi. Besarnya energi potensial gravitasi sama dengan energi potensial akhir dikurangi energi potensial mula-mula ( $\Delta E_p = E_{p \text{ akhir}} - E_{p \text{ awal}}$ ). Persamaan ini menyatakan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi sama dengan minus perubahan energi potensial gravitasi.

#### Contoh 4.4

Hitunglah usaha yang diperlukan untuk melontarkan batu yang memiliki massa 2 kg dari permukaan bumi sampai ketinggian 10 m, jika gravitasi bumi sebesar  $9,8 \text{ m/s}^2$  dan jari-jari bumi  $6,375 \text{ km}$ !

Diketahui : a.  $m = 2 \text{ kg}$   
 b.  $h = 10 \text{ m}$   
 c.  $R = 6,375 \text{ km} = 6,375 \times 10^3 \text{ m}$   
 d.  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan :  $W = \dots ?$

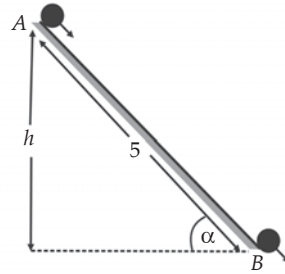
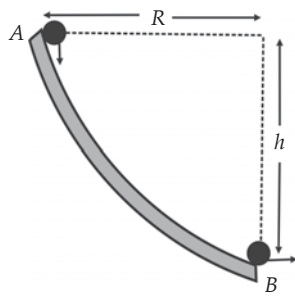
Jawab:

**Cara I:**

$$\begin{aligned} W &= \Delta E_p = E_{p \text{ akhir}} - E_{p \text{ awal}} = \left( -\frac{GMm}{R+h} - \left( -\frac{GMm}{R} \right) \right) \\ &= \left( m \frac{GM}{R^2} \frac{R^2}{R+h} - m \frac{GM}{R^2} R \right) = - \left( m \frac{GM}{R^2} mgR \right) = mg \left( \frac{R^2}{R+h} - R \right) \\ &= -mg \left( \frac{R^2}{R+h} - \frac{R(R+h)}{R+h} \right) = -mg \left( \frac{R^2 + R^2 + Rh}{R+h} \right) = mg \left( \frac{Rh}{R+h} \right) \\ &= 2 \times 9,8 \left( \frac{6,375 \times 10^3 \cdot 10}{6,375 \times 10^3 + 10} \right) = 196 \text{ J} \end{aligned}$$

**Cara II**

$$\begin{aligned} W &= \Delta E_p = E_{p \text{ akhir}} - E_{p \text{ awal}} \\ &= mgh - 0 \\ &= 2 \times 9,8 \cdot 10 \\ &= 196 \text{ J} \end{aligned}$$



**Gambar 4.12** Energi potensial gravitasi pada (a) bidang melingkar dan (b) bidang miring.

Perhatikan Gambar 4.12! Energi potensial gravitasi pada umumnya terjadi pada benda jatuh bebas atau memiliki lintasan yang lurus. Untuk bidang melingkar dan bidang miring, persamaan energi potensial gravitasinya adalah sebagai berikut.

Untuk bidang melingkar:

$$E_{pA} = m g h = m g R \text{ dan } E_{pB} = 0$$

Untuk bidang miring:

$$E_{pA} = m g h = m g s \sin \alpha \text{ dan } E_{pB} = 0$$

## 2. Energi Kinetik

*Energi kinetik* adalah energi yang dimiliki oleh benda karena geraknya. Di SMP, Anda sudah mempelajari energi kinetik secara kuantitatif. Sekarang Anda akan mempelajari energi kinetik secara kualitatif, yaitu menurunkan rumus energi kinetik. Secara umum energi kinetik suatu benda yang memiliki massa  $m$  dan bergerak dengan kecepatan  $v$  dirumuskan oleh persamaan berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Pada persamaan diatas tampak bahwa energi kinetik sebanding dengan massa  $m$  dan kuadrat kecepatan ( $v^2$ ).

### Contoh 4.5

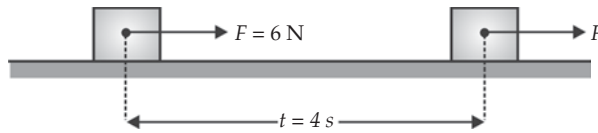
Sebuah gaya sebesar 6 N bekerja pada sebuah balok bermassa 2 kg secara horizontal selama 4 s. Hitunglah energi kinetik akhir yang dimiliki balok tersebut!

Diketahui : a.  $F = 6 \text{ N}$   
b.  $m = 2 \text{ kg}$   
c.  $t = 4 \text{ s}$

Ditanyakan :  $E_k = \dots?$



Jawab:



Berdasarkan hukum II Newton Anda peroleh percepatan yang dialami balok sebesar  $a = \frac{F}{m} = \frac{6}{2} = 3 \text{ m/s}^2$  dan rumus gerak lurus

berubah beraturan untuk kecepatan awal  $v_0 = 0$  adalah:

$$v = a t = 3 \times 4 = 12 \text{ m/s}$$

Energi kinetik akhir yang dimiliki balok adalah

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (2) (12)^2 = 144 \text{ J}$$



## Kegiatan 4.2

### Energi Kinetik

#### A. Tujuan

Anda dapat menentukan faktor-faktor yang memengaruhi energi kinetik

#### B. Alat dan Bahan

1. Dua buah papan rata yang permukaannya halus
2. Sebuah buku tebal
3. Dua buah bola dengan massa berbeda
4. Dua buah kotak karton (rusuk kira-kira 5 cm) dengan satu ujungnya terbuka
5. Sebuah mistar plastik tebal

#### C. Langkah Kerja

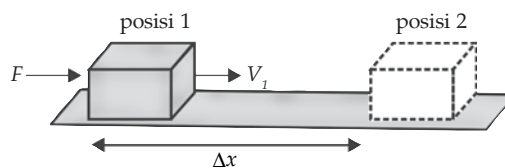
1. Letakkan kedua papan sejajar satu sama lain di lantai, dengan jarak pisah kira-kira 15 cm!
2. Naikkan salah satu dari tiap papan dengan mengganjalnya dengan sebuah buku tebal, sehingga setiap papan menjadi bidang miring!
3. Letakkan tiap kotak di dasar bidang miring sedemikian hingga ujung terbuka kotak dapat menangkap bola baja yang meninggalkan bidang miring!
4. Buatlah tabel seperti di bawah ini!

**Tabel Hasil Pengamatan**

Keterangan	Jarak Tempuh Kotak Ketika Ditabrak	
	Bola Ringan	Bola Berat
Percobaan 1		
Percobaan 2		
Percobaan 3		
Total		
Jarak rata-rata		

5. Letakkan sebuah mistar yang merintangi kedua bidang miring di dekat puncak bidang miring, kemudian letakkan sebuah bola pada tiap bidang miring tepat di belakang mistar!
6. Angkatlah mistar secara cepat untuk membebaskan kedua bola pada saat bersamaan!
7. Ukur dan catatlah jarak yang ditempuh oleh kotak setelah ditabrak bola pada tabel yang telah Anda siapkan!
8. Kembalikan kotak pada posisi awalnya didasar bidang miring dan ulangi langkah ke 5, 6, 7 paling sedikit tiga kali!
9. Hitunglah jarak rata-rata yang ditempuh oleh kotak!
10. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!

Hubungan energi kinetik dengan usaha dijelaskan sebagai berikut. Sebuah benda pada posisi 1 bergerak dengan kelajuan  $v_1$ . Kemudian benda dikenai gaya luar  $F$ , sehingga benda bergerak dipercepat beraturan. Dalam selang waktu  $t$  benda berpindah sejauh  $\Delta x$  dari posisi 1 ke posisi 2. Pada posisi 2 benda bergerak dengan kelajuan  $v_2$ . Perhatikan Gambar 4.13!



**Gambar 4.13 Hubungan usaha dan energi kinetik**

Pada posisi 1, benda bergerak dengan kelajuan  $v_1$ , kemudian pada benda bekerja gaya  $F$ , sehingga benda berpindah sejauh  $\Delta x$ . Usaha yang dilakukan oleh gaya  $F$  pada benda adalah  $W = F \Delta x$ . Usaha dan energi adalah besaran skalar yang setara, maka Anda dapat pastikan bahwa penambahan energi kinetik berasal dari usaha  $W = F \Delta x$ . Secara matematis Anda akan dapat persamaan seperti berikut.

$$\Delta E_k = W = F \Delta x$$

$$E_{k2} - E_{k1} = m a \Delta x \dots\dots\dots(1)$$

Anda sudah mempelajari kinematika gerak lurus. Persamaan gerak untuk gerak lurus berubah beraturan di antaranya adalah  $v_2^2 = v_1^2 + 2 a \cdot \Delta x$ . Kita tulis kembali persamaan tersebut.

$$v_2^2 = v_1^2 + 2 a \cdot \Delta x$$

$$\Delta x = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} \dots\dots\dots (2)$$

Substitusi persamaan (1) ke persamaan (2)

$$E_{k2} - E_{k1} = \frac{m a}{2 a} (v_2^2 - v_1^2)$$

$$W = E_{k2} - E_{k1} = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

Persamaan ini dikenal sebagai teorema usaha-energi kinetik. Teorema ini menyatakan bahwa usaha yang dilakukan oleh resultan gaya suatu benda sama dengan perubahan energi kinetik yang dialami benda.

#### Contoh 4.6

Seorang anak meluncur tanpa gesekan dengan alat skinya dari atas sebuah bukit yang kemiringannya  $37^\circ$ . Jika ia meluncur dari ketinggian 10 m. Tentukan kecepatannya ketika tiba di dasar bukit! ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ )

Diketahui : a.  $h = 10 \text{ m}$   
b.  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan :  $v = \dots?$

Jawab:

Hukum kekekalan energi

$$E_{k \text{ awal}} + E_{p \text{ awal}} = E_{k \text{ akhir}} + E_{p \text{ akhir}}$$

$$0 + m g h = \frac{1}{2} m v^2 + 0$$

$$m g h = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

$$= \sqrt{2 \times 98 \times 10}$$

$$= 14 \text{ m/s}$$

## Soal Kompetensi 4.2

1. Anak kuda dengan induknya mempunyai kelajuan yang sama kalau berlari kencang. Namun, induk kuda mempunyai energi kinetik yang lebih besar dari anak kuda. Jelaskan, maksudnya!
2. Seekor kera berayun dari suatu tempat ke tempat lain yang tingginya 1,5 m lebih tinggi dari tempat semula. Jika massa kera 8 kg hitung berapa perubahan energi potensial kera tersebut?
3. Mobil A dan B yang identik masing-masing bergerak dengan kecepatan 80 km/jam dan 50 km/jam. Tiba-tiba kedua mobil tersebut direm secara bersamaan hingga berhenti. Hitung perbandingan jarak yang ditempuh kedua mobil tersebut hingga berhenti!
4. Seorang pemain ski dengan massa  $m$  meluncur menuruni bukit licin yang mempunyai sudut kemiringan tetap. Pemain ski diam pada ketinggian  $h$ . Carilah usaha yang dilakukan oleh pemain ski dan carilah kelajuan pemain ski di kaki bukit!

### 3. Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Energi mekanik didefinisikan sebagai penjumlahan antara energi kinetik dan energi potensial. Untuk lebih memahami energi kinetik perhatikan sebuah bola yang dilempar ke atas. Kecepatan bola yang dilempar ke atas makin lama makin berkurang. Makin tinggi kedudukan bola (energi potensial gravitasi makin besar), makin kecil kecepatannya (energi kinetik bola makin kecil). Saat mencapai keadaan tertinggi, bola akan diam. Hal ini berarti energi potensial gravitasinya maksimum, namun energi kinetiknya minimum ( $v = 0$ ).

Pada waktu bola mulai jatuh, kecepatannya mulai bertambah (energi kinetiknya bertambah) dan tingginya berkurang (energi potensial gravitasi berkurang). Berdasarkan kejadian di atas, seolah terjadi semacam pertukaran energi antara energi kinetik dan energi potensial gravitasi. Apakah hukum kekekalan energi mekanik berlaku dalam hal ini?

Misalkan terdapat suatu benda yang dijatuhkan dari ketinggian  $h_A$  di atas tanah. Pada ketinggian tersebut benda memiliki  $E_{PA} = m g h_A$  terhadap tanah dan  $E_{KA} = 0$ . Kemudian dalam selang waktu  $t$  benda jatuh sejauh  $h_B$  (jarak benda dari tanah  $h_A - h_B$ ). Persamaan energi mekaniknya menjadi seperti berikut.

$$\begin{aligned}E_{MA} &= E_{MB} \\E_{PA} + E_{KA} &= E_{PB} + E_{KB} \\m g h_A + 0 &= m g (h_A - h_B) + \frac{1}{2} m v^2 \\m g h_A &= (m g h_A - m g h_B) + \frac{1}{2} m v^2\end{aligned}$$

Berdasarkan rumus jatuh bebas, benda yang jatuh sejauh  $h_B$  memiliki kecepatan sebesar  $v_A = \sqrt{2gh_B}$ .

$$m g h_A = (m g h_A - m g h_B) + \frac{1}{2} m (\sqrt{2gh_B})^2$$

$$m g h_A = m g h_A - m g h_B + \frac{1}{2} m 2 g h_B$$

$$m g h_A = m g h_A - m g h_B + m g h_B$$

$$m g h_A = m g h_A$$

Persamaan di atas membuktikan bahwa energi mekanik yang dimiliki oleh suatu benda adalah kekal (tetap). Pernyataan ini disebut hukum kekekalan energi mekanik. Hukum kekekalan energi mekanik dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_{MA} &= E_{MB} \\ E_{PA} + E_{KA} &= E_{PB} + E_{KB} \\ m g h_A + \frac{1}{2} m v_A^2 &= m g h_B + \frac{1}{2} m v_B^2 \end{aligned}$$

Perlu digaris bawahi bahwa hukum kekekalan energi mekanik berlaku hanya jika tidak ada energi yang hilang akibat adanya gaya konservatif. Misalnya akibat gesekan udara maupun gesekan antara dua bidang yang bersentuhan. *Gaya konservatif* adalah gaya yang tidak bergantung pada lintasan, tetapi hanya ditentukan oleh keadaan awal dan akhir.

#### Contoh 4.7

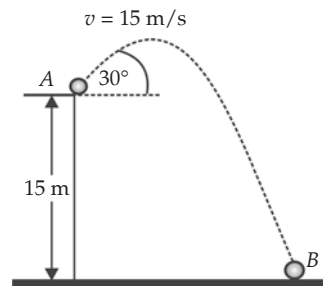
Perhatikan gambar disamping! Sebuah benda dilemparkan dari sebuah gedung yang tingginya 15 m. Kecepatan awal bola ketika dilempar 15 m/s dengan arah  $30^\circ$  di atas garis horizontal. Berapakah kelajuan bola sesaat sebelum menumbuk tanah ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )!

- Diketahui :
- a.  $h_A = 15 \text{ m}$
  - b.  $v_A = 15 \text{ m/s}$
  - c.  $\alpha = 30^\circ$
  - d.  $g = 10 \text{ m/s}^2$
  - e.  $h_B = 0 \text{ m}$

Ditanyakan :  $v_A = \dots?$

Jawab:

Untuk mencari besaran yang dinyatakan yaitu kelajuan saat akan menumbuk tanah  $v_A$  lebih cepat Anda gunakan rumus hukum kekekalan energi mekanik dibanding rumus gerak peluru.



$$m g h_A + \frac{1}{2} m v_A^2 = m g h_B + \frac{1}{2} m v_B^2$$

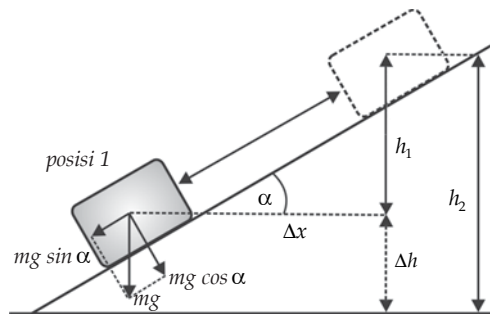
$$m g h_A + \frac{1}{2} m v_A^2 = \frac{1}{2} m v_B^2$$

$$\begin{aligned} g h_A + \frac{1}{2} v_A^2 &= \frac{1}{2} v_B^2 \Rightarrow v_B = \sqrt{\frac{g h_A + \frac{1}{2} (v_A)^2}{\frac{1}{2}}} \\ &= \sqrt{\frac{10 \cdot 15 + \frac{1}{2} (15)^2}{\frac{1}{2}}} \\ &= \sqrt{131,25} \\ &= 11,456 \text{ m/s} \end{aligned}$$

### a. Gaya Konservatif

Usaha yang dilakukan oleh gaya konservatif untuk berpindah antara dua posisi tertentu hanya bergantung pada kedua posisi tersebut, dan tidak bergantung pada jalan yang ditempuh. Contoh gaya konservatif adalah gaya gravitasi dan gaya pegas.

Sekarang Anda akan membahas gaya gravitasi sebagai gaya konservatif. Perhatikan Gambar 4.14! Berapakah usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi konstan untuk benda yang berpindah dari posisi 1 ke posisi 2 pada gambar tersebut? Sesuai definisi usaha, usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi konstan  $W = m g$ . Untuk benda yang berpindah dari posisi 1 ke posisi 2, maka usaha sebesar selisih dari energi potensial gravitasinya.



**Gambar 4.14** Usaha yang dilakukan benda untuk pindah posisi ditentukan dari posisi awal dan akhirnya.

$$\begin{aligned} W_{1-2} &= W_{\text{berat}} \times \Delta x = \Delta E_p \\ &= W \sin \alpha (-\Delta x) \\ &= m g (-\Delta x \times \sin \alpha) \end{aligned}$$

Karena  $\Delta x$ , maka:

$$W_{1-2} = -m g \Delta h = -m g (h_2 - h_1)$$

Pada persamaan di atas tampak bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi konstan dan tidak bergantung pada jalan yang ditempuh. Gaya ini hanya bergantung pada ketinggian vertikal kedua posisi tersebut dari bidang acuan yang dipilih (tergantung dari posisi akhir dan posisi awal benda).

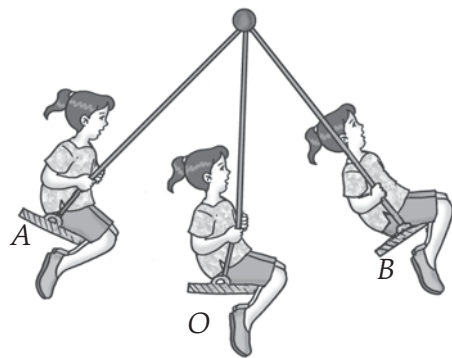
### b. Aplikasi Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Salah satu aplikasi hukum kekekalan energi mekanik dalam kehidupan sehari-hari adalah pada permainan bilyar. Misalnya, bola bilyar *A* menumbuk bola bilyar *B* yang sedang diam. Pada peristiwa tumbukan bola bilyar dianggap tidak ada energi yang hilang jadi panas dan tidak ada gaya gesekan sehingga hukum kekekalan energi mekanik berlaku. Karena energi potensial semua bola sama sebelum dan sesudah tumbukan, maka energi kinetik kedua bola bilyar sebelum dan sesudah tumbukan sama besar. Jadi, ketika bola *A* kehilangan sejumlah energi kinetik, maka bola *B* akan menerima tambahan energi kinetik sebesar energi kinetik yang hilang dari bola *A*.

Contoh lain aplikasi hukum kekekalan energi mekanik adalah pada permainan ayunan, perhatikan Gambar 4.15! Mula-mula usaha luar diberikan kepada sistem untuk membawa ayunan dari titik terendah *O* ke titik tertinggi *A* dan *B*. Di titik *A* dan *B*, sistem memiliki energi potensial maksimum dan energi kinetiknya nol. Ketika sistem mulai berayun, energi potensial mulai berkurang karena sebagian energi potensial diubah menjadi energi kinetik (sesuai dengan hukum kekekalan energi mekanik).

Pada waktu ayunan mencapai titik *O* energi potensial bandul nol karena semua energi potensialnya telah berubah menjadi energi kinetik. Selanjutnya pada perjalanan dari *O* ke *B* energi kinetik makin kecil karena sebagian energi kinetik diubah menjadi energi potensial. Ketika bandul tiba di *B* seluruh energi kinetik bandul telah diubah menjadi energi potensial (di titik ini energi potensial maksimum).

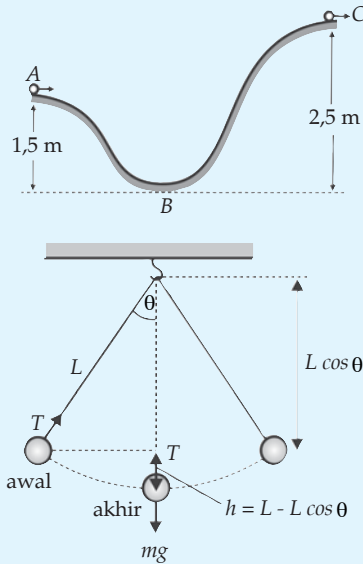
Jika selama ayunan berlangsung ada hambatan udara maka hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku lagi. Ayunan makin lama makin melemah dan bandul tidak akan mencapai titik *A*. Suatu saat akhirnya bandul akan berhenti. Ketika Anda ukur suhu bandul yang sudah berhenti ini dengan alat yang memiliki ketelitian tinggi, maka akan terbaca suhu bandul naik. Hal ini menunjukkan bahwa hambatan udara menyebabkan sebagian energi mekanik sistem berubah menjadi energi panas. Contoh lain peristiwa sehari-hari yang sesuai hukum frekuensi energi mekanik adalah lompat galah dan buah jatuh bebas dari pohonnya.



**Gambar 4.15** Contoh aplikasi hukum kekekalan energi mekanik.

### Soal Kompetensi 4.1

1. Apakah keuntungan dan kerugian dalam memecahkan soal-soal mekanika dengan menggunakan metode hukum kekekalan energi dibandingkan dengan menggunakan hukum Newton?
2. Perhatikan gambar di samping! Sebuah benda bermassa 0,25 kg bergerak dengan kecepatan 5 m/s di titik A. hitunglah kecepatan benda di titik C, jika  $g$  sebesar  $10 \text{ m/s}^2$ !
3. Perhatikan gambar disamping! Sebuah bandul terdiri atas beban bermassa  $m$  yang diikat pada sebuah tali yang panjangnya  $L$ . Bandul ini ditarik ke samping sehingga tali membentuk sudut  $\alpha$  dan dilepas dari keadaan diam. Carilah kelajuan  $v$  didasar ayunan dan tegangan tali pada saat itu!



### Rangkuman

1. Usaha adalah perkalian antara besaran gaya dengan perpindahan benda.
2. Persamaan usaha yang dilakukan gaya membentuk sudut sembarang adalah  $W = F \cdot s \cos \alpha$
3. Persamaan usaha oleh berbagai gaya secara serentak adalah
$$W = \left( \sum_{n=1}^n F_{xn} \right) s.$$
4. Energi potensial dirumuskan  $E_p = m g h$
5. Persamaan yang menunjukkan hubungan antara usaha dengan energi potensial gravitasi adalah  $W = \Delta E_p.$
6. Persamaan energi kinetik adalah  $E_k = \frac{1}{2} m v^2.$



7. Persamaan yang menunjukkan hubungan energi kinetik dengan usaha adalah  $\Delta E_k = W$
8. Persamaan hukum kekekalan energi adalah  $E_{MA} = E_{MB}$ .
9. Gaya konservatif adalah gaya yang tidak bergantung pada lintasan, tapi ditentukan oleh keadaan awal dan akhir.

### Kolom Ilmuwan

Buatlah sebuah kincir air mini untuk menggerakkan dinamo sepeda. Anda dapat menggunakan air di ember yang ditempatkan di tempat yang tinggi sebagai air terjun buatan. Dengan mengubah-ubah ketinggian letak air dan debit air yang mengalir, amati tegangan yang dihasilkan. Karya Anda ini merupakan miniatur dari PLTA. PLTA merupakan salah satu sistem yang memanfaatkan hukum kekekalan energi mekanik. Buatlah kesimpulan dari kegiatan ini. Tulis kelebihan dan kekurangan kincir air buatan Anda!

### Info Kita

#### Tangga Berjalan (Eskalator)



Anda tentu pernah melihat tangga yang biasanya terdapat di pusat-pusat perbelanjaan. Berbeda dengan lift yang hanya dapat mengangkut beberapa orang sekali jalan, tangga berjalan (eskalator) dapat mengangkut 10 orang lebih banyak daripada lift. Sekitar 100 tahun yang lalu, orang-orang di Amerika Serikat menggunakan eskalator pertama di dunia. Alat ini ditemukan oleh Jesse W. Reno, pada tahun 1894.

Bagaimana cara kerja eskalator tersebut? Di dalam motor listrik terdapat kekuatan untuk menggerakkan eskalator. Motor menyebabkan rantai terus berputar. Rantai tersebut tidak pernah berhenti, sehingga disebut *rantai yang tidak terputus*. Eskalator terbuat dari lempeng kayu kecil atau logam yang terus berputar pada rantai yang tidak terputus. Tiap lempeng memiliki roda kecil yang makin banyak di sepanjang rel yang ada di bawahnya. Saat eskalator naik, roda-rodanya akan meluncur di sepanjang rel untuk mendorong setiap lempeng ke pijakan. Rel akan memindahkan pijakan naik satu per satu, seperti tangga. Bagian paling atas tangga akan melebar dan pijakan menjadi rata. Tangga akan ke bawah menggunakan rantai. Pijakan masih tetap rata saat muncul dari bagian bawah eskalator. Rel pegangan yang Anda pegang juga selalu berputar, karena motor yang menjalankan rantai juga menjalankan rel pegangan. Rel pegangan bergerak dengan kecepatan yang sama dengan pijakan yang digerakkan oleh sistem katrol.

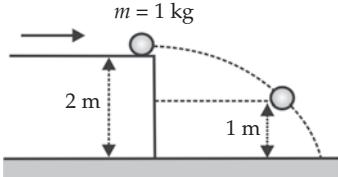
Eskalator membawa orang dari lantai bawah ke lantai atas atau dari lantai atas ke lantai bawah. Pijakan yang bergerak sepanjang rantai dan tidak pernah berhenti, digerakkan oleh motor listrik. Roda katrol yang ada di bagian paling atas mempermudah eskalator untuk membawa orang naik atau turun.

*(Dikutip seperlunya dari Cara Bekerjanya Gerakan, Mandira Jaya Abadi, 1996)*

## P e l a t i h a n

**A. Pilihlah jawaban yang tepat dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!**

1. Sebuah balok bermassa 3 kg bergerak ke atas pada bidang miring yang memiliki sudut  $60^\circ$ , dengan energi kinetik awal 18 J. Jika koefisien gesekannya 0,3, maka jarak terjauh yang dicapai balok pada saat meluncur pada bidang miring adalah ....
  - a. 1 m
  - d. 0,4 m
  - b. 0,8 m
  - e. 0,2 m
  - c. 0,6 m
  
2. Jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk mempercepat gerak sebuah mobil dari keadaan diam menjadi kelajuan  $v$  adalah  $Q$ . Bila gesekan diabaikan, maka jumlah bahan bakar tambahan yang diperlukan untuk menaikkan kelajuan mobil tersebut dari  $v$  menjadi  $2v$  adalah ....
  - a.  $Q/2$
  - b.  $Q$
  - c.  $2Q$
  - d.  $3Q$
  - e.  $4Q$
  
3. Perhatikan gambar di samping! Suatu partikel dengan massa 1 kg didorong dari permukaan meja hingga kecepatan pada saat lepas dari bibir meja sebesar 2 m/s. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka energi mekanik partikel pada saat ketinggiannya dari tanah 1 m adalah ...
 

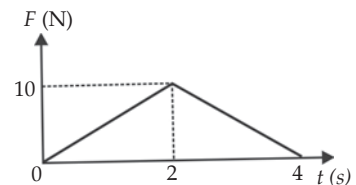


  - a. 2 J
  - d. 22 J
  - b. 10 J
  - e. 24 J
  - c. 12 J
  
4. Dua buah benda A dan B yang bermassa masing-masing  $m$  jatuh bebas dari ketinggian  $h$  meter dan  $2h$  meter. Jika A menyentuh tanah dengan kecepatan  $v \text{ m/s}$ , maka benda B akan menyentuh tanah dengan energi kinetik sebesar ....
  - a.  $\frac{3}{2}mv^2$
  - d.  $\frac{1}{2}mv^2$
  - b.  $mv^2$
  - e.  $\frac{1}{4}mv^2$
  - c.  $\frac{3}{4}mv^2$

5. Sebuah mobil bermassa  $m$  memiliki mesin berdaya  $P$ . Jika pengaruh gesekan kecil, maka waktu minimum yang diperlukan mobil agar mencapai kelajuan  $v$  dari keadaan diam adalah ....

- $\frac{mv}{P}$
- $\frac{P}{mv}$
- $\frac{2P}{mv^2}$
- $\frac{mv^2}{2P}$
- $\frac{mv^2}{P}$

6. Perhatikan gambar grafik di samping ! Grafik di atas menyatakan gaya yang bekerja pada suatu benda bermassa 2 kg pada selang (kurun) waktu 4 sekon. Kalau benda tersebut mula-mula diam, maka besarnya energi kinetik setelah 4 sekon adalah ...

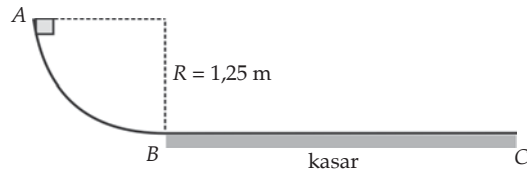


- 50 J
  - 100 J
  - 200 J
  - 300 J
  - 400 J
7. Sebuah benda yang bergerak dengan kecepatan awal  $v_0$  di atas permukaan mendatar, berhenti setelah menempuh jarak  $s$  karena pengaruh gaya gesekan kinetis. Jika koefisien gesekan kinetis adalah  $\mu_k$  dan percepatan gravitasi sama dengan  $g$ , maka besarnya  $v_0$  adalah ....

- $\sqrt{\mu_k g s}$
- $\sqrt{2\mu_k g s}$
- $\sqrt{3\mu_k g s}$
- $\sqrt{4\mu_k g s}$
- $\sqrt{5\mu_k g s}$

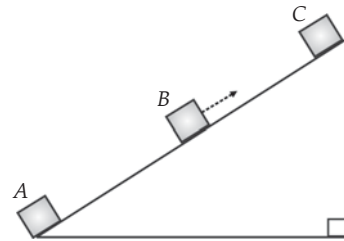
8. Perhatikan gambar di samping!

Benda dilepaskan dari puncak seperempat lingkaran, lalu berhenti di titik C yang berjarak 5 m dari B. Koefisien gesekan kinetis permukaan BC jika AB licin adalah ....



- a. 0,1
- b. 0,2
- c. 0,25
- d. 0,40
- e. 0,5

9. Perhatikan gambar di samping! Sebuah balok bermassa 25 kg semula diam di titik A. Gaya  $F$  sebesar 120 N bekerja pada benda tersebut sehingga benda bergerak terus menaiki bidang miring. Ternyata besar kecepatan benda ketika melalui titik C adalah 2 m/s. Jika diketahui  $BC = 3$  m dan  $AC = 20$  m, maka besar gaya gesekan yang bekerja pada balok adalah ....



- a. 40 N
- b. 50 N
- c. 64 N
- d. 75 N
- e. 80 N

10. Dua buah benda masing-masing memiliki massa  $A$  kg dan  $B$  kg. Jika kedua benda mula-mula diam kemudian mengalami gaya yang sama besar dan dalam selang waktu yang sama, maka perbandingan energi kinetik benda A terhadap B tepat pada akhir waktu diberikannya gaya adalah ....

- a. 1
- b.  $\frac{B}{A}$
- c.  $\frac{A}{B}$
- d.  $\left(\frac{B}{A}\right)^2$
- e.  $\left(\frac{A}{B}\right)^2$

### B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!

1. Sebuah gaya  $F = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j})$  N melakukan usaha dengan titik tangkapnya berpindah menurut  $r = (4\mathbf{i} + a\mathbf{j})$  m dan vektor  $\mathbf{i}$  dan  $\mathbf{j}$  berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu  $X$  dan sumbu  $Y$  pada koordinat kartesian. Bila usaha tersebut bernilai 26 J, maka hitunglah nilai  $a$ !
2. Dua buah kapal layar  $A$  dan  $B$  yang mempunyai layar sama besar akan mengadakan lomba. Massa kapal  $A = m$  dan massa kapal  $B = 2m$ , sedangkan gaya gesekan dapat diabaikan. Jarak yang ditempuh sebesar  $s$  dan lintasannya berupa garis lurus. Pada saat berangkat (start) sampai garis finish, kedua kapal layar memperoleh gaya dari angin sebesar  $F$ . Jika energi kinetik kapal  $A$  dan kapal  $B$  pada saat di garis finis berturut-turut besarnya  $E_{kA}$  dan  $E_{kB}$ , maka hitunglah besarnya perbandingan energi kinetik kapal  $A$  dan  $B$  saat di tiba di garis finish!
3. Sebuah tongkat yang panjangnya 40 cm dan tegak di atas permukaan tanah dijatuhkan martil 10 kg dari ketinggian 50 cm di atas ujungnya. Bila gaya tahan rata-rata tanah  $10^3$  N, maka hitunglah banyaknya tumbukan martil yang perlu dilakukan terhadap tongkat agar menjadi rata dengan permukaan tanah!
4. Sebuah palu bermassa 2 kg dan berkecepatan 20 m/s menghantam sebuah paku sehingga paku ini masuk ke dalam kayu 5 cm. Hitunglah besar gaya tahanan yang disebabkan kayu tersebut!
5. Sebuah peluru dengan massa 20 gram ditembakkan dengan sudut elevasi  $30^\circ$  dan dengan kecepatan 40 m/s. Jika gesekan dengan udara diabaikan, maka tentukan energi potensial peluru pada titik tertinggi!
6. Sebuah kotak bermassa 10 kg mula-mula diam, kemudian bergerak turun pada bidang miring yang membuat sudut  $30^\circ$  terhadap arah horizontal tanpa gesekan dan menempuh jarak 10 m sebelum sampai ke bidang mendatar. hitunglah kecepatan kotak pada akhir bidang miring jika percepatan gravitasi bumi sebesar  $9,8 \text{ m/s}^2$ !
7. Sebuah pistol mainan bekerja dengan menggunakan pegas untuk melontarkan peluru. Jika pistol yang sudah dalam keadaan terkong, yaitu dengan menekan pegas sejauh  $X$ , diarahkan dengan membuat sudut elevasi  $\alpha$  terhadap bidang horizontal, maka peluru yang terlepas dapat mencapai ketinggian  $h$ . Jika massa peluru adalah  $m$  dan percepatan massa peluru adalah  $m$  dan percepatan gravitasi adalah  $g$ , maka tentukan konstanta pegasnya!
8. Sebuah benda bermassa 2 kg terletak di tanah. Benda tersebut ditarik vertikal ke atas dengan gaya 25 N selama 2 detik, lalu dilepaskan. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan energi kinetik benda pada saat mengenai tanah!

9. Sebuah benda dengan massa 2,5 kg jatuh bebas dari ketinggian 3 m terhadap lantai ( $g = 10 \text{ ms}^{-2}$ ). Bila benda menumbuk lantai yang tidak lenting sama sekali, maka hitunglah kalor yang ditimbulkan oleh benda!
10. Sebuah benda bermassa 0,10 kg jatuh bebas vertikal dari ketinggian 2 m ke hamparan pasir. Jika benda tersebut masuk sedalam 2 cm ke dalam pasir sebelum berhenti, maka hitunglah besar gaya rata-rata yang dilakukan pasir untuk menghambat benda!

# Bab

# V

## Momentum dan Impuls



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menunjukkan hubungan antara konsep impuls dan momentum untuk menyelesaikan masalah tumbukan.



Sumber: CD Clipart

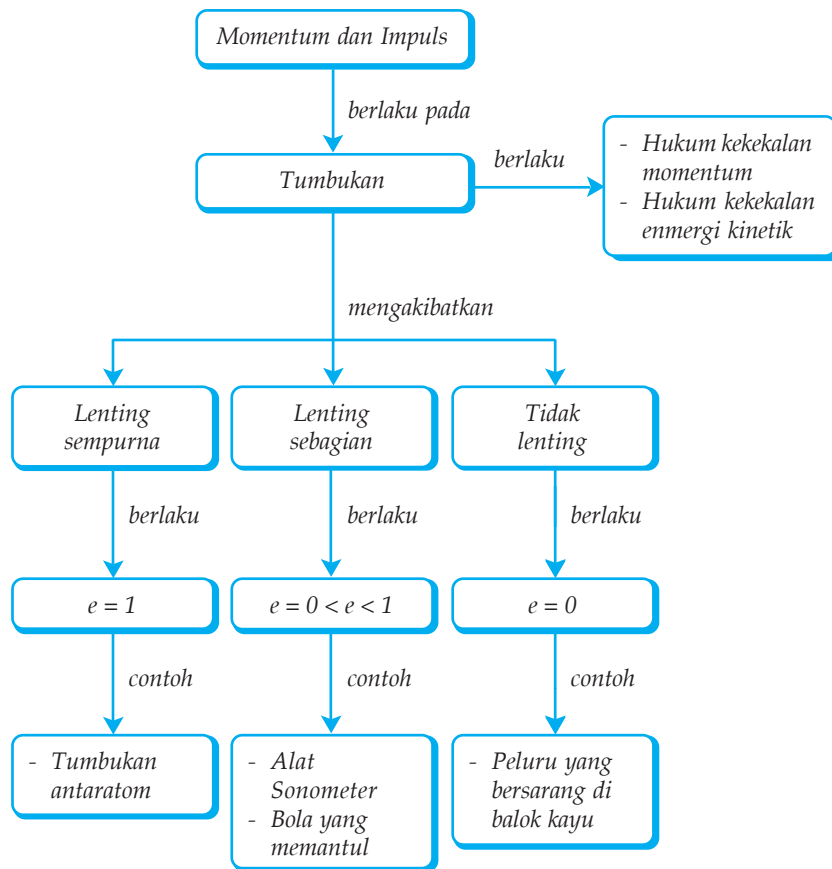
Anda mungkin salah satu penggemar olahraga balap motor, Moto GP misalnya. Pada setiap balapan, selain memakai helm, pembalap juga memakai seperangkat baju yang kelihatan aneh. Tahukah Anda cara kerja baju dan helm dalam melindungi pembalap saat terjadi kecelakaan?

### Kata Kunci

- |            |                    |                             |
|------------|--------------------|-----------------------------|
| • Momentum | • Gaya Luar        | • Ayunan Balistik           |
| • Hukum    | • Gaya Dalam       | • Koefisien Restitusi       |
| • Tumbukan | • Lenteng Sebagian | • Tidak Lenteng Sama Sekali |
| • Impuls   | • Lenteng Sempurna | • Gaya Impulsif             |



## Peta Konsep



Di kelas X, Anda telah mempelajari perbedaan antara kecepatan dan kelajuan. Kecepatan dapat didefinisikan sebagai hasil bagi antara perpindahan dengan selang waktunya, sedang kelajuan didefinisikan sebagai hasil bagi antara jarak yang ditempuh dengan selang waktu. Oleh karena itu, kecepatan merupakan besaran vektor, sedangkan kelajuan merupakan besaran skalar. Selain itu, Anda juga telah mempelajari hubungan antara besar percepatan, besar kecepatan, dan jarak dalam gerak lurus berubah beraturan. Anda juga telah mempelajari hukum-hukum Newton pada bab IV di kelas X. Ada tiga hukum Newton tentang gerak, yaitu hukum I Newton, hukum II Newton, dan hukum III Newton.

Pada bab ini Anda akan mempelajari konsep impuls dan momentum. Kedua konsep ini baru bagi Anda karena belum pernah dikenalkan di SMP. Momentum memiliki arti yang berbeda dengan arti keseharian. Anda mungkin pernah mendengar orang mengatakan “Saat ini adalah momentum yang tepat untuk meluncurkan produk baru”. Momentum dalam fisika merupakan ukuran kesukaran dalam memberhentikan suatu benda yang bergerak. Oleh karena itu, momentum erat hubungannya dengan massa dan kecepatan.

Konsep ini juga mempelajari kejadian tumbukan dua benda atau lebih dan menganalisis gerak. Mempelajari hukum kekekalan momentum merupakan salah satu konsep penting dalam fisika. Ilmuwan yang berjasa pada penemuan hukum kekekalan momentum, antara lain, John Willis, Cristopher Wren, dan Christiam Huygens.

## A. Momentum, Impuls, dan Hubungannya

“Gunakan selalu sabuk pengaman”. Peringatan ini biasanya Anda jumpai di tepi jalan raya. Sabuk pengaman (*seat belt*) berguna mencegah seorang pengemudi berbenturan langsung dengan setir dan dinding depan mobil saat mobil mengalami kecelakaan. Pada saat sabuk pengaman bekerja melindungi pengemudi, di situ terlibat prinsip-prinsip momentum dan impuls. Apa sebenarnya momentum dan impuls itu? Untuk mengetahuinya, pelajailah bahasan berikut dengan saksama.

### 1. Momentum

Setiap benda yang bergerak pasti memiliki momentum. Momentum merupakan hasil kali antara massa dengan kecepatan benda. Karena kecepatan merupakan besaran vektor, maka momentum juga termasuk besaran vektor yang arahnya sama dengan arah kecepatan benda. Secara matematis, persamaan momentum dapat ditulis sebagai berikut.

$$p = m \times v$$

Keterangan:

$p$  : momentum benda (kg m/s)

$m$  : massa benda (kg)

$v$  : kecepatan benda (m/s)

## 2. Impuls

Impuls benda didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya dengan selang waktu gaya itu bekerja pada benda. Impuls termasuk besaran vektor yang arahnya sama dengan arah gaya. Untuk menghitung besar impuls dalam satu arah dapat Anda gunakan persamaan berikut.

$$I = F \Delta t$$

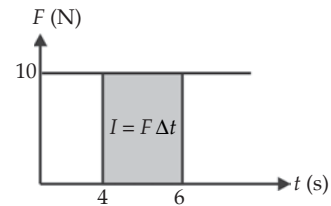
Keterangan:

$I$  : besar impuls (Ns)

$F$  : gaya yang bekerja pada benda (N)

$\Delta t$  : selang waktu (s)

Perhatikan Gambar 5.1! Impuls yang dilakukan oleh sebuah gaya besarnya sama dengan luas daerah di bawah grafik terhadap waktu (grafik  $F$  terhadap  $t$ ). Misalnya, gaya 10 N bekerja selama selang waktu  $\Delta t = 2$  s. Impuls yang dilakukan gaya tersebut adalah 20 Ns. Luas daerah yang diarsir di bawah grafik  $F$  terhadap  $t$  sama dengan  $(10 \text{ N}) \times (2 \text{ s}) = 20 \text{ Ns}$ .



Gambar 5.1 Grafik impuls.

## 3. Hubungan Momentum dan Impuls

Sebuah benda yang massanya  $m$  mula-mula bergerak dengan kecepatan  $v_0$ . Kemudian dalam selang waktu  $\Delta t$  kecepatan benda tersebut berubah menjadi  $v$ . Menurut hukum II Newton, jika benda menerima gaya yang searah dengan gerak benda, maka benda akan dipercepat. Percepatan rata-rata yang disebabkan oleh gaya  $F$  sebagai berikut.

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

Menurut definisi, percepatan rata-rata adalah perubahan kecepatan persatuan waktu. Jadi, persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut.

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

Jika  $t$  adalah waktu untuk mengubah kecepatan dari  $v_0$  menjadi  $v$  atau sama dengan lamanya gaya bekerja, maka dari kedua persamaan di atas Anda dapatkan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{\bar{F}}{m} = \frac{v - v_0}{\Delta t}$$

$$\bar{F} \times \Delta t = m \times v - m \times v_0$$

$$I = m(v - v_0)$$

$$I = \Delta p$$

Keterangan:

$I$  : besar impuls (Ns)

$m$  : massa benda (kg)

$v$  : besar kecepatan (kelajuan) akhir benda (m/s)

$v_0$  : kecepatan (kelajuan) mula-mula benda (m/s)

$\Delta p$  : besar perubahan momentum (kg m/s)

$F$  : besar gaya yang bekerja pada benda (N)

$\Delta t$  : selang waktu (s)

Persamaan di atas menyatakan bahwa impuls yang dikerjakan pada suatu benda sama dengan perubahan momentum yang dialami benda tersebut, yaitu beda antara momentum akhir dengan momentum awalnya.

### Contoh 5.1

Sebuah bola massanya 2 kg jatuh dari ketinggian 45 m. Waktu bola menumbuk tanah adalah 0,1 s sampai akhirnya bola berbalik dengan kecepatan 2/3 kali kecepatan ketika bola menumbuk tanah. Hitunglah perubahan momentum bola pada saat menumbuk tanah dan besarnya gaya yang bekerja pada bola akibat menumbuk tanah!

Diketahui : a.  $m = 2 \text{ kg}$   
 b.  $h = 45 \text{ m}$   
 c.  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$   
 d.  $v = \frac{2}{3}v_0$

Ditanyakan : a.  $\Delta p = \dots ?$   
 b.  $F = \dots ?$

Jawab:

$$v = \sqrt{mgh} = \sqrt{(2)(10)(45)} = 30 \text{ m/s}$$

$$v = \frac{2}{3}v_0 = \frac{2}{3}(30) = 20 \text{ m/s}$$

a. Perubahan momentum

$$\begin{aligned} \Delta p &= m \times \Delta v = m(v - v_0) \\ &= (2)(30 - 20) \\ &= 20 \text{ kg m/s} \end{aligned}$$

b. Gaya yang bekerja pada bola

$$\begin{aligned}F \Delta t = \Delta p &\Leftrightarrow F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \\&= \frac{20}{0,1} \\&= 200 \text{ N}\end{aligned}$$

Berbagai contoh aplikasi impuls dan momentum dalam kehidupan sehari-hari, antara lain, sebagai berikut.

1. Ketika sebuah truk dan sebuah sepeda menabrak pohon dengan kecepatan sama, truk akan memberikan efek yang lebih serius. Hal ini disebabkan perubahan momentum truk lebih besar dibandingkan dengan perubahan momentum sepeda (massa truk lebih besar).
2. Ketika peluru ditembakkan dan batu dilemparkan ke sebuah papan, peluru akan merusak papan lebih serius karena perubahan momentum peluru lebih besar (kecepatannya lebih besar).
3. Josan yang hendak memecahkan tumpukan kayu harus memberikan kecepatan yang tinggi pada tangannya agar impuls yang ditimbulkan besar. Kemudian ia harus menghantam kayu dengan waktu kontak yang sangat singkat agar gaya yang dirasakan kayu lebih besar.
4. Seorang petinju yang tidak dapat menghindari pukulan lawannya berusaha mengurangi efek pukulan ini dengan memundurkan kepalanya mengikuti gerakan tangan lawan. Dengan demikian ia memperpanjang waktu kontak antara tangan lawan dengan kepalanya sehingga gaya yang ia rasakan lebih kecil.
5. Orang yang jatuh di atas batu akan merasakan efek yang lebih besar dibandingkan jatuh di atas spon. Hal ini karena spon memberikan waktu tumbukan yang lebih lama dibandingkan dengan batu.
6. Menendang batu terasa lebih sakit daripada menendang bola, walaupun massa batu dan bola sama. Ini terjadi karena selang waktu kontak antara kaki dengan bola lebih lama.
7. Pejudo yang dibanting pada matras dapat menahan rasa sakit karena selang waktu kontak antara punggung pejudo dengan matras lebih lama sehingga pejudo menderita gaya impuls yang lebih kecil.
9. Tabrakan antara dua mobil yang mengakibatkan kedua mobil saling menempel sesaat setelah tabrakan (waktu kontak lebih lama) kurang membahayakan dibandingkan dengan tabrakan sentral yang mengakibatkan kedua mobil saling terpental sesaat setelah tabrakan (waktu kontak lebih singkat).



### Kegiatan 5.1

Rancanglah sebuah kegiatan menentukan momentum rata-rata dari benda yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu. Anda dapat mengubah-ubah massa benda atau ketinggian benda dari tanah. Alat yang Anda butuhkan adalah alat ukur panjang, massa, dan waktu. Sebutkan langkah-langkah kegiatan yang harus Anda lakukan. Berdasarkan kegiatan tersebut rekomendasikan yang harus dilakukan orang saat jatuh dari ketinggian tertentu agar tidak berakibat fatal. Buatlah kesimpulan dari kegiatan tersebut dan kumpulkan di meja guru!

## T o k o h

### Christiaan Huygens (1629 - 1695)



Sumber: Jendela Iptek

Christiaan Huygens adalah ahli fisika, ahli astronomi, penemu jam bandul, penemu teori gelombang cahaya, dan masih banyak penemuan lainnya. Huygens lahir di Den Haag, Belanda, pada tanggal 14 April 1629. Ayahnya adalah seorang diplomat bernama Constantin Huygens.

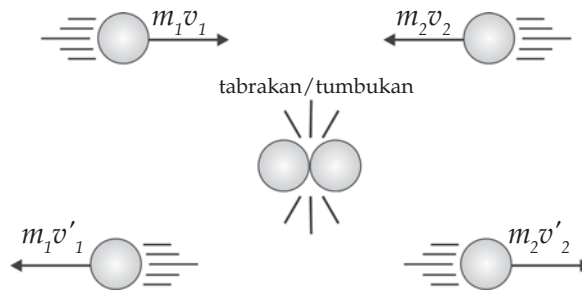
Sampai umur 16 tahun Huygens tidak pernah duduk di bangku sekolah. Ia dididik di rumah, oleh guru lesnya. Baru sesudah itu Huygens masuk ke Universitas Leiden. Huygens ikut berperan dalam menemukan rumus yang tepat tentang hukum tumbukan meskipun ia tidak pernah menerbitkannya.

Untuk mengukur waktu kejadian-kejadian astronomis, Huygens membuat jam yang mampu mengukur waktu hingga ke hitungan menit. Ia menggunakan gerakan maju-mundur yang biasa terjadi pada sebuah pendulum yang berayun untuk mengendalikan gigi-gigi jam tersebut. Huygens mempresentasikan model jamnya yang pertama kepada pemerintah Belanda dan menggambarkannya dalam terbitan tahun 1658. Jam pendulum tersebut dikenal sebagai jam “kakek” dan dipakai di seluruh dunia selama hampir 300 tahun. Huygens meninggal tanggal 8 Juli 1695 di Den Haag pada usia 66 tahun setelah banyak berkarya.

*(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)*

## B. Hukum Kekekalan Momentum

Huygens, ilmuwan berkebangsaan belanda, melakukan eksperimen dengan menggunakan bola-bola bilyar untuk menjelaskan hukum kekekalan momentum. Perhatikan uraian berikut. Dua buah bola pada Gambar 5.2 bergerak berlawanan arah saling mendekati. Bola pertama massanya  $m_1$ , bergerak dengan kecepatan  $v_1$ . Sedangkan bola kedua massanya  $m_2$  bergerak dengan kecepatan  $v_2$ . Jika kedua bola berada pada lintasan yang sama dan lurus, maka pada suatu saat kedua bola akan bertabrakan.



Gambar 5.2 Hukum kekekalan momentum.

Dengan memperhatikan analisis gaya tumbukan bola pada Gambar 5.2, ternyata sesuai dengan pernyataan hukum III Newton. Kedua bola akan saling menekan dengan gaya  $F$  yang sama besar, tetapi arahnya berlawanan. Akibat adanya gaya aksi dan reaksi dalam selang waktu  $\Delta t$  tersebut, kedua bola akan saling melepaskan diri dengan kecepatan masing-masing sebesar  $v'_1$  dan  $v'_2$ . Penurunan rumus secara umum dapat dilakukan dengan meninjau gaya interaksi saat terjadi tumbukan berdasarkan hukum III Newton.

$$\begin{aligned} F_{\text{aksi}} &= -F_{\text{reaksi}} \\ F_1 &= -F_2 \end{aligned}$$

Impuls yang terjadi selama interval waktu  $\Delta t$  adalah  $F_1 \Delta t = -F_2 \Delta t$ . Anda ketahui bahwa  $I = F \Delta t = \Delta p$ , maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= -\Delta p_2 \\ m_1 v_1 - m_1 v'_1 &= -(m_2 v_2 - m_2 v'_2) \\ m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ p_1 + p_2 &= p'_1 + p'_2 \\ \text{Jumlah momentum awal} &= \text{Jumlah momentum akhir} \end{aligned}$$

Keterangan:

$p_1, p_2$  : momentum benda 1 dan 2 sebelum tumbukan

$p'_1, p'_2$  : momentum benda 1 dan 2 sesudah tumbukan

$m_1, m_2$  : massa benda 1 dan 2

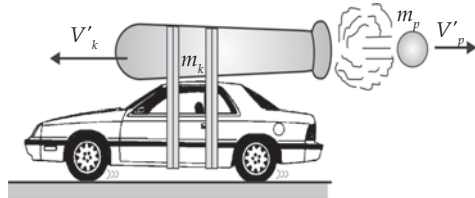
$v_1, v_2$  : kecepatan benda 1 dan 2 sebelum tumbukan

$v'_1, v'_2$  : kecepatan benda 1 dan 2 sesudah tumbukan

Persamaan di atas dinamakan hukum kekekalan momentum. Hukum ini menyatakan bahwa *“jika tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem, maka momentum total sesaat sebelum sama dengan momentum total sesudah tumbukan”*. ketika menggunakan persamaan ini, Anda harus memerhatikan arah kecepatan tiap benda.

### Contoh 5.2

Perhatikan gambar di samping! Sebuah meriam kuno diletakkan di atas sebuah kendaraan. Berat kendaraan termasuk meriam sebesar 2.000 kg. Kendaraan mula-mula diam. Setelah meriam menembakan peluru, kendaraan mulai bergerak. Hitunglah kecepatan kendaraan akibat tolakan peluru jika kecepatan peluru 4,00 m/s dan massanya peluru 3 kg!



Diketahui : a.  $m_k = 2.000 \text{ kg}$   
 b.  $m_p = 3 \text{ kg}$   
 c.  $v'_p = 4,00 \text{ m/s}$   
 d.  $v_p = 0 \text{ m/s}$   
 e.  $v_k = 0 \text{ m/s}$

Ditanyakan :  $v'_k = \dots?$

Jawab:

$$p_1 = p_2$$

$$m_k v_k + m_p v_p = m_k v'_k + m_p v'_p$$

$$2.000 \times 0 = 2.000 \times v'_k + 3 \times 4,00$$

$$0 = 2.000 v'_k + 1.200$$

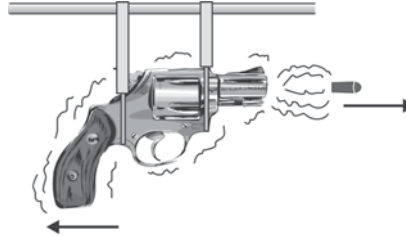
$$v'_k = -\frac{1.200}{2.000}$$

$$= -0,6 \text{ m/s}$$

(tanda negatif menunjukkan bahwa arah gerak kendaraan berlawanan dengan arah gerak peluru)



Contoh aplikasi dari hukum kekekalan momentum adalah roket dan pistol. Pada Gambar 5.3 tampak sebuah pistol yang digantung pada seutas tali. Saat peluru ditembakkan ke kanan dengan alat jarak jauh seperti remote, senapan akan tertolak ke kiri. Percepatan yang diterima oleh pistol ini berasal dari gaya reaksi peluru pada pistol (hukum III Newton).



*Gambar 5.3 Bukti hukum kekekalan momentum.*

Perhatikan Gambar 5.4! Contoh aplikasi yang lain adalah pada sistem roket. Percepatan roket diperoleh dengan cara yang mirip dengan bagaimana senapan memperoleh percepatan. Percepatan roket berasal dari tolakan gas yang disemburkan roket. Tiap molekul gas dapat dianggap sebagai peluru kecil yang ditembakkan roket. Jika gaya gravitasi diabaikan, maka peristiwa peluncuran roket memenuhi hukum kekekalan momentum.

Mula-mula sistem roket diam, sehingga momentumnya nol. Sesudah gas menyembur keluar dari ekor roket, momentum sistem tetap. Artinya momentum sebelum dan sesudah gas keluar sama. Berdasarkan hukum kekekalan momentum, besarnya kelajuan roket tergantung banyaknya bahan bakar yang digunakan dan besar kelajuan semburan gas. Hal inilah yang menyebabkan wahana roket dibuat bertahap banyak.



*Sumber: Encarta Encyclopedia*

*Gambar 5.4 Sistem roket menerapkan hukum kekekalan momentum linear.*



## Kegiatan 5.1

### Hukum Kekekalan Momentum

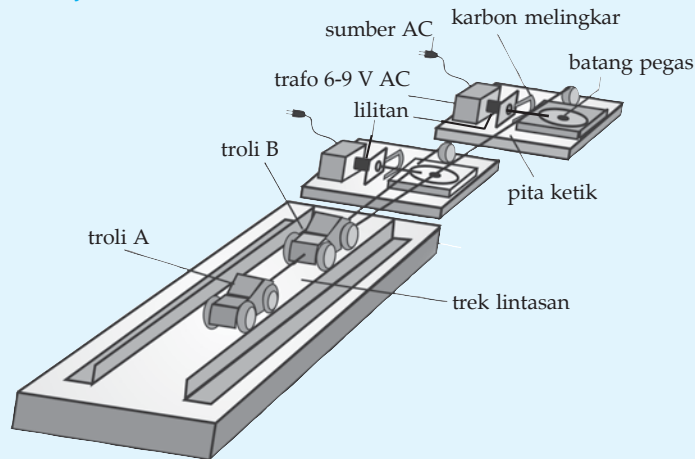
#### A. Tujuan

Anda dapat menyelidiki hukum kekekalan momentum pada peristiwa tumbukan dua buah troli.

## B. Alat dan Bahan

1. Dua set pewaktu ketik (ticker timer)
2. Dua buah mobil-mobilan atau troli
3. Jalur atau trek mobil-mobilan
4. Dua buah kertas pita ketik
5. Neraca ohaus

## C. Langkah Kerja



1. Sambungkan troli A dengan pengetik I dan troli B dengan pengetik II!
2. Letakkan troli B di muka troli A sejauh  $\pm 30$  cm!
3. Saat troli B diam, jalankan troli A dengan menggunakan penggerak mekanik!
4. Perhatikan saat troli A menumbuk troli B, maka keduanya akan bergerak!
5. Ambilkan kertas pengetik dari ticker timer I dan II (pada pita I didapat kecepatan troli A sebelum dan sesudah tumbukan dan pengetik II untuk kecepatan troli B setelah tumbukan)!
6. Timbanglah troli A ( $m_A$ ) dan troli B ( $m_B$ )!
7. Ulangi percobaan untuk troli yang diberi beban bervariasi!
8. Masukkan data hasil pengamatan ke dalam tabel seperti berikut!

**Tabel Hasil Pengamatan**

No	$m_A$	$m_B$	$m'_A$	$m'_B$	$v_A$	$v'_A$	$v_B$	$v'_B$
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

9. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!

### Soal Kompetensi 5.2

1. Apakah bandul berayun memiliki momentum yang kekal? Jelaskan?
2. Sebuah mobil yang massanya 4.000 kg bergerak dengan kelajuan 72 km/jam. Berapakah besar gaya yang diperlukan untuk menghentikan mobil tersebut, jika dikehendaki mobil berhenti dalam waktu 10 sekon dan 5 sekon?
3. Sebuah benda massa 1 kg bergerak dengan kecepatan 3 m/s ke arah utara. Akibat dikenai gaya, kecepatan benda berubah menjadi 7 m/s pada arah yang sama. Tentukan momentum awal benda, momentum akhir benda, perubahan momentum, impuls yang diberikan pada benda, serta besar dan arah gaya tersebut jika gaya bekerja selama 0,1 sekon!

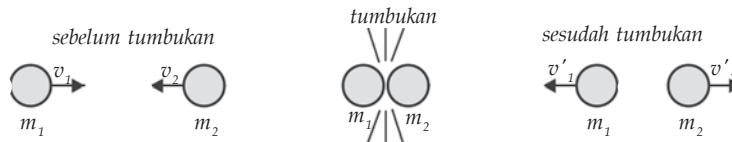
## C. Tumbukan

Banyak kejadian dalam kehidupan sehari-hari yang dapat dijelaskan dengan konsep momentum dan impuls. Di antaranya peristiwa tumbukan antara dua kendaraan. Salah satu penggunaan konsep momentum yang penting adalah pada persoalan yang menyangkut tumbukan. Misalnya tumbukan antara partikel-partikel gas dengan dinding tempat gas berada. Hal ini dapat digunakan untuk menjelaskan sifat-sifat gas dengan menggunakan analisis mekanika. Pada bab ini Anda hanya akan mempelajari tumbukan yang paling sederhana, yaitu tumbukan sentral. Tumbukan sentral adalah tumbukan yang terjadi bila titik pusat benda yang satu menuju ke titik pusat benda yang lain.

Berdasarkan sifat kelentingan atau elastisitas benda yang bertumbukan, tumbukan dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian, dan tumbukan tidak lenting sama sekali.

## 1. Tumbukan Lenting Sempurna

Tumbukan lenting sempurna (elastik) terjadi di antara atom-atom, inti atom, dan partikel-partikel lain yang seukuran dengan atom atau lebih kecil lagi. Dua buah benda dikatakan mengalami tumbukan lenting sempurna jika pada tumbukan itu tidak terjadi kehilangan energi kinetik. Jadi, energi kinetik total kedua benda sebelum dan sesudah tumbukan adalah tetap. Oleh karena itu, pada tumbukan lenting sempurna berlaku hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi kinetik. Tumbukan lenting sempurna hanya terjadi pada benda yang bergerak saja.



Gambar 5.5 Tumbukan lenting sempurna antara dua benda.

Dua buah benda memiliki massa masing-masing  $m_1$  dan  $m_2$  bergerak saling mendekati dengan kecepatan sebesar  $v_1$  dan  $v_2$  sepanjang lintasan yang lurus. Setelah keduanya bertumbukan masing-masing bergerak dengan kecepatan sebesar  $v'_1$  dan  $v'_2$  dengan arah saling berlawanan. Berdasarkan hukum kekekalan momentum dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ m_1 v_1 - m_1 v'_1 &= m_2 v'_2 - m_2 v_2 \\ m_1 (v_1 - v'_1) &= m_2 (v'_2 - v_2) \end{aligned}$$

Sedangkan berdasarkan hukum kekekalan energi kinetik, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_{k1} + E_{k2} &= E'_{k1} + E'_{k2} \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 &= \frac{1}{2} m_1 (v'_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v'_2)^2 \\ m_1 ((v'_1)^2 - (v_1)^2) &= m_2 ((v'_2)^2 - (v_2)^2) \\ m_1 (v_1 + v'_1)(v_1 - v'_1) &= m_2 (v'_2 + v_2)(v'_2 - v_2) \end{aligned}$$

Jika persamaan di atas saling disubstitusikan, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} m_1 (v_1 + v'_1)(v_1 - v'_1) &= m_2 (v'_2 + v_2)(v'_2 - v_2) \\ v_1 + v'_1 &= v'_2 + v_2 \\ v_1 - v_2 &= v'_2 - v'_1 \\ -(v_2 - v_1) &= v'_2 - v'_1 \end{aligned}$$

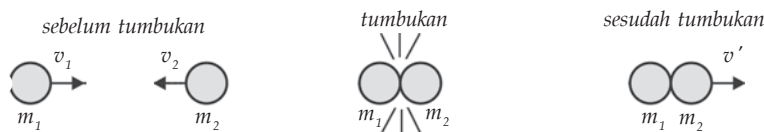
Persamaan di atas menunjukkan bahwa pada tumbukan lenting sempurna kecepatan relatif benda sebelum dan sesudah tumbukan besarnya tetap tetapi arahnya berlawanan.

## 2. Tumbukan Tidak Lenting Sama Sekali

Pada tumbukan tidak lenting sama sekali, terjadi kehilangan energi kinetik sehingga hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku. Pada tumbukan jenis ini, kecepatan benda-benda sesudah tumbukan sama besar (benda yang bertumbukan saling melekat). Misalnya, tumbukan antara peluru dengan sebuah target di mana setelah tumbukan peluru mengaram dalam target. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

Jika  $v'_1 = v'_2 = v'$ , maka  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$



**Gambar 5.6** Tumbukan tidak lenting sama sekali yang terjadi antara dua benda.

Contoh tumbukan tidak lenting sama sekali adalah ayunan balistik. Ayunan balistik merupakan seperangkat alat yang digunakan untuk mengukur benda yang bergerak dengan kecepatan cukup besar, misalnya kecepatan peluru. Prinsip kerja ayunan balistik berdasarkan hal-hal berikut.

- Penerapan sifat tumbukan tidak lenting.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$$

$$m_1 v_1 + 0 = (m_1 + m_2) v'$$

$$v_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} v' \dots\dots\dots (1)$$

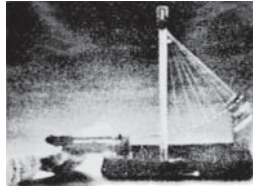
- Hukum kekekalan energi mekanik

$$\frac{1}{2}(m_1 + m_2)(v')^2 = (m_1 + m_2)gh$$

$$v' = \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (2)$$

Jika persamaan pertama disubstitusikan ke dalam persamaan kedua, maka diketahui kecepatan peluru sebelum bersarang dalam balok.

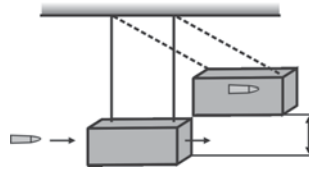
$$v_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \sqrt{2gh} \quad \text{atau} \quad v_p = \frac{(m_p + m_b)}{m_p} \sqrt{2gh}$$



Sumber: Fisika, Kane dan Sternheim

(a)

Gambar 5.7 (a) Ayunan balistik di laboratorium dan (b) Skema ayuna balistik.



(b)

### 3. Tumbukan Lenting Sebagian

Kebanyakan benda-benda yang ada di alam mengalami tumbukan lenting sebagian, di mana energi kinetik berkurang selama tumbukan. Oleh karena itu, hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku. Besarnya kecepatan relatif juga berkurang dengan suatu faktor tertentu yang disebut *koefisien restitusi*. Bila koefisien restitusi dinyatakan dengan huruf  $e$ , maka derajat berkurangnya kecepatan relatif benda setelah tumbukan dirumuskan sebagai berikut.

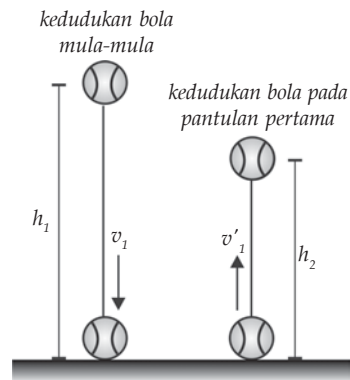
$$e = - \frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)}$$

Nilai restitusi berkisar antara 0 dan 1 ( $0 \leq e \leq 1$ ). Untuk tumbukan lenting sempurna, nilai  $e = 1$ . Untuk tumbukan tidak lenting nilai  $e = 0$ . Sedangkan untuk tumbukan lenting sebagian mempunyai nilai  $e$  antara 0 dan 1 ( $0 < e < 1$ ). Misalnya, sebuah bola tenis dilepas dari ketinggian  $h_1$  di atas lantai. Setelah menumbuk lantai bola akan terpental setinggi  $h_2$ , nilai  $h_2$  selalu lebih kecil dari  $h_1$ .

Coba Anda perhatikan Gambar 5.8! Kecepatan bola sesaat sebelum tumbukan adalah  $v_1$  dan sesaat setelah tumbukan  $v_1'$ . Berdasarkan persamaan gerak jatuh bebas, besar kecepatan bola memenuhi persamaan  $v = \sqrt{2gh}$ . Untuk kecepatan lantai sebelum dan sesudah tumbukan sama dengan nol ( $v_2 = v_2' = 0$ ). Jika arah ke benda diberi harga negatif, maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$v_1 = -\sqrt{2gh_1} \text{ dan } v_1' = +\sqrt{2gh_2}$$

$$e = - \frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)} = - \frac{(0 - \sqrt{2gh_2})}{0 - (-\sqrt{2gh_1})} = \frac{\sqrt{2gh_2}}{\sqrt{2gh_1}} = \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1}}$$



Gambar 5.8 Skema tumbukan lenting sebagian.

### Contoh 5.3

Sebuah bola dilepaskan dari ketinggian 8 m. Setelah menumbuk lantai, bola memantul dan mencapai ketinggian 5 m. Hitunglah koefisien restitusi pantulan dan ketinggian setelah pantulan kedua!

Diketahui : a.  $h_1 = 8$  m  
                  b.  $h_2 = 5$  m  
Ditanyakan : a.  $e = ..?$   
                  b.  $h_3 = ...?$

Jawab:

a. Koefisien restitusi

$$e = \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1}} = \sqrt{\frac{5}{8}} = 0,79$$

b. Ketinggian pantulan ketiga

$$\begin{aligned} e &= \frac{\sqrt{h_3}}{\sqrt{h_2}} \Rightarrow h_3 = h_2 \times e^2 \\ &= 5 \times (0,79)^2 \\ &= 3,12 \text{ m} \end{aligned}$$

### Kolom Diskusi

*Diskusikan dengan teman Anda hal-hal berikut!*

1. Mengapa tabrakan antara trailer dan bus dapat berhenti seketika, sedangkan antara kendaraan bermotor dengan truk tidak berhenti seketika?
2. Mengapa bus yang sedang bergerak cenderung terus bergerak, sehingga untuk menghindari tabrakan sopir tidak berani mengerem secara mendadak?

*Buatlah kesimpulan berdasarkan diskusi tersebut dan kumpulkan di meja guru!*



### Rangkuman

1. Momentum adalah ukuran kesukaran untuk memberhentikan suatu benda, dan didefinisikan sebagai hasil kali massa dengan kecepatannya.

2. Persamaan momentum adalah  $p = m \times v$ .
3. Impuls didefinisikan sebagai hasil kali gaya rata-rata dan selang waktu selama gaya bekerja.
4. Persamaan impuls adalah  $I = F \Delta t$ .
3. Persamaan yang menunjukkan hubungan momentum dan impuls adalah  $I = \Delta p$ .
4. Persamaan hukum kekekalan momentum adalah  

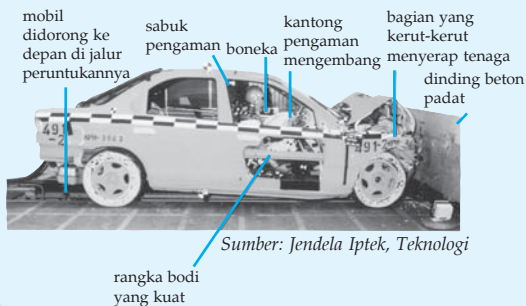
$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$
5. Tumbukan dikelompokkan menjadi 3, yaitu tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian, dan tumbukan tidak lenting.
6. Persamaan untuk koefisien restitusi adalah  $e = - \frac{(v'_2 - v'_1)}{(v_2 - v_1)}$ .

### Kolom Ilmuwan

Buatlah suatu klipring tentang kejadian/peristiwa yang berhubungan dengan impuls dan momentum dari surat kabar, majalah, atau artikel ilmiah di internet. Berilah kesimpulan di akhir klipring Anda. Di akhir klipring, Anda juga boleh merekomendasikan hal-hal yang perlu diperhatikan tentang sesuatu. Misalnya, hal-hal yang perlu diperhatikan pada kendaraan sebelum melakukan perjalanan jauh; hal-hal yang perlu diperhatikan saat mengemudi dengan kecepatan tinggi.

### Info Kita

#### Mobil Idaman



Perusahaan pembuat mobil berlomba-lomba membuat mobil yang tidak saja dapat melindungi orang-orang yang berada di dalamnya saat terjadi kecelakaan, melainkan juga membuat perangkat yang membantu pengemudi menghindari terjadinya



kecelakaan. Untuk itu, dilakukan beberapa inovasi, antara lain, memperkuat kerangka mobil, memasang sabuk pengaman (*seatbelt*), sampai melengkapi mobil dengan kantong udara (*airbag*). Semua perangkat ini dinamakan perangkat keamanan pasif (*passive safety*).

Marilah kita bahas satu per satu. Pertama, untuk mengurangi resiko fatal pada kecelakaan frontal, bagian depan dan belakang mobil didesain agar dapat menggumpal secara perlahan, Hal ini akan memperlama selang waktu kontak, sehingga dapat mengurangi gaya impulsif pada pengemudi (ingat kembali materi pada bab ini). Kedua, saat terjadi tabrakan mobil akan berhenti dalam waktu singkat. Karena adanya momen inersia (hukum I Newton), maka pengemudi akan bergerak ke depan dengan kelajuan yang sama dengan kelajuan mobil sesaat sebelum tabrakan. Oleh pembuat mobil, hal ini disiasati dengan dibuatnya kantong udara (*airbag*) yang terletak antara pengemudi dan kemudi. Kantong udara ini akan mengembang seketika setelah terjadi tabrakan. Kantong udara juga dibuat lunak sehingga impuls yang diberikan kantong udara akan berlangsung lebih lama. Ketiga, meski telah dilengkapi kantong udara, jika kelajuan mobil besar sebelum terjadi tabrakan, maka kemungkinan pengemudi menabrak kemudi masih sangat besar. Oleh karena itu, didesain sabuk pengaman yang dapat memberhentikan pengemudi setelah menempuh jarak aman. Jarak aman adalah jarak antara pengemudi dan kemudi, kira-kira 50 cm.

Selain usaha mendesain perangkat keamanan pasif, para pembuat mobil juga mengembangkan seperangkat alat yang membantu pengemudi menghindari terjadinya tabrakan. Alat-alat ini dinamakan keamanan aktif (*active safety*). Misalnya, ABS (*antilock braking system*), EBD (*electronic braking force-distribution*), BA (*brake assist*), dan ESP (*electronic stability progame*). Coba Anda cari tahu tentang cara kerja sistem ini.

Pada saat ini, nilai bintang lima diberikan pada mobil yang dikategorikan mobil aman. Mobil aman merupakan mobil yang dapat melindungi orang-orang yang berada di dalamnya dari kemungkinan cedera fatal karena kecelakaan. Namun, meski telah mendapat bintang lima, sebuah mobil tetap tidak dapat melindungi orang-orang di dalamnya jika alat-alat tersebut tidak digunakan. Berdasarkan *study* yang dilakukan di beberapa negara, 80% dari kecelakaan yang terjadi di jalan raya disebabkan karena kesalahan pengemudi (*human error*). Sisanya, terjadi karena hal-hal lain seperti karena pengemudi yang lain, pejalan kaki, ban pecah, jalan rusak, dan rem blong. Jadi, tetap berhati-hatilah saat berada di jalan raya.

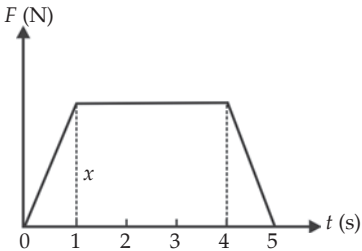
(Dikutip seperlunya dari harian umum, Kompas, Jumat, 20 Oktober, 2006)

## P e l a t i h a n

### A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!

1. Rumus dimensi momentum adalah ....
  - a.  $MLT^2$
  - b.  $ML^{-1}T^{-1}$
  - c.  $MLT^{-1}$
  - d.  $ML^{-2}T^2$
  - e.  $ML^{-1}T^2$
  
2. Benda-benda berikut yang mengalami gaya terbesar pada waktu bertumbukan dengan dinding batu jika selang waktunya sama adalah ....
  - a. benda bermassa 150 kg bergerak dengan kelajuan 7 m/s
  - b. benda bermassa 100 kg bergerak dengan kelajuan 12 m/s
  - c. benda bermassa 50 kg bergerak dengan kelajuan 15 m/s
  - d. benda bermassa 40 kg bergerak dengan kelajuan 25 m/s
  - e. benda bermassa 25 kg bergerak dengan kelajuan 50 m/s
  
3. Perhatikan gambar disamping! Sebuah gaya  $F$  yang bervariasi terhadap waktu bekerja pada sebuah benda bermassa 10 kg. Gaya tersebut menghasilkan momentum sebesar 40 kg m/s dalam waktu 5 detik. Nilai  $X$  adalah ....
 

- a. 4
  - b. 8
  - c. 10
  - d. 15
  - e. 50


  
4. Sebuah benda bergerak dengan momentum sebesar  $p$ . Tiba-tiba benda tersebut pecah menjadi dua bagian yang masing-masing besar momentumnya  $p_1$  dan  $p_2$  dalam arah yang saling tegak lurus sehingga ....
 

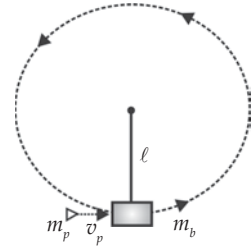
- a.  $p = p_1 + p_2$
  - b.  $p = p_1 - p_2$
  - c.  $p = p_2 - p_1$

- d.  $p = (p_1 + p_2)^{1/2}$
  - e.  $p = (p_1^2 + p_2^2)$
  
5. Sebuah bola A mempunyai momentum  $p$  bertumbukan dengan bola lain B hingga setelah tumbukan momentum bola A tersebut menjadi  $3p$ . Perubahan momentum bola B adalah ....
 

- a.  $2p$
  - b.  $-2p$
  - c.  $-3p$

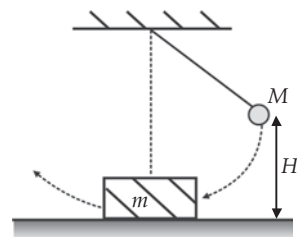
- d.  $4p$
  - e.  $p$

6. Perhatikan gambar disamping! Sebuah balok yang digantung pada tali sepanjang  $\ell$  dengan massa  $m_b$  ditembak oleh peluru yang bermassa  $m_p = 0,25 m_b$ . Ternyata peluru bersarang di dalam balok dan terjadi putaran satu kali lingkaran penuh. Kecepatan minimal peluru adalah ....



- $\sqrt{2g\ell}$
  - $5\sqrt{5g\ell}$
  - $10\sqrt{5g\ell}$
  - $15\sqrt{g\ell}$
  - $20\sqrt{5g\ell}$
7. Sebuah balok yang bermassa 1,5 kg terletak diam di atas bidang horizontal. Koefisien gesekan balok dengan bidang horizontal 0,2. Peluru yang bermassa 10 g ditembakkan horizontal mengenai balok tersebut dan diam di dalam balok. Balok bergeser sejauh 1 m. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka kecepatan peluru menumbuk balok adalah ....

- 152 m/s
  - 200 m/s
  - 212 m/s
  - 250 m/s
  - 302 m/s
8. Perhatikan gambar di samping! Suatu ayunan yang bandulnya bermassa  $M$  dinaikkan pada ketinggian  $H$  dan dilepaskan. Pada bagian terendah lintasannya, bandul membentur suatu massa  $m$  yang mula-mula diam di atas permukaan mendatar yang licin. Apabila setelah benturan kedua massa saling menempel, maka ketinggian  $h$  yang dapat dicapai keduanya adalah ....

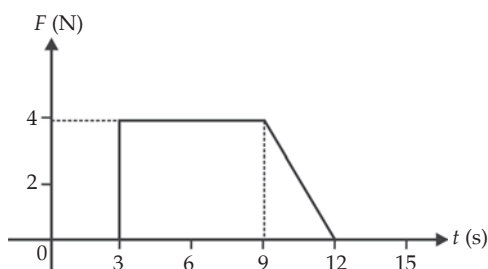


- $\left( \frac{m}{m + M} \right)^2 H$
- $\left( \frac{m}{m + M} \right) H^2$
- $\left( \frac{M}{m + M} \right) H^2$
- $\left( \frac{M}{m + M} \right) H^2$
- $\left( \frac{M}{m + M} \right)^2 H^2$

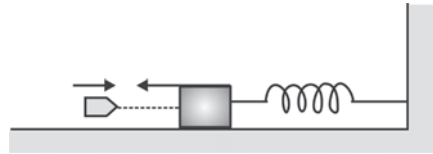
9. Sebuah benda menumbuk balok yang diam di atas lantai dengan kecepatan 20 m/s. Setelah tumbukan balok terpental dengan kecepatan 15 m/s searah dengan kecepatan benda semula. Kecepatan benda setelah tumbukan bila besar koefisien restitusi  $e = 0,4$  adalah ....
  - a. 7 m/s searah dengan kecepatan semula
  - b. 7 m/s berlawanan arah dengan kecepatan semula
  - c. 8 m/s searah dengan kecepatan semula
  - d. 8 m/s berlawanan arah dengan kecepatan semula
  - e. 10 m/s searah dengan kecepatan semula
10. Peluru dengan massa 10 gram dan kecepatan 1.000 m/s mengenai dan menembus sebuah balok dengan massa 100 kg yang diam di atas bidang datar licin. Jika kecepatan peluru setelah menembus balok 100 m/s, maka 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

**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

1. Sebuah bola bermassa 0,3 kg bergerak dengan kecepatan 2 m/s menumbuk sebuah bola lain bermassa 0,2 kg yang mula-mula diam. Jika setelah tumbukan bola pertama diam, maka tentukan kecepatan bola kedua!
2. Dua benda titik bermassa  $m_1 = 5$  kg dan  $m_2 = 6$  kg terletak berdekatan di atas bidang datar licin. Sistem ini mendapat impuls gaya hingga kedua benda bergerak masing-masing dengan kelajuan  $v_1 = 1$  m/s dan  $v_2 = 2$  m/s dengan arah saling tegak lurus. Berapa besarnya impuls gaya yang bekerja pada sistem tersebut
3. Perhatikan gambar grafik di samping! Grafik di samping menyatakan hubungan gaya  $F$  yang bekerja pada benda bermassa 3 kg terhadap waktu  $t$  selama gaya itu bekerja pada benda. Bila benda mula-mula diam, maka tentukan kecepatan akhir benda!
4. Sebuah granat yang diam tiba-tiba meledak dan pecah menjadi 2 bagian yang bergerak dalam arah yang berlawanan. Perbandingan massa kedua bagian itu adalah  $m_1 : m_2 = 1 : 2$ . Bila energi yang dibebaskan adalah  $3 \times 10^5$  J, maka tentukan perbandingan energi kinetik pecahan granat pertama dan kedua!



5. Bola  $A$  yang bergerak lurus dan mempunyai momentum  $mv$  menumbuk bola  $B$  yang bergerak pada garis lurus yang sama. Jika setelah tumbukan bola  $A$  mempunyai momentum  $-3mv$ , maka hitunglah pertambahan momentum bola  $B$ !
6. Sebuah truk bermassa  $2.000\text{ kg}$  melaju dan kecepatan  $36\text{ km/jam}$  menabrak sebuah pohon dan berhenti dalam waktu  $0,1\text{ detik}$ . Hitunglah gaya rata-rata pada truk selama berlangsungnya tabrakan!
7. Dua benda  $A$  dan  $B$  bermassa sama masing-masing  $2\text{ kg}$  saling bertumbukan. Kecepatan bola  $A$  dan  $B$  sebelum tumbukan adalah  $v_A = (15\mathbf{i} + 30\mathbf{j})\text{ m/s}$  dan  $v_B = (-10\mathbf{i} + 5\mathbf{j})\text{ m/s}$ . Kecepatan benda  $A$  setelah tumbukan adalah  $(-5\mathbf{i} + 20\mathbf{j})\text{ m/s}$ . Hitunglah persentase energi kinetik yang hilang setelah tumbukan!
8. Perhatikan gambar di samping! Peluru dengan massa  $50\text{ gram}$  ditembakkan ke arah balok bermassa  $0,95\text{ kg}$ , yang terletak pada bidang datar licin dihubungkan dengan pegas. Hal tersebut menyebabkan pegas tertekan  $20\text{ cm}$ . Perhitungan menunjukkan bahwa gaya sebesar  $1\text{ N}$  dapat menyebabkan pegas tertekan  $1\text{ cm}$ . Hitunglah besar kecepatan mula-mula peluru!
9. Sebuah bola yang bermassa  $0,5\text{ kg}$  bergerak dengan kelajuan  $2\text{ m/s}$ . Yudi menendang searah gerakan bola dengan gaya  $50\text{ N}$ . Menempuh jarak berapakah sentuhan kaki Yudi agar kelajuan bola menjadi  $4\text{ ms}^{-1}$ ?
10. Benda mengalami gaya tetap sebesar  $20\text{ N}$  pada lintasan lurus dalam jarak tempuh  $60\text{ m}$ . Bila akibat gaya itu kecepatan benda berubah dari  $2\text{ m/s}$  menjadi  $10\text{ m/s}$  dengan arah tetap, maka tentukan massa benda tersebut!

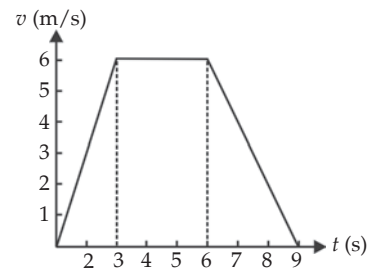


# Pelatihan Ulangan Semester Gasal

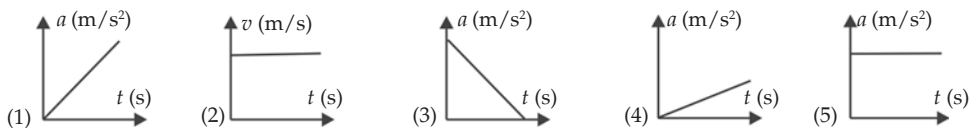
**A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!**

1. Perhatikan gambar di samping! Jarak yang ditempuh benda setelah bergerak selama 9 s adalah ....

- a. 33 m
- b. 36 m
- c. 39 m
- d. 42 m
- e. 43 m



2. Perhatikan gambar-gambar grafik di bawah ini!

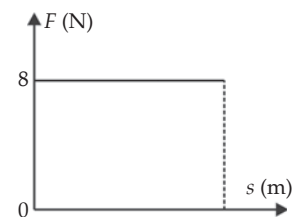


Grafik yang berlaku untuk grafik GLBB adalah nomor ....

- a. (1)
  - b. (2)
  - c. (3)
  - d. (4)
  - e. (5)
3. Benda dengan massa 10 kg berada pada bidang mendatar ( $\mu_s = 0,4$ ;  $\mu_k = 0,35$ ; dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Apabila benda diberi gaya horizontal tetap sebesar 30 N, maka besarnya gaya gesek yang bekerja pada benda tersebut adalah ....
- a. 20 N
  - b. 25 N
  - c. 30 N
  - d. 35 N
  - e. 40 N

4. Sebuah peti balok 500 N ditarik oleh sebuah tali dengan gaya tarik mendatar (horizontal) 230 N. Saat peti bergerak, peti itu hanya memerlukan gaya 200 N, besar koefisien gesekan statisnya adalah ....
  - a. 0,15
  - b. 0,22
  - c. 0,41
  - d. 0,43
  - e. 0,46
5. Sebuah benda bergerak melingkar (GMB) dengan jejari lintasan 50 cm dan memerlukan 6 putaran selama 3 menit. Periode putarannya adalah ....
  - a. 30 s
  - b. 25 s
  - c. 20 s
  - d. 15 s
  - e. 10 s
6. Sebuah serangga bergerak melingkar beraturan (GMB) dengan frekuensi  $\frac{1}{30}$  Hz. Kecepatan sudut serangga tersebut adalah ....
  - a.  $\frac{1}{10}\pi$  rad/s
  - b.  $\frac{1}{15}\pi$  rad/s
  - c.  $\frac{1}{20}\pi$  rad/s
  - d.  $\frac{1}{25}\pi$  rad/s
  - e.  $\frac{1}{30}\pi$  rad/s
7. Dua benda masing-masing bermassa 2 kg dan 5 kg, berjarak 0,1 m satu sama lain. Jika  $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ , maka gaya tarik menarik antara 2 benda tersebut adalah ....
  - a.  $6,7 \times 10^{-6} \text{ N}$
  - b.  $6,7 \times 10^{-7} \text{ N}$
  - c.  $6,7 \times 10^{-5} \text{ N}$
  - d.  $6,7 \times 10^{-8} \text{ N}$
  - e.  $6,7 \times 10^{-9} \text{ N}$
8. Sebuah pegas meregang 4 cm saat ditarik gaya 12 N. Pertambahan panjang pegas saat ditarik oleh gaya 6 N adalah ....
  - a. 1 cm
  - b. 2 cm
  - c. 3 cm
  - d. 4 cm
  - e. 5 cm
9. Seutas kawat yang luas penampangnya  $4 \text{ mm}^2$  ditarik oleh gaya 3,2 N, sehingga panjangnya bertambah 0,04 mm. Tegangan kawat tersebut adalah ....
  - a.  $5 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2$
  - b.  $8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
  - c.  $8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
  - d.  $7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
  - e.  $8 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2$

10. Sebuah benda di bumi memiliki berat 50 N. Jika benda tersebut di letakkan pada jarak 1,5 kali jari-jari bumi di atas permukaan bumi, maka beratnya menjadi ....
- 2 N
  - 4 N
  - 6 N
  - 8 N
  - 10 N
11. Timbulnya usaha karena ada proses perubahan ....
- energi
  - daya
  - gravitasi
  - ketinggian
  - listrik
12. Sebuah benda beratnya 10 N berada pada bidang datar licin dan pada benda bekerja gaya 40 N yang membentuk sudut  $60^\circ$  terhadap bidang horizontal menyebabkan benda berpindah sejauh 10 m. Besar usaha yang dilakukan gaya tersebut adalah ....
- 50 J
  - 100 J
  - 150 J
  - 200 J
  - 250 J
13. Sebuah benda bermassa 5 kg mula-mula diam, kemudian bergerak lurus dengan percepatan  $3 \text{ m/s}^2$ . Besar usaha yang diubah menjadi energi kinetik setelah 2 sekon adalah ....
- 90 J
  - 70 J
  - 60 J
  - 50 J
  - 20 J
14. Kemampuan untuk melakukan usaha tiap satu satuan waktu atau kecepatan melakukan usaha disebut sebagai ....
- usaha
  - waktu
  - gaya
  - energi
  - daya
15. Perhatikan gambar di samping! Sebuah gaya bekerja pada benda, sehingga benda bergeser searah dengan gaya. Usaha yang dilakukan oleh gaya  $F$  setelah benda bergerak sejauh 5 m adalah ....
- 30 J
  - 38 J
  - 40 J
  - 50 J
  - 55 J

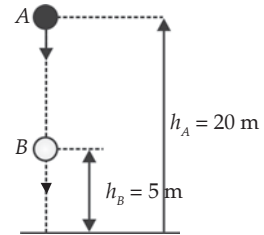




17. Energi yang dimiliki benda karena keadaannya dan kedudukannya adalah energi ....
- potensial
  - mekanik
  - kinetik
  - listrik
  - gerak

18. Benda yang massanya 5 kg mengalami jatuh bebas dari ketinggian 20 m di atas tanah (dengan  $10 \text{ m/s}^2$ ). Usaha yang telah dilakukan oleh gaya berat benda tersebut pada saat benda pada ketinggian 5 m di atas tanah adalah....

- 400 J
- 500 J
- 750 J
- 800 J
- 900 J



19. Energi kinetik sebuah benda yang massanya 2 kg bergerak dengan kecepatan  $10 \text{ m/s}$  adalah ....

- 30 J
- 60 J
- 90 J
- 100 J
- 130 J

20. Seseorang yang massanya 60 kg menaiki tangga yang tingginya 20 m dalam selang waktu 2 menit. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka daya yang dikeluarkan oleh orang tersebut adalah ....

- 70 watt
- 100 watt
- 110 watt
- 125 watt
- 150 watt

21. Suatu besaran vektor yang merupakan hasil kali gaya dengan selang waktu adalah ....

- daya
- usaha
- momentum
- energi
- impuls

22. Sebuah truk massanya 1000 kg melaju dengan kecepatan  $72 \text{ km/jam}$ , kemudian menabrak pohon dan berhenti setelah 0,1 sekon. Besar gaya rata-rata selama berlangsungnya tabrakan tersebut adalah ....

- $-1 \times 10^4 \text{ Ns}$
- $7 \times 10^5 \text{ Ns}$
- $-2 \times 10^4 \text{ Ns}$
- $-2 \times 10^5 \text{ Ns}$
- $-2 \times 10^6 \text{ Ns}$

23. Sebuah mobil sedan bermassa 800 kg bergerak ke kanan dengan kecepatan  $10 \text{ m/s}$ . Momentum mobil A adalah ....

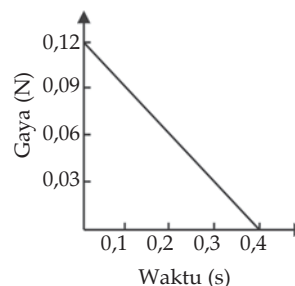
- $6 \times 10^3 \text{ N.s}$
- $7 \times 10^3 \text{ N.s}$
- $8 \times 10^3 \text{ N.s}$
- $8 \times 10^3 \text{ Ns}$
- $10^4 \text{ N.s}$

24. Sebuah bola pada permainan *soft ball* bermassa 0,15 kg dilempar horizontal ke kanan dengan kelajuan 20 m/s. Setelah dipukul bola bergerak ke kiri dengan kelajuan 20 m/s. Impuls yang diberikan oleh kayu pemukul terhadap bola adalah ....

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

25. Berdasarkan gambar di samping, impulsnya adalah ....

- |             |              |
|-------------|--------------|
| a. 0,024 Ns | d. 0,0101 Ns |
| b. 0,011 Ns | e. 0,204 Ns  |
| c. 0,005 Ns |              |



26. Sebuah benda bermassa 2 kg jatuh bebas dari suatu ketinggian 80 m di atas tanah. Momentum ketika benda sampai di permukaan tanah adalah ....

- |          |          |
|----------|----------|
| a. 25 Ns | d. 70 Ns |
| b. 50 Ns | e. 80 Ns |
| c. 65 Ns |          |

27. Kecepatan peluru saat lepas dari larasnya 200 m/s. Bila massa peluru dan senapan masing-masing 10 gram dan 5 kg. Maka kecepatan dorong senapan terhadap bahu penembak saat peluru lepas dari larasnya adalah ....

- |             |             |
|-------------|-------------|
| a. -0,1 m/s | d. -0,4 m/s |
| b. -0,2 m/s | e. -0,5 m/s |
| c. -0,3 m/s |             |

28. Peristiwa yang memenuhi hukum kekekalan momentum, hukum kekekalan energi kinetik, dan memiliki koefisien restitusi  $e = 1$ , adalah jenis tumbukan ....

- |                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| a. tidak lenting             | d. lenting sempurna |
| b. tidak lenting sama sekali | e. lenting          |
| c. lenting sebagian          |                     |

29. Suatu benda bermassa 2 kg yang sedang bergerak, lajunya bertambah dari 1 m/s menjadi 5 m/s dalam waktu 2 detik. Jika benda tersebut beraksi gaya yang searah dengan arah gerak benda, maka besar gaya tersebut adalah ....

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

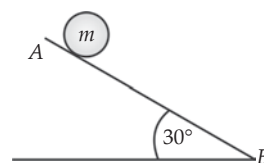
30. Sebuah bola bermassa 0,2 kg dalam keadaan diam, kemudian dipukul sehingga bola meluncur dengan laju 100 m/s dan pemukul menyentuh bola selama 0,1 s. Besar gaya pemukul adalah ....

- |          |          |
|----------|----------|
| a. 35 N  | d. 150 N |
| b. 50 N  | e. 200 N |
| c. 100 N |          |

- 
- A diagram showing a circular disk of radius  $R$ . A line passes through the center of the disk, and a horizontal arrow labeled  $R$  indicates the radius from the center to the right edge of the disk.

- 
- Figure 1 consists of two schematic diagrams. Diagram (a) shows a quarter-cylinder with a radius  $R_1$  and a weight  $W_1$ . A dashed line indicates the radius from the center of the flat face to the curved surface. Diagram (b) shows a full cylinder with a radius  $R_2$  and a weight  $W_2$ .

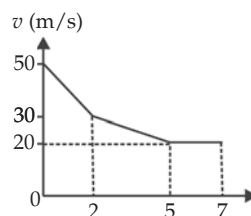
36. Benda yang berotasi memiliki energi kinetik rotasi sebesar ....
- $\frac{1}{2}IR^2$
  - $\frac{1}{3}IR^2$
  - $\frac{1}{2}I\omega^2$
  - $\frac{1}{3}I\omega^2$
  - $\frac{1}{4}I\omega^2$
37. Sebuah bola pejal, massa 2 kg, jari-jari 10 cm menggelinding menurut bidang datar, pada suatu saat kecepatan sudutnya 10 rad/s. Energi kinetik bola pejal pada saat itu adalah ....
- 1,4 J
  - 2 J
  - 3,2 J
  - 4,1 J
  - 5 J
38. Sebuah roda massa 4 kg dan jari-jari 0,5 m menggelinding pada lantai datar. Momen inersia roda terhadap lantai adalah ....
- $0,5 mR^2$
  - $0,75 mR^2$
  - $1,0 mR^2$
  - $1,5 mR^2$
  - $1,75 mR^2$
39. Sebuah roda berputar dengan kecepatan sudut awal 20 rad/s kemudian direm dan ternyata setelah 5 sekon, kecepatan sudutnya menjadi 5 rad/s. Lama waktu yang diperlukan roda sejak direm hingga berhenti adalah ....
- $\frac{10}{3}$  sekon
  - $\frac{14}{2}$  sekon
  - $\frac{17}{3}$  sekon
  - $\frac{15}{3}$  sekon
  - $\frac{20}{3}$  sekon
40. Sebuah bola pejal yang massanya 5 kg menggelinding di atas bidang miring kasar yang membentuk sudut miring  $30^\circ$ . Bola dilepas di A tanpa kecepatan awal. Momen gaya bola adalah ....
- 0,5 Nm
  - 0,7 Nm
  - 0,8 Nm
  - 0,10 Nm
  - 0,13 Nm



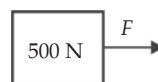
**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

- Diketahui lebar sebuah sungai  $160\sqrt{3}$  m, kecepatan arus 2 m/s. Sebuah perahu ingin menyeberangi sungai tersebut. Jika kecepatan perahu 4 m/s, maka tentukan arah perahu agar bergerak dan tiba tegak lurus pada tepian sungai serta lama waktu yang diperlukan perahu untuk sampai seberang!

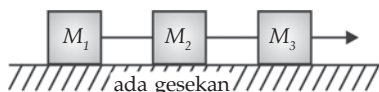
2. Berdasarkan gambar grafik di samping, tentukan jarak yang ditempuh benda dalam waktu 7 sekon?



3. Sebuah balok kayu diseret ke dalam gudang. Untuk menarik balok dari keadaan diam sampai akan bergerak dibutuhkan gaya tarik horizontal 230 N. Saat balok bergerak, balok hanya membutuhkan gaya 200 N. Tentukan koefisien gesek statis dan koefisien gesek kinetisnya!

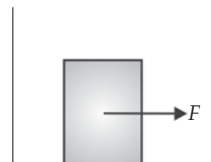


4. Gambarkanlah diagram bebas benda untuk balok di bawah ini!



5. Saat diukur di bumi, Tono memiliki berat 500 N. Jika Tono melakukan perjalanan ruang angkasa dan berhenti pada jarak 2 kali jari-jari bumi dari bumi, maka tentukan berat Tono sekarang!
6. Sebuah benda yang memiliki massa 10 kg berada pada bidang mendatar ( $\mu_s = 0,4$ ;  $\mu_k = 0,35$ ;  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Jika benda diberi gaya horizontal tetap sebesar 30 N, maka tentukan besarnya gaya gesekan yang bekerja pada benda tersebut!
7. Tentukan medan gravitasi di titik C, pada suatu segitiga sama sisi ABC dengan panjang sisi 5 m ( $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ )!

8. Sebuah benda bermassa 8 kg berada di atas bidang datar yang licin. Pada benda bekerja gaya mendatar 16 N ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Tentukan usaha yang dilakukan gaya itu selama 5 sekon!



9. Dua buah bola massanya sama besar, bertumbukkan sentral dari arah berlawanan. Bila masing-masing kecepatannya sebelum tumbukan  $v_1 = 2 \text{ m/s}$  dan  $v_2 = 4 \text{ m/s}$ . Tentukan kecepatan masing-masing setelah bertumbukkan lenting sempurna!
10. Sebuah batang diputar dengan sumbu putar terletak pada jarak  $\frac{1}{3}$  dari salah satu ujungnya. Bila massa batang  $M$  dan panjangnya  $L$ , maka tentukan momen inersianya!

## Keseimbangan Benda Tegar



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menformulasikan hubungan antara konsep torsi, momentum sudut, momen inersia, berdasarkan hukum II Newton serta penerapannya dalam masalah benda tegar.



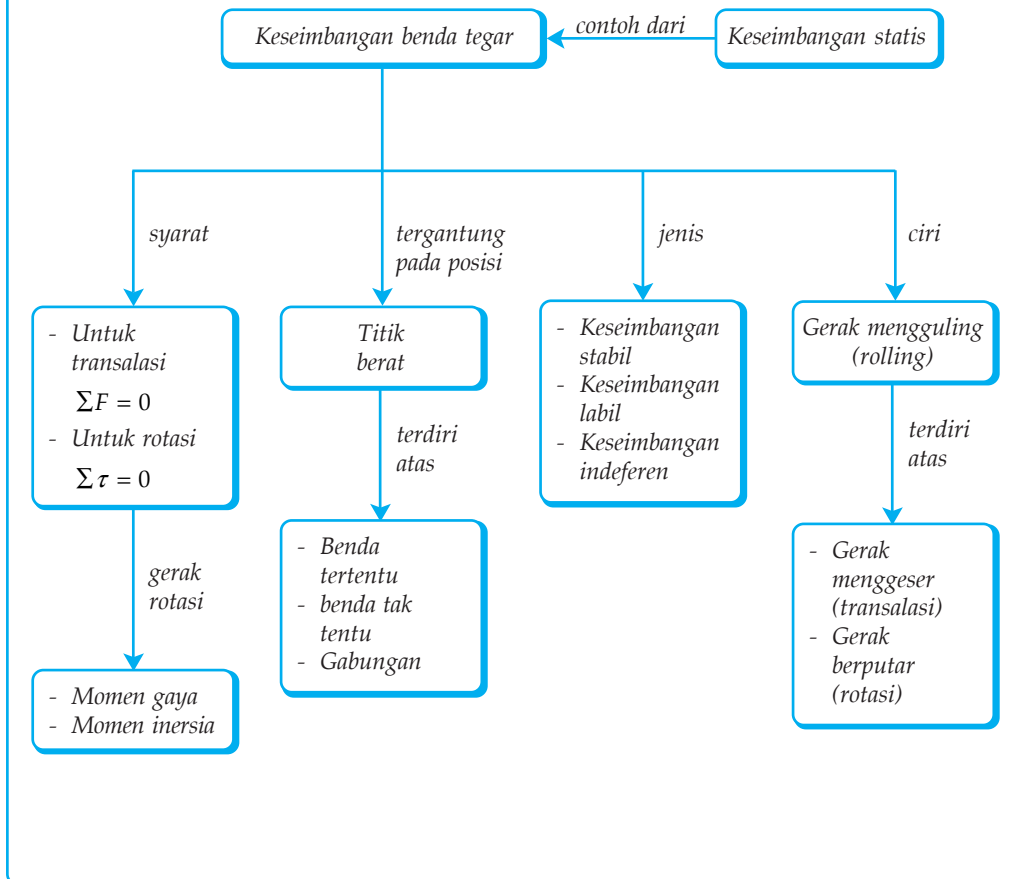
Sumber: Garuda, Januari 1996

Penduduk Bali terkenal dengan ketaatannya menjalankan ritual agama. Pada tiap upacara keagamaan, salah satu yang tidak boleh terlupakan adalah menyiapkan beraneka ragam sesaji. Terkadang untuk membawa sesaji ke tempat yang dituju, para wanita Bali menyunggi sesaji menggunakan tampah. Tahukah Anda, konsep fisika apa yang diterapkan agar sesaji di dalam tampah tidak jatuh/tergelincir dari atas kepala meski tidak dipegang?

### Kata Kunci

- |                 |                 |                         |
|-----------------|-----------------|-------------------------|
| • Gerak         | • Lengan Gaya   | • Titik Berat Benda.    |
| • Translasi     | • Momen Inersia | • Aturan Sinus Segitiga |
| • Gerak Rotasi  | • Momen Sudut   | • Benda Tegar           |
| • Resultan Gaya | • Momen Kopel   | • Momen Gaya            |

## Peta Konsep



Pernahkan Anda memikirkan sebab bangunan pencakar langit dapat berdiri kokoh? Atau sebab jembatan tidak roboh walaupun di atasnya dilewati bermacam-macam kendaraan yang berat? Atau sebab Anda dapat berdiri tegak? Bangunan pencakar langit dapat berdiri kokoh, jembatan dapat bergantung kuat, atau Anda dapat berdiri tegak disebabkan karena berada dalam keadaan seimbang.

Keseimbangan benda penting dipelajari karena banyak bidang ilmu yang menerapkannya. Misalnya, bidang arsitek atau teknik sipil (merancang dan mendesain rumah kokoh), bidang olahraga, (yudo, senam, dan tinju), dan bidang medis atau terapi (kekuatan otot untuk menjaga keseimbangan tubuh).

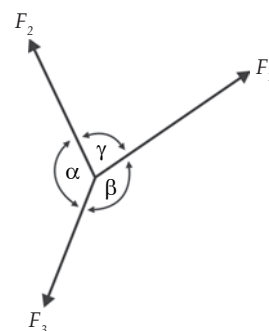
Sesuai hukum I Newton, keseimbangan dapat Anda bedakan menjadi dua macam, yaitu keseimbangan statis (keseimbangan benda ketika dalam keadaan diam) dan keseimbangan dinamis (keseimbangan benda ketika bergerak dengan kecepatan konstan). Pada bab ini Anda akan membahas keseimbangan statis yang terjadi pada partikel maupun pada benda tegar.

Sebelum membahas tentang keseimbangan, terlebih dahulu Anda akan dikenalkan jenis gerak yang diakibatkan oleh gaya yang berkaitan dengan konsep keseimbangan benda. Misalnya, gerak translasi, rotasi, dan menggelinding. Gerak translasi (geseran) merupakan gerak yang kedudukan pusat massa benda berubah tapi tidak memiliki kecepatan sudut. Misalnya, meja yang digeser dan lemari yang digeser. Gerak rotasi (berputar) merupakan gerak yang kedudukan pusat massa tetap tapi memiliki kecepatan sudut. Misalnya, baling-baling yang berputar dan batu yang diputar dengan seutas tali. Gerak rolling (menggelinding) atau mengalami gerak translasi merupakan gerak yang kedudukan pusat massanya berubah dan memiliki kecepatan sudut. Misalnya, kelereng atau bola yang menggelinding.

## A. Keseimbangan Partikel dan Gerak Translasi

Partikel merupakan ukuran benda terkecil, sehingga sering digambarkan sebagai titik. Akibatnya, jika ada gaya yang bekerja pada partikel, maka gaya tepat mengenai pada pusat massa benda. Oleh karena itu, partikel hanya mengalami gerak translasi (menggeser). Gerak translasi merupakan gerak yang memenuhi hukum II Newton. Jika partikel terletak pada bidang XY dan gaya-gaya yang bekerja diuraikan dalam komponen sumbu X dan sumbu Y, maka syarat kesetimbangan partikel dapat ditulis  $\Sigma F_x = 0$  dan  $\Sigma F_y = 0$ .

Banyak persoalan yang berhubungan dengan keseimbangan partikel akibat pengaruh tiga buah gaya. Untuk menye-



Gambar 6.1 Pengaruh tiga gaya pada partikel.



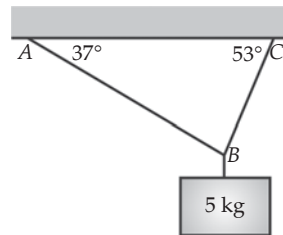
lesaikannya, Anda dapat menggunakan syarat keseimbangan. Secara sederhana Anda juga dapat menggunakan aturan sinus dalam segitiga. Perhatikan Gambar 6.1 berikut!

Jika partikel pada Gambar 6.1 dalam keadaan seimbang, maka berlaku persamaan  $F_1 + F_2 + F_3 = 0$ . Berdasarkan aturan sinus dalam segitiga,

diperoleh persamaan  $\frac{F_1}{\sin \alpha} = \frac{F_2}{\sin \beta} = \frac{F_3}{\sin \gamma}$ .

### Contoh 6.1

- Perhatikan gambar di samping! Sebuah beban bermassa 9 kg digantungkan menggunakan tali pada sebuah dinding. Jika  $g = 10 \text{ ms}^{-2}$  dan sistem di atas dalam keadaan seimbang, maka tentukan besar gaya tegangan pada tali BA dan BC!



Diketahui : a.  $m = 9 \text{ kg}$

b.  $g = 10 \text{ ms}^{-2}$

Ditanyakan :  $T_1$  dan  $T_2 = \dots?$

Jawab:

Pandang titik B sebagai partikel

1. Syarat seimbang:

$$\Sigma F = 0$$

$$T_{2x} - T_{1x} = 0$$

$$T_2 \cos 53^\circ = T_1 \cos 37^\circ$$

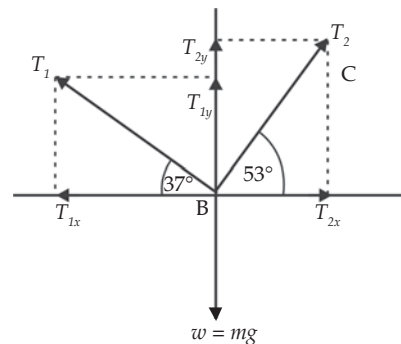
$$T_1 = 0,75 T_2 \dots\dots (1)$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$T_{1y} + T_{2y} - w = 0$$

$$T_{1y} + T_{2y} = w$$

$$T_{1y} + T_{2y} = m \times g \dots\dots\dots (2)$$



Berdasarkan persamaan (1) dan (2) diperoleh:

$$0,75 T_2 \cdot 0,6 + T_2 \cdot 0,8 = 50$$

$$1,25 T_2 = 50$$

$$T_2 = 40 \text{ N}$$

$$T_1 = 0,75 \times 40$$

$$= 30 \text{ N}$$

Jadi, besarnya tegangan tali pada BA dan BC adalah 30 N dan 50 N.

## Soal Kompetensi 6.1

1. Jelaskan mengenai aturan sinus dalam segitiga  $\frac{F_1}{\sin \alpha} = \frac{F_2}{\sin \beta} = \frac{F_3}{\sin \gamma}$ .
2. Seorang anak bermain ayunan. Saat berayun, temannya menghentikan ayunan dengan cara memegang tempat duduk ayunan. Saat ayunan berhenti, tali ayunan membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap garis vertikal. Jika massa anak 32 kg dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah besarnya gaya yang digunakan untuk menahan dan tegangan tali pada ayunan!
3. Jelaskan tentang keseimbangan statis partikel dengan hukum II Newton!

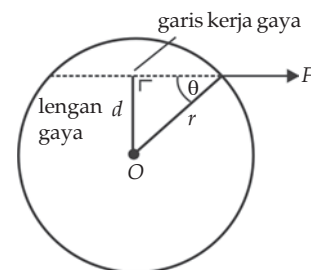
## B. Gerak Rotasi

Gerak rotasi (melingkar) adalah gerakan pada bidang datar yang lintasannya berupa lingkaran. Anda akan mempelajari bagaimana suatu benda dapat berotasi dan apa yang menyebabkan. Oleh karena itu, Anda akan mengawali dengan pembahasan tentang pengertian momen gaya, momen inersia, dan momentum sudut.

### 1. Momen Gaya (Torsi)

Benda dapat melakukan gerak rotasi karena adanya momen gaya. Momen gaya timbul akibat gaya yang bekerja pada benda tidak tepat pada pusat massa.

Gambar 6.2 memperlihatkan sebuah gaya  $F$  bekerja pada sebuah benda yang berpusat massa di  $O$ . Garis/kerja gaya berjarak  $d$ , secara tegak lurus dari pusat massa, sehingga benda akan berotasi ke kanan searah jarum jam. Jarak tegak lurus antara garis kerja gaya dengan titik pusat massa disebut *lengan gaya* atau *lengan momen*. Momen gaya didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya ( $F$ ) dengan jarak lengan gaya ( $d$ ). Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.



Gambar 6.2 Momen gaya yang bekerja pada benda menyebabkan benda berotasi.

$$\tau = F \times d$$

Karena  $d = r \times \sin \theta$ , maka persamaan di atas menjadi sebagai berikut.

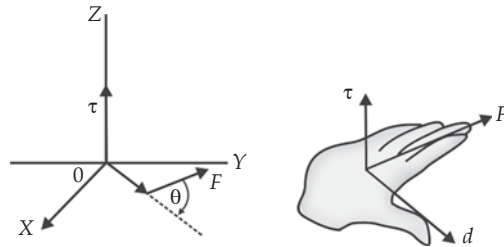
$$\tau = F \times r \times \sin \theta$$

Keterangan:

$\tau$  : momen gaya (Nm)  
 $F$  : gaya (N)

$d$  : lengan gaya (m)  
 $r$  : jari-jari (m)

Arah momen gaya dinyatakan oleh aturan tangan kanan. Bukalah telapak tangan kanan Anda dengan ibu jari terpisah dari keempat jari yang lain. Lengan gaya  $d$  sesuai dengan arah ibu jari, gaya  $F$  sesuai dengan arah keempat jari, dan arah torsi sesuai dengan arah membukanya telapak tangan.



**Gambar 6.3** Penentuan arah momen gaya dengan kaidah tangan kanan.

Momen gaya  $\tau$  menyebabkan benda berotasi. Jika benda berotasi searah jarum jam, maka torsi yang bekerja pada benda bertanda positif. Sebaliknya, jika benda berotasi dengan arah berlawanan dengan arah jarum jam, maka torsi penyebabnya bertanda negatif. Torsi-torsi yang sebidang dapat dijumlahkan.

Apabila pada sebuah benda bekerja beberapa gaya, maka jumlah momennya sama dengan momen gaya dari resultan semua gaya yang bekerja pada benda tersebut. Secara matematis dapat dituliskan seperti di bawah ini.

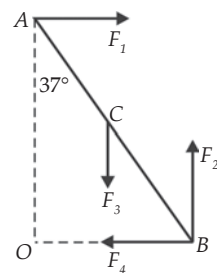
$$\tau_{O1} + \tau_{O2} + \tau_{O3} + \dots = Rd \text{ atau } \Sigma \tau_O = Rd$$

### Contoh 6.2

Perhatikan gambar di samping! Empat buah gaya bekerja pada batang  $AB$  (jarak  $AB = 2 AC = 5 \text{ m}$ ) masing-masing  $F_1 = 5 \text{ N}$ ,  $F_2 = 6 \text{ N}$ ,  $F_3 = 3 \text{ N}$ , dan  $F_4 = 8 \text{ N}$ . Hitunglah besar momen gaya  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ , dan  $\tau_4$  terhadap titik  $O$  serta jumlah momen gaya terhadap titik  $O$ !

- Diketahui :
- $AB = 5 \text{ m}$
  - $AC = 5/2 = 2,5 \text{ m}$
  - $F_1 = 5 \text{ N}$
  - $F_2 = 6 \text{ N}$
  - $F_3 = 3 \text{ N}$
  - $F_4 = 8 \text{ N}$

- Ditanyakan :
- $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ , dan  $\tau_4 = \dots?$
  - $\Sigma \tau_O = \dots?$



Jawab:

- a. Momen gaya  $F$  terhadap titik  $O$  adalah:

$$d_1 = \text{jarak antara } F_1 \text{ ke titik } O = 5 \cos 37^\circ$$

$$\tau_1 = F_1 \times d_1 = 5 \times 5 \cos 37^\circ = 20 \text{ Nm}$$

$$d_2 = \text{jarak antara } F_2 \text{ ke titik } O = 5 \sin 37^\circ$$

$$\tau_2 = F_2 \times d_2 = -6 \times 5 \sin 37^\circ = 18 \text{ Nm}$$

$$d_3 = \text{jarak antara } F_3 \text{ ke titik } O = 2,5 \sin 37^\circ$$

$$\tau_3 = F_3 \times d_3 = 3 \times 2,5 \sin 37^\circ = 4,5 \text{ Nm}$$

$$d_4 = \text{jarak antara } F_4 \text{ ke titik } O = 0 \text{ (karena titik } O \text{ berimpit dengan garis kerja } F_4)$$

$$\tau_4 = F_4 \times d_4 = 8 \times 0 = 0$$

- b. Jumlah momen gaya terhadap titik  $O$

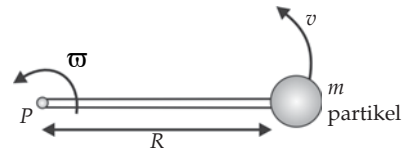
$$\Sigma \tau_o = \tau_{01} + \tau_{02} + \tau_{03} + \tau_{04} = 20 - 18 - 4,5 + 0 = 6,5 \text{ Nm}$$

(tanda negatif (-) menunjukkan arahnya berlawanan dengan arah putaran jarum jam)

## 2. Momen Inersia

Momen inersia (kelembaman) suatu benda adalah ukuran kelembaman suatu benda untuk berputar terhadap porosnya. Nilai momen inersia suatu benda bergantung kepada bentuk benda dan letak sumbu putar benda tersebut. Misalkan

Anda memiliki sebuah batang ringan (massa diabaikan) dengan panjang  $R$ . Salah satu ujung batang, yaitu titik  $P$ , ditetapkan sebagai poros rotasi. Pada ujung batang yang lain dihubungkan dengan sebuah partikel bermassa  $m$ . Jika sistem diputar terhadap poros  $P$ , sehingga partikel berotasi dengan kecepatan  $v$ , maka energi kinetik rotasi partikel dapat ditulis sebagai berikut.



Gambar 6.4 Momen inersia.

$$E_k = \frac{1}{2} m \times v^2$$

Karena  $v = R \omega$ , maka

$$E_k = \frac{1}{2} m \times (R\omega)^2 \text{ atau } \frac{1}{2} m \times R^2 \omega^2$$

Momen inersia dilambangkan dengan  $I$ , satuannya dalam SI adalah  $\text{kgm}^2$ . Nilai momen inersia sebuah partikel yang berotasi dapat ditentukan dari hasil kali massa partikel dengan kuadrat jarak partikel tersebut dari titik pusat rotasi. Faktor  $m \times R^2$  merupakan momen inersia titik terhadap sumbu putarnya. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$I = m \cdot R^2$$

Keterangan:

$I$  : momen inersia ( $\text{kgm}^2$ )

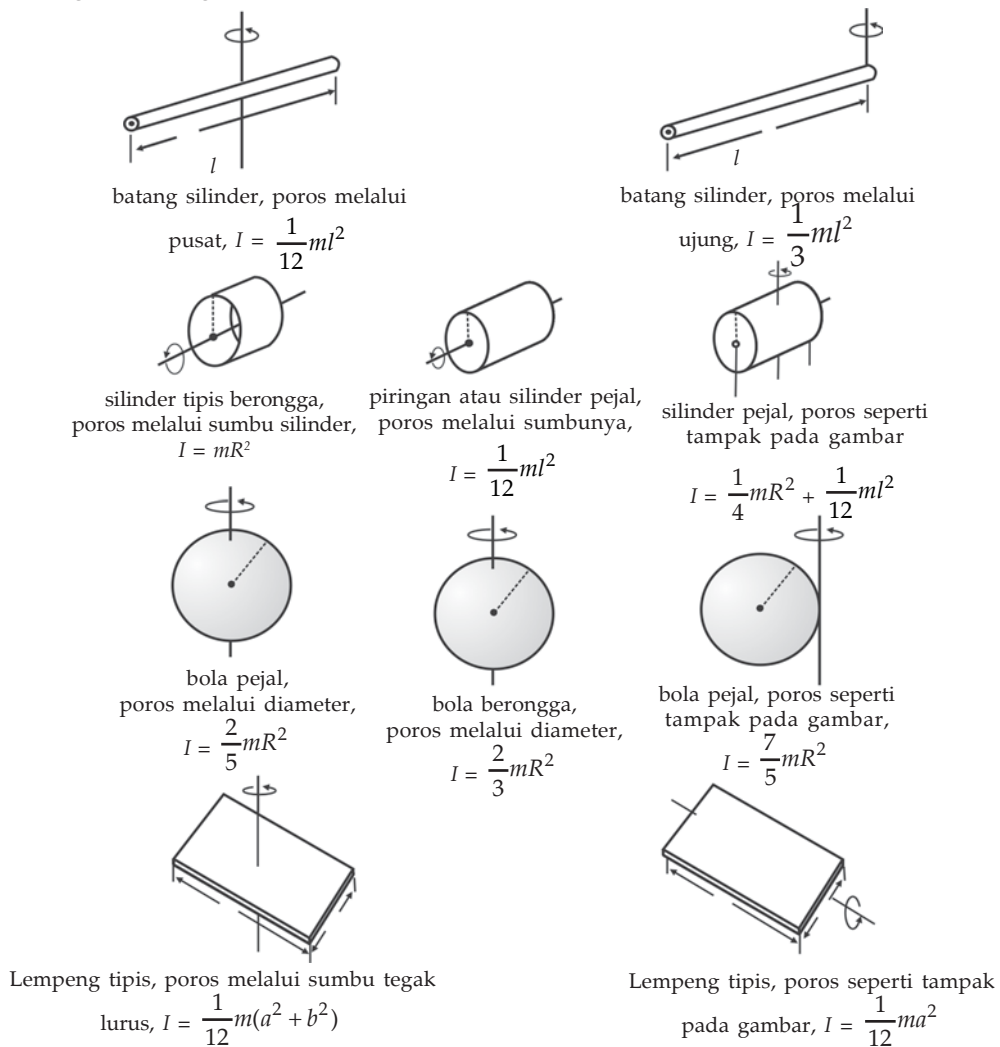
$R$  : jari-jari (m)

$m$  : massa partikel atau titik (kg)

Benda yang terdiri atas susunan partikel (titik), jika melakukan gerak rotasi memiliki momen inersia sama dengan hasil jumlah dari momen inersia partikel penyusunnya.

$$I = \sum m_i \times R_i^2 = (m_1 \times R_1^2) + (m_2 \times R_2^2) + (m_3 \times R_3^2) + \dots$$

Pada Gambar 6.5 berikut, dilukiskan momen inersia berbagai benda tegar homogen.



Gambar 6.5 Momen inersia berbagai benda tegar homogen.

### Contoh 6.3

Sebuah tongkat homogen massanya 1,5 kg dan panjang 10 meter. Tongkat tersebut diputar dengan pusat rotasi 4 meter dari salah satu ujungnya. Berapakah momen inersia tongkat tersebut?

Diketahui : a.  $m = 1,5 \text{ kg}$   
b.  $l = 10 \text{ m}$   
c.  $h = 4 \text{ m}$

Ditanyakan:  $I = \dots?$

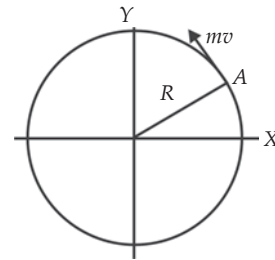
Jawab:

Karena tongkat homogen, maka

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{3}m(l^2 - 3lh + 3h^2) \\ &= \frac{1}{3}(1,5)(10^2 - (3 \times 10 \times 4) + 3 \times 4^2) \\ &= \frac{1}{3}(1,5)(28) \\ &= 14 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

### 3. Momentum Sudut

Pernahkah Anda melihat orang bermain gasing? Mengapa gasing yang sedang berputar meskipun dalam keadaan miring tidak roboh? Pasti ada sesuatu yang menyebabkan gasing tidak roboh. Setiap benda yang berputar mempunyai kecepatan sudut. Bagaimana hubungan antara momen inersia dan kecepatan sudut? Perhatikan Gambar 6.6!



Gambar 6.6 Titik A yang berotasi dengan sumbu O dan jari-jari R memiliki momentum  $m \times v$ .

Gambar di atas memperlihatkan titik A yang berotasi dengan sumbu putar O. R adalah jarak antara O dan A. Selama berotasi titik A memiliki momentum sebesar  $P = m \times v$ . Hasil perkalian momentum dengan jarak R disebut momentum sudut, dan diberi notasi L.

$$\begin{aligned} L &= P \times R \\ L &= m \times v \times R \\ L &= m \times \omega \times R \times R \\ L &= m \times R^2 \times \omega \end{aligned}$$

Apabila momentum sudut dihubungkan dengan momen inersia, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$L = I \times \omega$$

Keterangan:

- $v$  : kecepatan linear (m/s)  
 $L$  : momentum sudut ( $\text{kg m}^2\text{s}^{-1}$ )  
 $m$  : massa partikel/titik (kg)  
 $R$  : jarak partikel ke sumbu putar (m)  
 $\omega$  : kecepatan sudut (rad/s)  
 $I$  : momen inersia ( $\text{kg m}^2$ )

#### Contoh 6.4

Sebuah roda memiliki massa 40 kg dan diameter 120 cm. Roda tersebut berputar dengan kecepatan sudut 5 rad/s. Hitunglah besar momentum sudutnya!

- Diketahui : a.  $R = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$   
 b.  $m = 40 \text{ kg}$   
 c.  $\omega = 5 \text{ rad/s}$

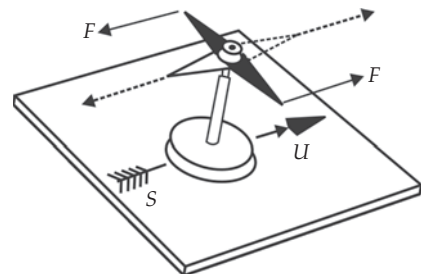
Ditanyakan :  $L = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned}
 L &= m \times R^2 \times \omega \\
 &= 40 \times (0,6)^2 \times 5 \\
 &= 72 \text{ kgm}^2/\text{s}
 \end{aligned}$$

## 4. Momen Kopel

Kopel adalah pasangan dua gaya sama besar dan berlawanan arah yang garis-garis kerjanya sejajar tetapi tidak berimpit. Contoh kopel adalah gaya-gaya yang bekerja pada jarum kompas di dalam medan magnetik bumi. Pada kutub utara dan kutub selatan jarum, bekerja gaya yang sama besar, tetapi arahnya berlawanan.



Gambar 6.7 Gaya-gaya yang bekerja pada kedua kutub jarum kompas.

Besarnya kopel dinyatakan dengan momen kopel ( $M$ ), yaitu hasil perkalian salah satu gaya dengan jarak tegak lurus antara kedua gaya tersebut. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$M = F \times d$$

Keterangan:

$M$  : momen kopel (Nm)

$F$  : gaya (N)

$d$  : jarak antargaya (m)

Pengaruh kopel pada suatu benda memungkinkan benda tersebut berotasi. Jika kopel berotasi searah jarum jam diberi nilai negatif (-), dan jika berlawanan dengan arah jarum jam diberi nilai positif (+).

### Contoh 6.5

Perhatikan gambar di samping! Pada batang  $AD$  bekerja empat buah gaya sejajar, masing-masing  $F_1 = F_3 = 8$  N dan  $F_2 = F_4 = 12$  N. Tentukan besar momen kopel pada batang  $AD$ !

Diketahui : a.  $AB = BC = CD = 1$  m

b.  $F_1 = F_3 = 8$  N

c.  $F_2 = F_4 = 12$  N

Ditanyakan :  $M_{AD} = \dots$ ?

Jawab:

$F_1$  dan  $F_3$  adalah momen kopel  $M_{AC}$

$$M_{AC} = F_1 \times AC = 8 \times 2 = 16 \text{ Nm}$$

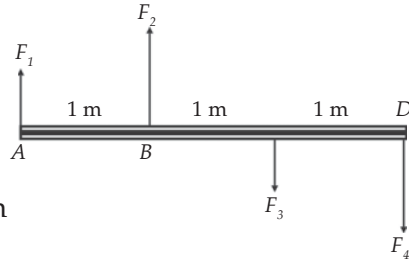
$F_2$  dan  $F_4$  adalah momen kopel  $M_{BD}$

$$M_{BD} = F_3 \times BD = 12 \times 2 = 24 \text{ Nm}$$

Momen kopel pada batang  $AD$  adalah  $M_{AD}$

$$M_{AD} = M_{AC} \times M_{BD} = 16 + 24 = +40 \text{ Nm}$$

(Tanda positif (+) menyatakan putaran searah jarum jam).



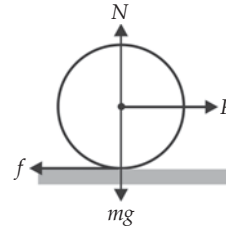
## C. Gerak Menggelinding

Bola yang menggelinding di atas bidang akan mengalami dua gerakan sekaligus, yaitu rotasi terhadap sumbu bola dan translasi bidang yang dilalui. Oleh karena itu, benda yang melakukan gerak menggelinding memiliki persamaan rotasi ( $\sum \tau = I \times \alpha$ ) dan persamaan translasi ( $\sum F = m \times a$ ). Besarnya energi kinetik yang dimiliki benda menggelinding adalah jumlah energi kinetik rotasi dan energi kinetik translasi. Anda disini akan mempelajari bola menggelinding pada bidang datar dan bidang miring.



## 1. Menggelinding pada Bidang Datar

Perhatikan Gambar 6.8! Sebuah silinder pejal bermassa  $m$  dan berjari-jari  $R$  menggelinding sepanjang bidang datar horizontal. Pada silinder diberikan gaya sebesar  $F$ . Berapakah percepatan silinder tersebut jika silinder menggelinding tanpa selip? Jika silinder bergulir tanpa selip, maka silinder tersebut bergerak secara translasi dan rotasi. Pada kedua macam gerak tersebut berlaku persamaan-persamaan berikut.



Gambar 6.8 Benda menggelinding pada bidang datar horizontal.

- Untuk gerak translasi berlaku persamaan  $F - f = m a$  dan  $N - m g = 0$
- Untuk gerak rotasi berlaku persamaan  $\tau = I \times \alpha$

Karena silinder bergulir tanpa selip, maka harus ada gaya gesekan. Besarnya gaya gesekan pada sistem ini adalah sebagai berikut.

$$I \alpha = f R \Leftrightarrow f = \frac{I \alpha}{R}$$

Jika  $\alpha = \frac{a}{R}$ , maka  $f = \frac{I}{R} \left( \frac{a}{R} \right) = I \left( \frac{a}{R^2} \right)$

Jika disubstitusikan ke dalam persamaan  $F - f = m a$ , maka persamaanya menjadi seperti berikut.

$$F - I \left( \frac{a}{R^2} \right) = m a$$

$$F = \left( m + \frac{I}{R^2} \right) a$$

$$a = \frac{F}{m + \frac{I}{R^2}}$$

Karena  $I = \frac{1}{2} m R^2$  maka:

$$a = \frac{F}{m + \frac{\frac{1}{2} m R^2}{R^2}} = \frac{F}{m + \frac{1}{2} m} = \frac{2F}{3m}$$

### Contoh 6.6

Sebuah bola pejal bermassa 10 kg berjari-jari 70 cm menggelinding di atas bidang datar karena dikenai gaya 14 N. Tentukan momen inersia, percepatan tangensial tepi bola, percepatan sudut bola, gaya gesekan antara bola dan bidang datar, serta besarnya torsi yang memutar bola!

Diketahui : a.  $m = 10 \text{ kg}$   
b.  $R = 70 \text{ cm} = 0,7 \text{ m}$   
c.  $F = 14 \text{ N}$

Ditanyakan : a.  $I = \dots?$   
b.  $a = \dots?$   
c.  $\alpha = \dots?$   
d.  $f_g = \dots?$   
e.  $\tau = \dots?$

Jawab:

a. Karena bola pejal, maka

$$I = \left(\frac{2}{5}\right)mR^2 = \left(\frac{2}{5}\right) \times 10 \times (0,7)^2 = 1,96 \text{ kgm}^2$$

$$\text{b. } a = \frac{F}{m(1+k)} = \frac{14}{10(1+\frac{2}{5})} = 1 \text{ m/s}^2$$

$$\text{c. } \alpha = \frac{a}{R} = \frac{1}{0,7} = \frac{10}{7} \text{ rad/s}^2$$

$$\text{d. } f_g = \frac{I \alpha}{R} = \frac{1,96 \times \frac{10}{7}}{0,7} = 4 \text{ N}$$

$$\text{e. } \tau = I \alpha = 1,96 \times \frac{10}{7} = 2,8 \text{ Nm}$$

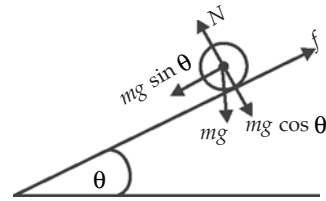
## 2. Menggelinding pada Bidang Miring

Gerak translasi diperoleh dengan mengasumsikan semua gaya luar bekerja di pusat massa silinder. Menurut hukum Newton:

- Persamaan gerak dalam arah normal adalah  $N - mg \cos \theta = 0$ .
- Persamaan gerak sepanjang bidang miring adalah  $mg \sin \theta - f = ma$ .
- Gerak rotasi terhadap pusat massanya  $\tau = I \times \alpha$ .

Gaya normal  $N$  dan gaya berat  $mg$  tidak dapat menimbulkan rotasi terhadap titik  $O$ . Hal ini disebabkan garis kerja gaya melalui titik  $O$ , sehingga lengan momennya sama dengan nol. Persamaan yang berlaku adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 mg \sin \theta - f &= ma \\
 mg \sin \theta - I\left(\frac{a}{R^2}\right) &= ma \\
 \frac{a}{R^2} + ma &= mg \sin \theta \\
 \left(\frac{a}{R^2} + m\right)a &= mg \sin \theta
 \end{aligned}$$



Gambar 6.9 Menggelinding pada bidang miring.

$$a = \frac{mg \sin \theta}{\frac{I}{R^2} + m}$$

Karena  $I = \frac{1}{2}mR^2$  maka persamannya menjadi seperti berikut.

$$a = \frac{mg \sin \theta}{\frac{1}{2}m + m} = \frac{2}{3}g \sin \theta$$

Berapakah kelajuan benda yang menggelinding saat sampai di dasar bidang miring? Misalnya selisih tinggi vertikal puncak bidang miring dengan dasarnya adalah  $h$  meter. Besarnya perubahan tenaga potensial gravitasi menjadi tenaga kinetik yang dialami benda adalah sebagai berikut.

$$E_k \text{ translasi} + E_k \text{ rotasi} = E_p \text{ gravitasi}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2}m v^2 + \frac{1}{2}I \omega &= m g h \\
 \frac{1}{2}m v^2 + \frac{1}{2}I\left(\frac{v}{R}\right) &= m g h \\
 \frac{1}{2}v^2 \left(m + \frac{I}{R^2}\right) &= m g h \\
 v^2 &= \frac{2mgh}{\left(m + \frac{I}{R^2}\right)} \\
 v^2 &= \frac{2mgh}{\left(m + \frac{kmR^2}{R^2}\right)} \\
 v^2 &= \frac{2mgh}{(m + km)} \\
 v^2 &= \frac{2gh}{(1 + k)}
 \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan benda di dasar bidang miring setelah menggelinding adalah sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+k}}$$

**Catatan:**

$k$  adalah bilangan real yang diperoleh dari rumus inersia benda (lihat kembali Gambar 6.5). Misalkan, untuk:

- silinder pejal :  $I = \frac{1}{2} m R^2 \rightarrow k = \frac{1}{2}$
- bola pejal :  $I = \frac{1}{2} m R^2 \rightarrow k = \frac{2}{5}$
- bola berongga :  $I = \frac{1}{2} m R^2 \rightarrow k = \frac{2}{5}$

Sebagai contoh, untuk bola pejal ( $k = \frac{2}{5}$ ), maka nilai  $v$  adalah sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+k}} = \sqrt{\frac{10gh}{7}} = \sqrt{\frac{(5)2gh}{5+2}} = \sqrt{\frac{10gh}{7}}$$

**Contoh 6.7**

Sebuah bola pejal bermassa 10 kg berjari-jari 10 cm menggelinding di atas bidang miring  $37^\circ$ . Jika gaya gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukanlah hal-hal berikut.

- a. Momen inersia bola!
- b. Percepatan bola!
- c. Percepatan sudut bola!
- d. Gaya gesek antara bola dan lantai!
- e. Torsi yang memutar bola!

Diketahui : a.  $m = 10 \text{ kg}$   
                   b.  $R = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$   
                   c.  $g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan : a.  $I = \dots?$   
                   b.  $a = \dots?$   
                   c.  $\alpha = \dots?$   
                   d.  $f_g = \dots?$   
                   e.  $\tau = \dots?$

Jawab:

a. Karena bola pejal, maka

$$I = \left(\frac{2}{5}\right) mR^2 = \left(\frac{2}{5}\right) \times 10 \times (0,1)^2 = 0,04 \text{ kgm}^2$$

b. Karena bola pejal maka  $a = \frac{(g \sin \theta)}{(1+k)} = \frac{(10 \times 0,6)}{\left(\frac{7}{5}\right)} = \frac{30}{7} \text{ m/s}^2$

$$c. \alpha = \frac{a}{R} = \frac{\left(\frac{30}{7}\right)}{0,1} = \frac{120}{7} \text{ rad/s}^2$$

$$d. f_g = \frac{I \alpha}{R} = \frac{0,04 \times \frac{300}{7}}{0,1} = \frac{120}{7} \text{ N}$$

$$e. \tau = I \alpha = 0,04 \times \frac{120}{7} = 12 \text{ Nm}$$

## D. Keseimbangan Benda Tegar dan Hukum Kekekalan Momentum Sudut

*Benda tegar* adalah benda yang tidak mengalami perubahan bentuk akibat pengaruh gaya atau momen gaya. Sebenarnya benda tegar hanyalah suatu model idealisasi. Karena pada dasarnya semua benda akan mengalami perubahan bentuk apabila dipengaruhi oleh suatu gaya atau momen gaya. Namun, karena perubahannya sangat kecil, pengaruhnya terhadap keseimbangan statis dapat diabaikan.

Apabila partikel hanya mengalami gerak translasi, maka benda tegar mengalami gerak translasi dan gerak rotasi. Benda tegar mengalami keseimbangan translasi jika resultan gaya yang bekerja pada benda tersebut sama dengan nol. Benda tersebut tidak mengalami percepatan sudut ( $\omega = 0$ ), melainkan hanya bergerak dengan kecepatan tetap  $v$ .

Benda yang mengalami keseimbangan rotasi memiliki resultan momen gaya (torsi) sama dengan nol, kecepatan sudut konstan, dan percepatan sudutnya sama dengan nol. Agar suatu benda tegar berada dalam keadaan seimbang, diperlukan dua syarat, yaitu resultan gaya dan resultan momen gaya terhadap suatu titik sembarang sama dengan nol. Jika gaya-gaya bekerja pada bidang  $XY$ , maka syarat keseimbangan benda tegar adalah  $\Sigma F_x = 0$  atau  $\Sigma F_y = 0$  dan  $\Sigma \tau = 0$ .

Pernahkah Anda mengamati seorang pelompat indah atau pemain akrobat beraksi? Pada waktu berputar di udara, pelompat indah atau pemain akrobat menekuk kakinya sampai berimpit dengan badannya. Apa maksud dan tujuan mereka melakukan itu? Ingat, pada peristiwa tumbukan antara dua buah benda, berlaku hukum kekekalan momentum. Apabila tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem, maka momentum sistem bersifat kekal. Sebaliknya, jika pada sistem dikenai gaya luar, maka momentum akan berubah. Besar perubahan momentum benda sama dengan impuls benda, yaitu hasil kali antara gaya dan selang waktu ( $F \times \Delta t = \Delta p$ ).

Anda ketahui bahwa persamaan momen gaya dapat ditulis  $\tau = I \times \alpha$ .

Persamaan ini juga dapat ditulis  $\tau = \frac{d(I\omega)}{dt} = \frac{dL}{dt}$ . Jika tidak ada momen

gaya luar yang bekerja pada sistem ( $\sum \tau = 0$ ), maka momentum sudut  $L$  akan konstan. Artinya, momentum sudut adalah kekal atau tetap. Hal inilah yang disebut hukum kekekalan momentum sudut. Hukum kekekalan momentum sudut berbunyi *"Jika tidak ada gaya yang memengaruhi pada sistem, momentum sudut sistem adalah tetap"*. Hukum tersebut dapat diartikan bahwa momentum sudut sebelum dan sesudah peristiwa adalah tetap.

$$L = L' \text{ atau } I \omega = I' \omega'$$

Contoh aplikasi hukum kekekalan momentum sudut adalah gerak pelompat indah, gerak penari balet, dan gerak akrobat.

## 1. Peloncat Indah

Pada saat peloncat indah hendak melakukan putaran di udara, ia akan menekuk tubuhnya. Hal ini untuk mengurangi momen inersianya, sehingga kercepatan sudutnya menjadi lebih besar. Pada tahap akhir loncatan, peloncat meluruskan lagi tubuhnya, meningkatkan momen inersianya sehingga secara otomatis memperkecil kecepatan sudutnya. Hal ini menyebabkan peloncat dapat masuk ke dalam air lebih halus tanpa terdengar suara percikan air yang keras.



Sumber: Kamus Visual

Gambar 6.10 Peloncat indah.

## 2. Penari Balet

Seorang penari balet akan menarik tangannya ke dekat badannya untuk berputar lebih cepat dan mengembangkan kedua tangannya untuk berputar lebih lambat. Ketika penari menarik kedua tangannya ke dekat badannya, momen inersia sistem berkurang sehingga kecepatan sudut penari makin besar. Sebaliknya ketika kedua tangannya mengembang, inersia sistem meningkat sehingga kecepatan sudut penari makin kecil.



Sumber: CD Clipart

Gambar 6.11 Penari balet.

## 3. Pemain Akrobat

Seorang pemain akrobat yang melakukan gerak berputar di udara menekuk kedua kakinya sampai berimpit dengan badan. Hal ini mengakibatkan momen inersia badan pemain menjadi lebih kecil. Menurut hukum kekekalan momentum sudut, momentum sebelum dan sesudah peristiwa adalah tetap. Akibatnya, dengan mengecilnya momen inersia, kecepatan sudutnya menjadi lebih besar. Dengan lebih besarnya kecepatan sudut, jumlah putarannya akan menjadi lebih banyak. Hal ini mengurangi beban yang harus di tanggung kakinya saat mendarat.



Sumber: Kamus Visual

Gambar 6.12 Pemain akrobat

### Contoh 6.8

Seorang penari balet memiliki momen inersia  $8 \text{ kgm}^2$  ketika kedua lengannya telentang dan  $2 \text{ kg m}^2$  ketika merapat ke tubuhnya. Pada saat kedua lengannya terentang, penari tersebut berputar dengan kelajuan 3 putaran/s. Setelah itu, kedua lengannya dirapatkan ke tubuhnya. Tentukanlah laju putaran penari ketika kedua lengannya merapat!

- Diketahui : a.  $I = 8 \text{ kgm}^2$   
b.  $I' = 2 \text{ kg m}^2$   
c.  $\omega = 3 \text{ putaran/s}$

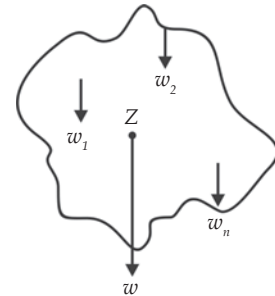
Ditanyakan :  $\omega' = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} I \omega = I' \omega' \Rightarrow \omega' &= \frac{I \omega}{I'} \\ &= \frac{8 \times 3}{2} \\ &= 12 \text{ putaran/s} \end{aligned}$$

## E. Titik Berat

Sebuah benda terdiri atas banyak partikel. Setiap partikel mempunyai massa. oleh karena itu, tiap partikel mempunyai berat dan titik berat yang berbeda-beda. Partikel-partikel tersebut masing-masing mempunyai gaya berat  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  dengan resultan gaya berat  $w$  (lihat Gambar 6.13). Resultan dari seluruh gaya berat benda yang terdiri atas bagian-bagian kecil benda dinamakan *gaya berat*. Titik tangkap gaya berat inilah yang disebut *titik berat*.



Gambar 6.13 Sebuah benda dengan titik berat Z.

### 1. Menentukan Titik Berat Benda yang Bentuknya Tidak Teratur

Untuk menentukan letak titik berat benda berupa keping tipis yang bentuknya tidak beraturan dapat dilakukan dengan percobaan berikut .



#### Kegiatan 6.1

##### Titik Berat Benda

###### A. Tujuan

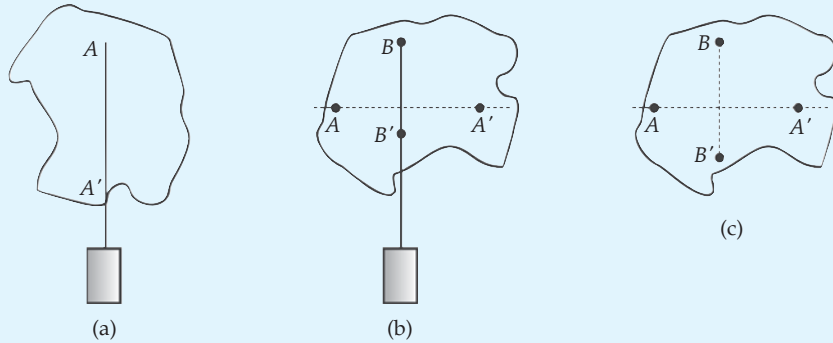
Anda dapat menentukan letak titik berat benda yang bentuknya tidak beraturan (sembarangan).

###### B. Alat dan Bahan

1. Karton
2. Jarum
3. Benang
4. Paku
5. Bandul



### C. Langkah Kerja



1. Buatlah lubang sembarang titik A pada tepi benda. Kemudian tusukkan jarum yang sudah dilengkapi bandul sehingga benang dalam kondisi vertikal. Biarkan karton dapat bergerak bebas. Tentukan sembarang titik A' vertikal di bawah titik A kemudian hubungkan AA' (lihat gambar a)!
2. Ulangi kegiatan yang sama untuk titik B dan B' (seperti gambar b)!
3. Garis AA' akan berpotongan dengan BB' pada titik berat benda, misalnya Anda beri tanda Z.

## 2. Menentukan Titik Berat Benda yang Bentuknya Teratur

Titik berat beberapa benda homogen yang berdimensi satu, dua dan tiga dapat dilihat pada tabel berikut!

Tabel 6.1 Titik Berat Benda Homogen Berbentuk Garis

No	Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat
1.	Garis lurus		$X_0 = 1/2 l$ z : titik tengah garis
2.	Busur Lingkaran		$Y_0 = R \times \frac{\text{tali busur AB}}{\text{busur AB}}$ R : jari-jari lingkaran
3.	Busur setengah lingkaran		$Y_0 = \frac{4R}{3\pi}$ R : jari-jari lingkaran

Sumber: Fisika, Kane & Sternheim, 1991.

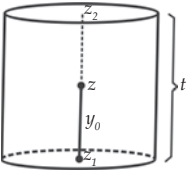
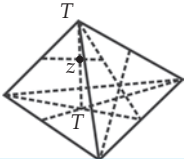
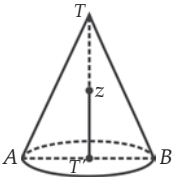
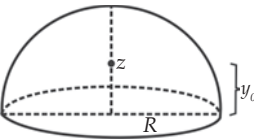
Tabel 6.2 Titik Berat Benda Homogen Dimensi Dua

No	Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat
1.	Segitiga		$Y_0 = \frac{1}{2}t$ <p><math>t</math> : tinggi segitiga  <math>z</math> : perpotongan garis-garis berat AD dan CF</p>
2.	Jajargenjang, belah ketupat, bujur sangkar, persegi panjang		$Y_0 = \frac{2}{3}R \frac{\text{tali busur AB}}{\text{busur AB}}$ <p><math>t</math> : tinggi segitiga  <math>z</math> : perpotongan diagonal AC dan BD</p>
3.	Jaring lingkaran		$Y_0 = \frac{2}{3}R \frac{\text{tali busur AB}}{\text{busur AB}}$ <p><math>R</math> : jari-jari lingkaran</p>
4.	Setengah lingkaran		$Y_0 = \frac{4R}{3\pi}$ <p><math>R</math> : jari-jari lingkaran</p>

Sumber: Fisika, Kane & Sternheim, 1991.

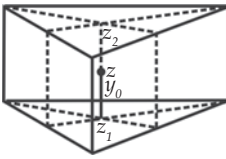
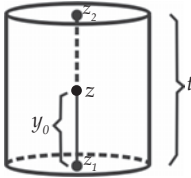
Tabel 6.3 Titik Berat Benda yang Berupa Selimut Ruang

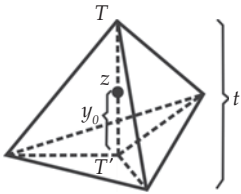
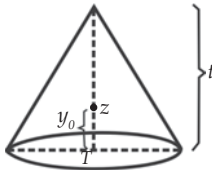
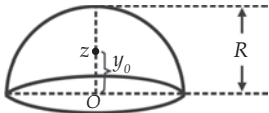
No	Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat
1.	Kulit prisma		<p><math>z</math> pada titik tengah garis</p> $z_1 z_2 : Y_0 = \frac{1}{2}t$ <p><math>z_1</math> : titik berat bidang alas  <math>z_2</math> : titik berat bidang atas  <math>l</math> : panjang sisi tegak</p>

2.	Kulit silinder (tanpa tutup)		$Y_0 = \frac{1}{2}t$ $t$ : tinggi silinder
3.	Kulit limas		$T'z = \frac{1}{3}T'T$ $T'T$ : garis tinggi ruang
4.	Kulit kerucut		$Y_0 = zT' = \frac{1}{3}T'T$ $T'T$ : tinggi kerucut
5.	Kulit setengah bola		$Y_0 = \frac{1}{2}R$ $R$ : jari-jari bola

Sumber: Fisika, Kane & Sternheim, 1991.

**Tabel 6.4 Titik Berat Benda Pejal Tiga Dimensi**

No	Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat
1.	Prisma pejal		$Y_0 = \frac{1}{2}t$ $z_1$ : titik berat bidang alas $z_2$ : titik berat bidang atas $t$ : panjang sisi tegak
2.	Silinder pejal		$Y_0 = \frac{1}{2}t$ $t$ : tinggi silinder

3.	Limas pejal beraturan		$Y_0 = \frac{1}{3}t$ $t$ : garis tinggi ruang $V$ : luas alas $\times \frac{1}{3}$ tinggi
4.	Kerucut pejal		$Y_0 = \frac{1}{3}t$ $t$ = tinggi kerucut $V$ = luas alas $\times \frac{1}{3}$ tinggi
5.	Setengah bola pejal		$Y_0 = \frac{3}{8}R$ $R$ : jari-jari bola

Sumber: Fisika, Kane & Sternheim, 1991.

### 3. Menentukan Titik Berat Benda dari Gabungan Beberapa Benda

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa setiap benda terdiri atas partikel-partikel yang masing-masing memiliki gaya berat. Semua gaya berat ini dapat dianggap sejajar satu sama lain. Berdasarkan cara penentuan koordinat titik tangkap gaya resultan, koordinat titik berat-titik berat benda dapat ditentukan sebagai berikut.

$$X_0 = \frac{w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + \dots w_nx_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots w_n} = \frac{\sum w_nx_n}{\sum w_n}$$

$$Y_0 = \frac{w_1y_1 + w_2y_2 + w_3y_3 + \dots w_ny_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots w_n} = \frac{\sum w_ny_n}{\sum w_n}$$

Mengingat gaya berat  $w = mg$  sedangkan nilai  $g$  tergantung pada posisi benda dalam medan gravitasi, maka sebenarnya titik berat benda tidak sama dengan pusat massa. Namun, hampir semua persoalan mekanika hanya menyangkut benda-benda berukuran kecil dibandingkan jarak yang dapat memberikan perubahan nilai  $g$  yang signifikan. Oleh karena itu, nilai  $g$  dapat dianggap seragam atau sama pada seluruh bagian benda. Akibatnya, titik pusat massa juga dapat dianggap sebagai satu titik yang sama. Koordinat titik pusat massa ( $X_{pm}$ ,  $Y_{pm}$ ) dapat Anda turunkan dari koordinat titik berat benda.

$$\begin{aligned}
X_{\text{pm}} = X_o &= \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \dots w_n x_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots w_n} \\
&= \frac{(m_1 g) x_1 + (m_2 g) x_2 + (m_3 g) x_3 + \dots + (m_n g) x_n}{m_1 g + m_2 g + m_3 g + m_n g} \\
&= \frac{(m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots m_n x_n) g}{(m_1 + m_2 + m_3 + m_n) g} \\
&= \frac{(m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots + m_n x_n)}{(m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n)} = \frac{\Sigma m_n x_n}{\Sigma m_n}
\end{aligned}$$

Menggunakan cara yang sama diperoleh:

$$Y_{\text{pm}} = Y_o = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \dots + m_n y_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n} = \frac{\Sigma m_n y_n}{\Sigma m_n}$$

#### a. Titik Berat Benda-Benda Homogen Berbentuk Ruang (Dimensi Tiga)

Massa benda berdimensi tiga ( $m$ ) dapat ditentukan dari hasil kali massa jenis benda ( $\rho$ ) dengan volume benda ( $V$ ). Koordinat titik pusat massa ( $X_{\text{pm}}, Y_{\text{pm}}$ ) pada benda berdimensi tiga dapat Anda turunkan dari koordinat titik berat benda.

$$X_o = \frac{\rho_1 V_1 x_1 + \rho_2 V_2 x_2 + \rho_3 V_3 x_3 + \dots + \rho_n V_n x_n}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3 + \dots + \rho_n V_n}$$

Benda homogen memiliki massa jenis yang sama ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$ ) sehingga

$$X_o = \frac{\rho(V_1 x_1 + V_2 x_2 + V_3 x_3 + \dots + V_n x_n)}{\rho(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)} = \frac{V_1 x_1 + V_2 x_2 + V_3 x_3 + \dots + V_n x_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}$$

Dengan demikian, koordinat titik berat gabungan beberapa benda homogen berdimensi tiga dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$X_o = \frac{V_1 x_1 + V_2 x_2 + V_3 x_3 + \dots + V_n x_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n} = \frac{\Sigma V_n x_n}{\Sigma V_n}$$

$$Y_o = \frac{V_1 y_1 + V_2 y_2 + V_3 y_3 + \dots + V_n y_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n} = \frac{\Sigma V_n y_n}{\Sigma V_n}$$

## b. Titik Berat Benda-Benda Homogen Berbentuk Luasan

Benda berbentuk luasan atau berdimensi dua merupakan benda yang ketebalannya dapat diabaikan sehingga berat benda sebanding dengan luasnya ( $A$ ). Koordinat titik berat gabungan beberapa benda homogen berbentuk luasan dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X_o = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + \dots + A_n x_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} = \frac{\Sigma A_n x_n}{\Sigma A_n}$$

$$Y_o = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3 + \dots + A_n y_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} = \frac{\Sigma A_n y_n}{\Sigma A_n}$$

## c. Titik Berat Benda-Benda Homogen Berbentuk Garis

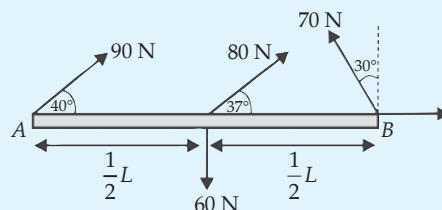
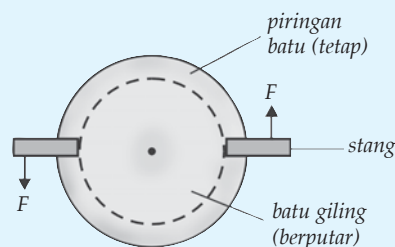
Benda berbentuk garis atau berdimensi satu merupakan benda yang lebar dan tebalnya dapat diabaikan sehingga berat benda sebanding dengan panjangnya ( $\ell$ ). Koordinat titik berat gabungan beberapa benda homogen berbentuk garis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X_o = \frac{\ell_1 x_1 + \ell_2 x_2 + \ell_3 x_3 + \dots + \ell_n x_n}{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_n} = \frac{\Sigma \ell_n x_n}{\Sigma \ell_n}$$

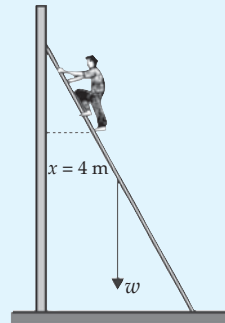
$$Y_o = \frac{\ell_1 y_1 + \ell_2 y_2 + \ell_3 y_3 + \dots + \ell_n y_n}{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_n} = \frac{\Sigma \ell_n y_n}{\Sigma \ell_n}$$

### Soal Kompetensi 6.2

1. Jelaskan dengan kata-kata Anda sendiri apa perbedaan momen gaya dan momen kopel!
2. Pada penggilingan tahu secara tradisional, digunakan dua tenaga kerja untuk memutar batu giling. Gaya dorong tenaga kerja tersebut sama, yaitu 400 N. Jarak stang giling terhadap pusat roda 150 cm. Hitunglah momen kopel pada penggilingan tahu tersebut!
3. Perhatikan gambar disamping! Tentukan besar momen gaya terhadap titik A jika panjang batang  $L = 5$  m!



4. Tentukan persamaan energi kinetik rotasi, usaha kinetik, dan daya rotasi?
5. Silinder pejal menggelinding di atas bidang datar karena dipengaruhi gaya mendatar 10 N tepat pada pusat silinder. Massa silinder 8 kg dan jari-jarinya 10 cm. Hitung percepatan yang dialami silinder serta energi kinetik silinder setelah gaya bekerja selama 6 sekon!
6. Sebuah silinder pejal dengan massa 10 kg, dan jari-jari 20 cm dilepas dari puncak bidang miring. Silinder menggelinding sempurna sepanjang bidang miring. Jika sudut kemiringan bidang adalah  $\theta$  ( $\tan \theta = \frac{3}{4}$ ) dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan hal-hal berikut.
  - a. Percepatan silinder menyusuri bidang miring!
  - b. Koefisien gesekan antara silinder dengan bidang hingga terjadinya peristiwa menggelinding!
  - c. Panjang bidang miring tepat 4 sekon setelah silinder dilepas!
7. Perhatikan gambar di samping! Diketahui sebuah tangga dengan massa 80 kg tersandar pada dinding tanpa gesekan.
  - a. Tentukan arah dan besar gaya yang bekerja pada ujung-ujung tangga!
  - b. Tentukan arah dan besar gaya yang bekerja pada ujung-ujung tangga apabila ada tambahan beban orang dengan massa 50 kg berkedudukan seperti tampak pada gambar!



## F. Macam-Macam Keseimbangan

Keseimbangan translasi adalah keseimbangan yang dialami benda ketika bergerak dengan kecepatan linear konstan ( $v$  konstan) atau tidak mengalami perubahan linear ( $a = 0$ ). *Keseimbangan rotasi* adalah keseimbangan yang dialami benda ketika bergerak dengan kecepatan sudut konstan ( $\omega$  konstan) atau tidak mengalami percepatan sudut ( $\alpha = 0$ ).

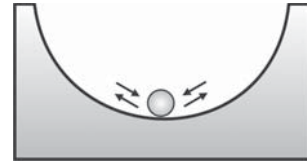
Jika sebuah benda yang berada dalam keadaan seimbang stabil dipengaruhi oleh gaya luar, maka benda tersebut mengalami gerak translasi (menggeser) dan gerak rotasi (mengguling). Gerak translasi (menggeser) disebabkan oleh gaya, sedangkan gerak rotasi (mengguling) disebabkan oleh momen gaya. Oleh karena itu, Anda dapat menyatakan syarat-syarat kapan suatu benda akan menggeser, mengguling, atau menggelinding (menggeser dan mengguling).

- Syarat benda menggeser adalah  $\Sigma F \neq 0$  dan  $\Sigma \tau = 0$
- Syarat benda mengguling adalah  $\Sigma F = 0$  dan  $\Sigma \tau \neq 0$
- Syarat benda menggelinding adalah  $\Sigma F \neq 0$  dan  $\Sigma \tau \neq 0$

Berdasarkan kedudukan titik beratnya, keseimbangan benda ketika dalam keadaan diam (keseimbangan statis) dikelompokkan menjadi tiga, yaitu keseimbangan stabil, keseimbangan labil, dan keseimbangan indeferen.

## 1. Keseimbangan Stabil

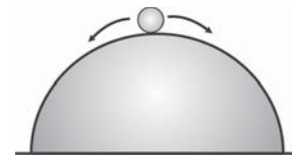
*Keseimbangan stabil* adalah keseimbangan yang dialami benda di mana apabila dipengaruhi oleh gaya atau gangguan kecil benda tersebut akan segera ke posisi keseimbangan semula. Gambar 6.14 menunjukkan sebuah kelereng yang ditempatkan dalam bidang cekung. Ketika diberi gangguan kecil dan kemudian dihilangkan, kelereng akan kembali ke posisi semula. Keseimbangan stabil ditandai oleh adanya kenaikan titik benda jika dipengaruhi suatu gaya.



Gambar 6.14 Keseimbangan stabil.

## 2. Keseimbangan Labil

*Keseimbangan labil* adalah keseimbangan yang dialami benda yang apabila diberikan sedikit gangguan benda tersebut tidak bisa kembali ke posisi keseimbangan semula. Pada Gambar 6.15 menunjukkan sebuah kelereng yang ditempatkan di atas bidang cembung. Ketika diberi gangguan kecil dan kemudian dihilangkan, kelereng tidak akan pernah kembali ke posisi awalnya. Keseimbangan labil ditandai oleh adanya penurunan titik berat benda jika dipengaruhi suatu gaya.



Gambar 6.15 Keseimbangan labil.

## 3. Keseimbangan Indeferen

*Keseimbangan indeferen* atau *netral* adalah keseimbangan yang dialami benda yang apabila diberikan sedikit gangguan benda tersebut tidak mengalami perubahan titik berat benda. Pada Gambar 6.16 menunjukkan sebuah kelereng yang ditempatkan di atas sebuah bidang datar. Ketika diberi gangguan kecil dan kemudian dihilangkan, kelereng akan kembali diam pada kedudukan yang berbeda. Keseimbangan netral ditandai oleh tidak adanya perubahan pasti titik berat jika dipengaruhi suatu gaya.



Gambar 6.16 Keseimbangan indeferen.



## Kolom Diskusi

Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Setiap kelompok dapat terdiri atas 4 sampai 6 anak. Diskusikan hal-hal berikut!

1. Mengapa lebih sulit berdiri di atas satu kaki dibandingkan di atas dua kaki!
2. Pada saat meniti bambu atau kayu, mengapa saat akan jatuh kedua tangan Anda secara reflek direntangkan?
3. Mengapa mobil yang bentuknya relatif lebih tinggi (bus) mudah terguling dibanding mobil yang bentuknya relatif pendek (sedan)?

Buatlah kesimpulan dari diskusi tersebut. Mintalah kepada guru Anda agar memilih salah satu kelompok untuk mempresentasikan hasil diskusinya!

## Info Kita

### Yoyo



Sumber: Suara Merdeka, edisi 264 2005

Apakah Anda pernah bermain yoyo? Sepintas yoyo hanya mainan sederhana. Terbuat dari bahan kayu, plastik, atau besi berbentuk bulat dengan sebuah rongga dan porosnya diikat seutas benang. Di tangan pemain yoyo yang mahir, yoyo menjadi pertunjukan yang menakjubkan. Yoyo termasuk jenis permainan kuno yang sampai sekarang masih populer. Orang Yunani kuno telah bermain yoyo sekitar 2.500 tahun yang lalu. Fakta-fakta menunjukkan nenek moyang orang Cina juga memiliki mainan serupa yoyo.

Ada beragam desain yoyo. Pada yoyo tradisional, benangnya diikat erat ke poros. Yoyo tradisional mula-mula banyak digunakan di Eropa. Pada yoyo modern, benangnya berbentuk laso. Yoyo modern dibawa dari Filipina ke Amerika Serikat pada tahun 1920-an.

Yoyo memiliki energi potensial. Energi ini berasal dari dua sumber, yaitu gaya gravitasi (melalui lemparan) dan laso yang memungkinkan yoyo berotasi. Ketika yoyo dimainkan, kedua energi potensial itu berubah menjadi energi kinetik. Yoyo jatuh lurus ke tanah karena lemparan dan gaya gravitasi. Pada saat yang sama, tali memberi energi putar. Saat yoyo

sampai pada ujung benang, energi putar belum habis sehingga yoyo terus berotasi dalam keadaan “diam”. Dalam bahasa Inggris, kondisi tersebut dinamakan *sleep*

Rotasi yoyo membuatnya stabil. Agar yoyo naik ke atas, Anda harus menyentak talinya. Gerakan *sleep* tidak mungkin terjadi pada yoyo tradisional sebab talinya terikat erat pada poros, sehingga saat yoyo sampai pada ujung benang, yoyo akan membalik ke atas (ke tangan pemain yoyo).

Gerakan *sleep* memungkinkan pemain yoyo melakukan beragam trik. Maka, pemain yoyo selalu berusaha melakukan *sleep* selama mungkin agar dapat melakukan banyak trik. Salah satu trik adalah *walk the dog*, yaitu yoyo digelindingkan di tanah seperti roda, kemudian ditarik kembali ke tangan.

Pabrik yoyo menciptakan beragam desain yoyo untuk memudahkan *sleep*. Salah satu desain yoyo menggunakan prinsip fisika yang disebut momen inersia. Momen inersia berkaitan dengan kemampuan suatu benda melakukan rotasi. Momen inersia dipengaruhi dua faktor, yaitu massa benda dan jarak massa dari poros. Makin besar massa dan makin jauh jaraknya dari poros, makin besar pula momen inersianya. Jika memiliki momen inersia tinggi, yoyo bisa melakukan *sleep* dalam waktu yang lama. Untuk itu, pabrik yoyo menumpukkan berat pada tepi terluar. Cara lain untuk mendapatkan momen inersia yang tinggi adalah dengan mengurangi gesekan antara poros yoyo dengan benang. Caranya dengan meletakkan bola (gotri) pada sekeliling poros, sehingga poros yoyo tidak bersentuhan dengan benang. Agar lebih halus, gotri bisa diberi minyak pelumas (oli).

Saat dunia tergila-gila dengan yoyo pada tahun 1990-an, sebuah perusahaan bernama Yomega menciptakan yoyo jenis baru. Sama dengan yoyo generasi sebelumnya, benang juga tidak menyentuh poros. Bedanya, benang diletakkan pada pelek. Antara pelek dan poros dipisahkan pegas (per). Saat yoyo diam atau berputar pelan, pegas menekan pelek. Jadi, jika poros berputar, pelek (dan yoyo) ikut berputar. Namun, saat yoyo berputar cepat, gaya sentrifugal menarik pegas sehingga pegas tidak menekan pelek. Jadi, pelek terpisah dari poros. Saat poros berputar, pelek (dan yoyo) tetap diam.

Saat yoyo dilempar, awalnya bergerak pelan. Namun, sesampai di ujung benang, putaran menjadi cepat. Poros berputar, tetapi yoyo diam atau melakukan gerakan *sleep*. Fisika memang dunia yang mengasyikan, dimasa datang kreativitas Andalalah yang ditunggu.

(Dikutip seperlunya dari Suplemen Anak Suara Merdeka, Yunior, edisi 264 2005)

Banyak sekali pemanfaatan keseimbangan benda agar dalam kehidupan sehari-hari, seperti pada pembuatan jembatan dan rumah. Prinsip keseimbangan benda tegar juga diterapkan pada mainan anak "Boneka Tinju". Sekarang buatlah mainan boneka tinju dengan peralatan yang ada disekitar Anda. Buatlah semenarik mungkin dan gunakan prinsip keseimbangan benda tegar. Kumpulkan hasil karya Anda dan teman-teman sekelas Anda. Jika guru dan orang tua Anda mengizinkan, juallah boneka tinju tersebut di pusat keramaian yang terdapat di kota Anda!



## Rangkuman

1. Persamaan momen gaya adalah  $\tau = r \times F$ .
2. Persamaan momen inersia adalah  $I = \sum m_i \times R_i^2$ .
3. Persamaan momentum sudut adalah  $L = I \times \omega$ .
4. Hubungan momen gaya dengan momen inersia adalah  $\tau = I \times \alpha$ .
5. Kopel adalah dua gaya sama besar tetapi berlawanan arah yang dipisahkan oleh jarak. Momen kopel dirumuskan  $M = F \times d$ .
6. Bunyi hukum kekekalan momentum sudut adalah "Jika tidak ada gaya yang memengaruhi pada sistem, momentum sudut sistem adalah tetap".
7. Syarat keseimbangan benda tegar adalah  $\Sigma F_x = 0$  atau  $\Sigma F_y = 0$  dan  $\Sigma \tau = 0$ .
8. Koordinat titik berat atau pusat massa benda adalah:

$$X_o = \frac{w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + \dots w_nx_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots w_n} = \frac{\Sigma w_nx_n}{\Sigma w_n}$$

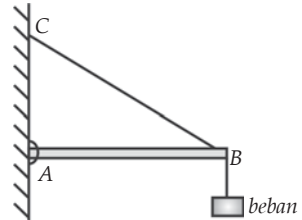
$$Y_o = \frac{w_1y_1 + w_2y_2 + w_3y_3 + \dots w_ny_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots w_n} = \frac{\Sigma w_ny_n}{\Sigma w_n}$$

9. Ada tiga macam keseimbangan, yaitu keseimbangan stabil, labil, dan netral.

## P e l a t i h a n

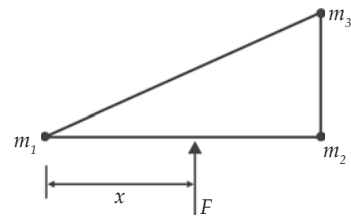
**A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!**

1. Perhatikan gambar di samping! Batang homogen  $AB$  panjangnya 80 cm dengan berat 18 N, berat beban 30 N, dan  $BC$  adalah tali. Jika jarak  $AC = 60$  cm, maka besarnya tegangan pada tali adalah ....



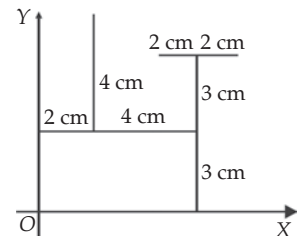
- a. 36 N
- b. 48 N
- c. 50 N
- d. 65 N
- e. 80 N

2. Pada gambar di samping dilukiskan suatu segitiga siku-siku yang sangat ringan, tetapi kuat. Di titik sudutnya ada massa  $m_1$ ,  $m_2$ , dan  $m_3$  masing-masing besarnya 100 gram, 100 gram, dan 300 gram. Jarak antara  $m_1$  dan  $m_2$ ,  $m_2$  dan  $m_3$  masing-masing 40 cm dan 30 cm. Gaya  $F$  mengenai tegak lurus pada kerangka  $m_1 m_2$  dengan jarak  $x$  dari  $m_1$ . Gaya  $F$  sebidang dengan bidang kerangka. Agar titik bergerak translasi murni (tanpa rotasi) besar  $x$  adalah ....



- a. 20 cm
- b. 30 cm
- c. 32 cm
- d. 38 cm
- e. 40 cm

3. Perhatikan gambar di samping! Letak titik berat dari bangun tersebut adalah ....



- a.  $X = 6$  cm;  $Y = 4$  cm
- b.  $X = 4$  cm;  $Y = 6$  cm
- c.  $X = 4,3$  cm;  $Y = 4$  cm
- d.  $X = 4$  cm;  $Y = 4,3$  cm
- e.  $X = 3$  cm;  $Y = 3$  cm

4. Sumbu kedua roda muka dan sumbu kedua roda belakang sebuah truk yang bermassa 1.500 kg berjarak 2 m. Pusat massa truk 1,5 m di belakang roda muka. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , beban yang dipikul oleh kedua roda muka truk itu sama dengan ....

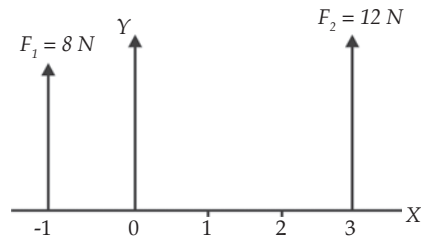
a. 1.250 N  
b. 2.500 N  
c. 3.750 N  
d. 5.000 N  
e. 6.250 N

5. Dari keadaan diam, benda tegar melakukan gerak rotasi dengan percepatan sudut  $15 \text{ rad/s}^2$ . Titik A berada pada benda tersebut berjarak 10 cm dari sumbu putar. Tepat setelah benda berotasi selama 0,4 sekon. A mengalami percepatan total sebesar ....

a.  $1,5 \text{ m/s}^2$   
b.  $2,1 \text{ m/s}^2$   
c.  $3,6 \text{ m/s}^2$   
d.  $3,9 \text{ m/s}^2$   
e.  $5,1 \text{ m/s}^2$

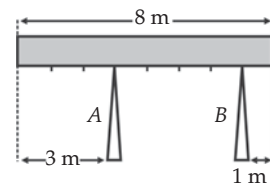
6. Perhatikan gambar diagram di samping! Resultan kedua gaya sejajar terletak pada ....

a.  $X = +0,6 \text{ m}$   
b.  $X = 2,8 \text{ m}$   
c.  $X = +1,4 \text{ m}$   
d.  $X = +1,2 \text{ m}$   
e.  $X = +2,1 \text{ m}$



7. Perhatikan gambar di samping! Balok kayu homogen pada gambar memiliki panjang 8 m dan berat 2.000 N berada di atas dua buah tiang penyangga A dan B. Besar beban yang dirasakan oleh titik A adalah ....

a. 60 N  
b. 90 N  
c. 120 N  
d. 150 N  
e. 180 N



8. Sebuah gaya  $F = (5\mathbf{i} + 4\mathbf{j})$  memiliki lengan momen  $d(a\mathbf{i} + 2\mathbf{j})$  terhadap suatu titik poros. Vektor  $\mathbf{i}$  dan  $\mathbf{j}$  berturut-turut adalah vektor satuan yang searah dengan sumbu X dan Y pada koordinat kartesian. Jika besar momen yang dilakukan gaya  $F$  terhadap titik poros bernilai Nm, maka nilai  $a$  sama dengan....

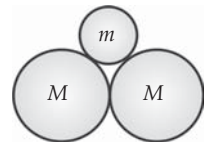
a. 3  
b. 4  
c. 7  
d. 8  
e. 9

9. Besaran vektor yang merupakan perkalian antargaya dengan jarak titik terhadap gaya disebut ....
- benda tegar
  - momen inersia
  - massa benda
  - rotasi benda
  - bola berongga
10. Sebuah batang diputar dengan sumbu putar terletak pada jarak  $\frac{1}{3}$  dari salah satu ujungnya. Bila massa batang  $m$  dan panjang batang  $l$ , maka momen inersianya adalah ....
- $\frac{1}{2} ml^2$
  - $\frac{1}{3} ml^2$
  - $\frac{1}{6} ml^2$
  - $\frac{1}{7} ml^2$
  - $\frac{1}{9} ml^2$

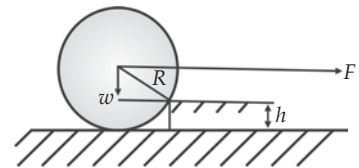
**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

1. Sebuah bandul yang digantungkan pada atap sebuah gerobak berada dalam keadaan setimbang saat gerobak diam. Suatu saat gerobak ditarik dengan gaya konstan sedemikian hingga kecepatannya 13 m/s saat mencapai jarak 5 m. Dalam keadaan gerobak berjalan tersebut, tentukan simpangan bandul terhadap posisi setimbangnya!

2. Perhatikan gambar di samping! Tiga buah bola masing-masing 30 cm dan 20 cm disusun dengan bola kecil berada di atas kedua bola besar. Massa bola kecil sebesar  $m$ , massa bola besar masing-masing  $M$ , dan percepatan gravitasi  $g$ . Hitunglah besar gaya yang dikerjakan oleh salah satu bola besar pada bola kecil!



3. Perhatikan gambar di samping! Sebuah roda akan dinaikkan pada anak tangga. Bila jari-jari =  $R$ , berat roda =  $W$ , tinggi anak tangga =  $h$ , maka tentukan gaya  $F$  minimum yang dibutuhkan agar roda tersebut dapat naik!



4. Suatu batang tipis dengan panjang  $L$  dan massa  $m$  dapat berputar pada sumbu yang terletak pada ujung batang. Pada awalnya batang berada pada posisi horizontal dan kemudian dilepas. Pada saat batang membuat sudut  $\theta$  dengan arah vertikal, tentukan percepatan sudut rotasi batang tersebut!

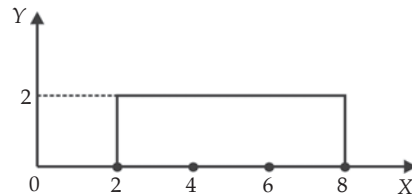
5. Perhatikan gambar di samping! Beban massa 20 kg ditempatkan pada jarak 1,5 m dari kaki B pada sebuah meja datar bermassa 100 kg yang panjangnya 6 m. Hitunglah besarnya gaya yang bekerja pada kaki A untuk menahan beban dan meja tersebut!



6. Pada sistem katrol berbentuk lempeng pejal homogen bermassa  $2m$  jejari  $R$ , dan beban bermassa  $m$ . Tali pada massa dililitkan pada katrol dan semua gesekan diabaikan. Sistem dilepas sehingga bergerak dari keadaan diam. Hitunglah besarnya percepatan sudut rotasi katrol yang dinyatakan dalam percepatan gravitasi ( $g$ )!

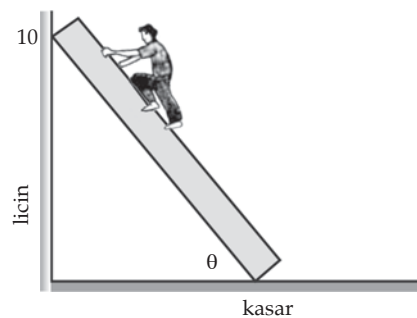
7. Sebuah mesin mobil menghasilkan  $3\pi \times 10^4$  W ketika berputar pada kelajuan 1.800 putaran per menit. Hitunglah besarnya momen gaya yang dihasilkan!

8. Tentukan koordinat titik berat bidang pada gambar di samping!



9. Nana yang bermassa 30 kg berdiri di pusat sebuah mainan korsel (komedi putar) yang sedang berputar pada suatu poros. tanpa gesekan dengan kecepatan  $1,0$  rad/s. Anggap mainan korsel sebagai sebuah cakram pejal dengan massa  $m = 100$  kg dan jari-jari  $R = 3$  m. Jika Nana melompat ke posisi 1 m dari pusat, tentukan kecepatan sudut sistem Nana dan korsel setelah Nana mendarat!

10. Perhatikan gambar di samping! Seseorang naik tangga homogen yang disandarkan pada dinding vertikal yang licin. Berat tangga 300 N dan berat orang 700 N. Bila orang tersebut dapat naik sejauh 3 m sesaat sebelum tangga tersebut tergelincir, maka tentukan koefisien gesekan antara lantai dan tangga!



# Bab

# VII

# Fluida



## Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menganalisis hukum-hukum yang berhubungan dengan fluida statis dan dinamis serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.



Sumber: Khazanah Pengetahuan Bagi Anak-anak, Angkutan dan Komunikasi

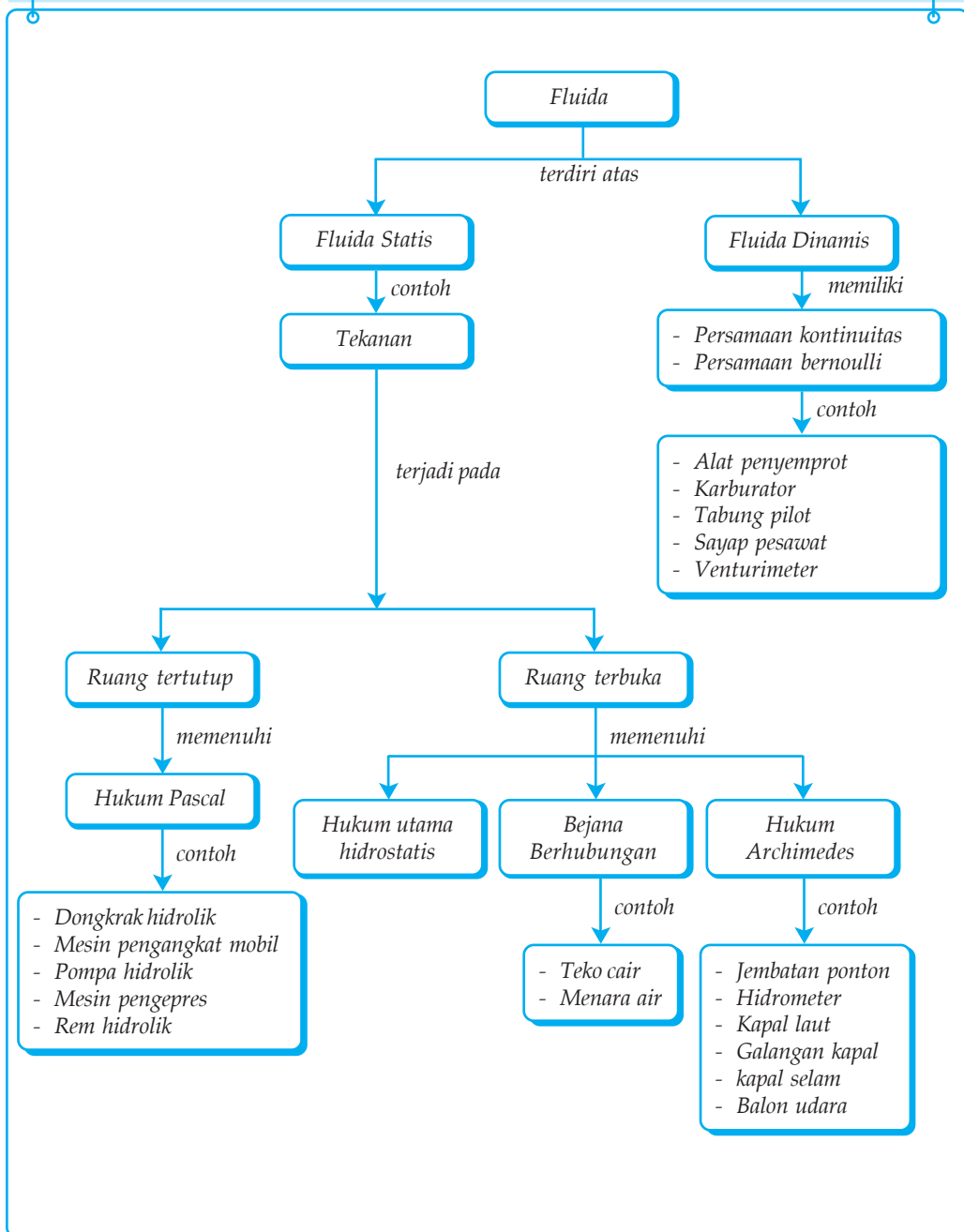
Pernahkah Anda melihat peristiwa kebakaran? Untuk menanggulangi bencana kebakaran, pemerintah menyediakan mobil pemadam kebakaran. Tiap armada ini dilengkapi tangga yang dapat dipanjangkan, diputar, dan dilipat secara otomatis. Tahukah Anda prinsip fisika yang diterapkan pada sistem ini?

## Kata Kunci

- |                 |                |                      |                          |
|-----------------|----------------|----------------------|--------------------------|
| • Fluida        | • Kontinuitas  | • Tabung Pitot       | • Tekanan Hidrostatistik |
| • Tekanan       | • Hidrometer   | • Gejala Miniskus    | • Tegangan Permukaan     |
| • Viskositas    | • Karburator   | • Gejala Kapilaritas | • Garis Alir             |
| • Fluida Sejati | • Venturimeter | • Jembatan Ponton    | • Fluida Ideal           |



## Peta Konsep



Di SMP Anda telah mempelajari jenis-jenis zat. Ada tiga jenis zat, yaitu zat padat, cair, dan gas. Zat padat mempunyai bentuk tetap sedangkan zat cair dan gas mempunyai bentuk yang berubah-ubah dan dapat mengalir. Karena dapat mengalir, maka zat cair dan gas dinamakan fluida atau zat alir.

Dalam fisika fluida dikelompokkan menjadi dua, yaitu fluida statis dan dinamis. Fluida statis mempelajari fluida yang tidak bergerak, sedangkan fluida dinamis mempelajari fluida bergerak (mengalir). Dengan mempelajari materi fluida, Anda dapat menjelaskan beberapa peristiwa sehari-hari yang terlihat aneh. Misalnya, makin dalam Anda menyelam, makin sakit telinga Anda; mengapa kapal yang terbuat dari besi dapat mengapung; mengapa kapal selam dapat tenggelam, mengapung, dan menyelam; dan mengapa selang air yang ditutup sedikit airnya menjadi memancar.

Pada bab ini Anda hanya akan mempelajari fluida ideal dan fluida sejati. Sifat fluida ideal, antara lain, tidak kompresibel, artinya tidak mengalami perubahan ketika mendapat tekanan; ketika bergerak tidak mengalami gesekan; dan alirannya stasioner (aliran yang konstan). Sifat fluida sejati, antara lain, kompresibel, artinya volume atau massa jenisnya berubah ketika mendapat tekanan; gesekan antara fluida dan dinding tabung tidak diabaikan; dan alirannya tidak stasioner (turbulen atau bergejolak). Fluida merupakan topik yang sangat penting. Hampir tiap hari Anda berhubungan dengan fluida

## A. Fluida Statis

Fluida statis adalah fluida yang tidak mengalami perpindahan bagian-bagiannya. Pada keadaan ini, fluida statis memiliki sifat-sifat seperti memiliki tekanan dan tegangan permukaan.

### 1. Tekanan

Tekanan dalam fisika didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada suatu bidang persatuan luas bidang tersebut. Bidang atau permukaan yang dikenai gaya disebut bidang tekan, sedangkan gaya yang diberikan pada bidang tekanan disebut gaya tekan. Secara matematis tekanan dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$p = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

$p$  : tekanan (Pa)

$F$  : gaya tekan (N)

$A$  : luas bidang tekan ( $\text{m}^2$ )

Tekanan adalah suatu besaran skalar. Satuan internasional (SI) dari tekanan adalah pascal (Pa). Satuan ini dinamai sesuai dengan nama ilmuwan Prancis, Blaise Pascal. Satuan-satuan lain adalah bar ( $1 \text{ bar} = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ), atmosfer ( $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa}$ ) dan mmHg ( $760 \text{ mmHg} = 1 \text{ atm}$ ). Tekanan pada fluida statis zat cair dikelompokkan menjadi dua, yaitu tekanan pada ruang tertutup dan ruang terbuka.

### Kolom Diskusi

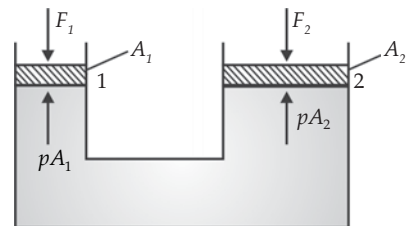
Tekanan 1 atm sangat besar. Tekanan ini memberikan gaya sekitar  $10^5 \text{ N}$  pada daerah seluas  $1 \text{ m}^2$ . Gaya ini sangat besar, yaitu setara dengan berat 10 ton benda. Anehnya, mengapa tubuh Anda tidak hancur, padahal Anda menerima gaya ini dari segala arah. Diskusikan masalah ini dengan teman Anda dan buatlah kesimpulan!

#### a. Tekanan Fluida Statis Zat Cair dalam Ruang Tertutup

Hukum Pascal menyatakan bahwa tekanan yang diberikan di dalam ruang tertutup diteruskan sama besar ke segala arah. Berdasarkan hukum ini diperoleh prinsip bahwa dengan gaya yang kecil dapat menghasilkan suatu gaya yang lebih besar. Prinsip-prinsip hukum Pascal dapat diterapkan pada alat-alat seperti pompa hidrolik, alat pengangkat air, alat pengepres, alat pengukur tekanan darah (tensimeter), rem hidrolik, dongkrak hidrolik, dan dump truk hidrolik.

Penerapan hukum Pascal dalam suatu alat, misalnya dongkrak hidrolik, dapat dijelaskan melalui analisis seperti terlihat pada Gambar 7.1.

Apabila penghisap 1 ditekan dengan gaya  $F_1$ , maka zat cair menekan ke atas dengan gaya  $pA_1$ . Tekanan ini akan diteruskan ke penghisap 2 yang besarnya  $pA_2$ . Karena tekanannya sama ke segala arah, maka didapatkan persamaan sebagai berikut.



Gambar 7.1 Prinsip kerja dongkrak hidrolik.

$$p_1 = p_2$$

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

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

Jika penampang pengisap dongkrak hidrolik berbentuk silinder dengan diameter tertentu, maka persamaan di atas dapat pula dinyatakan sebagai berikut.

Karena  $A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$  dan  $A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ , maka

$$F_1 = \frac{A_1}{A_2} F_2 = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 F_2$$

Keterangan:

$F_1$  : gaya pada piston pertama

$F_2$  : gaya pada piston kedua

$A_1$  : luas penampang piston pertama

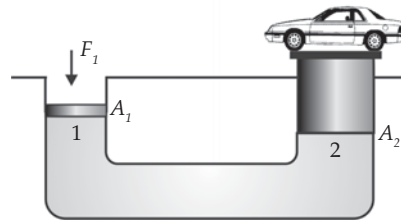
$A_2$  : luas penampang piston kedua

$d_1$  : diameter piston pertama

$d_2$  : diameter piston kedua

### Contoh 1.1

Perhatikan gambar di samping! Suatu alat pengangkat mobil (dongkrak hidrolik) terdiri atas 2 tabung yang berhubungan. Kedua tabung yang mempunyai diameter berbeda ini ditutup masing-masing dengan sebuah pengisap. Tabung diisi penuh air. Pada tabung besar diletakkan mobil yang hendak diangkat. Ketika pengisap pada tabung kecil diberi gaya, ternyata mobil terangkat ke atas. Jika berat mobil 3 ton, diameter pengisap tabung besar 30 cm dan tabung kecil 5 cm, serta  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah gaya yang harus diberikan agar mobil terangkat naik!



- Diketahui :
- a.  $m_b = 3 \text{ ton} = 3.000 \text{ kg}$
  - b.  $d_1 = 30 \text{ cm}$
  - c.  $d_2 = 5 \text{ cm}$
  - d.  $g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan:  $F_1 = \dots?$

Jawab:

Gaya kedua pada sistem ini adalah gaya berat mobil. Oleh karena itu, besarnya  $F_2$  adalah:

$$\begin{aligned} F_2 &= m \times g = 3.000 \times 10 \\ &= 30.000 \text{ N} \end{aligned}$$

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

$$= \frac{5^2}{30^2} 30.000 = 833,33 \text{ N}$$

Jadi, gaya yang harus diberikan agar mobil terangkat sebesar 833,33 N.

## b. Tekanan Fluida Statis dalam Ruang Terbuka

### Tekanan Hidrostatik

Untuk memahami tekanan hidrostatik, anggap zat terdiri atas beberapa lapisan. Setiap lapisan memberi tekanan pada lapisan di bawahnya, sehingga lapisan bawah akan mendapatkan tekanan paling besar. Karena lapisan atas hanya mendapatkan tekanan dari udara (atmosfer), maka tekanan pada permukaan zat cair sama dengan tekanan atmosfer.



*Gambar 7.2 Zat cair dapat dianggap tersusun atas lapisan-lapisan air.*

$$p_h = \frac{F}{A} = \frac{W}{A} = \frac{mg}{A}$$

Karena  $m = \rho \times V$ , maka  $p_h = \frac{\rho V g}{A}$ .

Anda ketahui bahwa volume merupakan hasil perkalian luas alas ( $A$ ) dengan tinggi ( $h$ ). Oleh karena itu, persamaan di atas dapat ditulis seperti berikut.

$$p_h = \frac{\rho g A h}{A} = \rho g h$$

Anda tidak boleh mengukur tekanan udara pada ketinggian tertentu menggunakan rumus ini. Hal ini disebabkan karena kerapatan udara tidak sama di semua tempat. Makin tinggi suatu tempat, makin kecil kerapatan udaranya. Untuk tekanan total yang dialami dasar bejana pada ketinggian tertentu dapat dicari dengan menjumlahkan tekanan udara luar dengan tekanan hidrostatik.

$$p_{\text{total}} = p_0 + p_h$$

Keterangan:

$p_h$  : tekanan yang dialami zat cair/tekanan hidrostatik (Pa)

$p_0$  : tekanan udara luar

$\rho$  : massa jenis zat cair ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  : percepatan gravitasi bumi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$h$  : kedalaman/tinggi titik ukur dari permukaan (m)



### Kegiatan 7.1

Rancanglah sebuah percobaan singkat yang dapat membuktikan bahwa tekanan udara berbeda pada tiap ketinggian tertentu. Anda dapat menggunakan barang bekas di sekitar seperti ember bekas atau tong bekas. Mintalah kepada guru Anda agar menunjuk salah satu siswa untuk mendemonstrasikan rancangan percobaannya. Buatlah kesimpulan setelah kegiatan demonstrasi selesai!

### Contoh 7.2

Suatu tempat di dasar danau memiliki kedalaman 20 m. Diketahui massa jenis air danau  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ , percepatan gravitasi  $g = 10 \text{ m}/\text{s}^2$ , dan tekanan di atas permukaan air sebesar 1 atm. Hitunglah tekanan hidrostatika dan tekanan total di tempat tersebut!

Diketahui : a.  $h = 20 \text{ m}$

b.  $\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$

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

d.  $p_0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ pa}$

Ditanyakan : a.  $p_h = \dots ?$

b.  $P_{\text{total}} = \dots ?$

Jawab:

a. Tekanan hidrostatika

$$\begin{aligned} p_h &= \rho g h \\ &= 1.000 \times 10 \times 20 \\ &= 200.000 \text{ Pa} \\ &= 2 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

b. Tekanan total

$$\begin{aligned} p_{\text{ttl}} &= p_0 + p_h \\ &= (1,013 \times 10^5) + (2 \times 10^5) \\ &= 3,013 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

## 2. Hukum Archimedes

Pernahkah Anda menimba air dari sumur? Apa yang Anda rasakan saat menimba? Timba terasa ringan saat ember masih di dalam air dan terasa lebih berat ketika muncul ke permukaan air. Hal ini menunjukkan bahwa berat benda dalam air lebih ringan daripada di udara. Hal ini disebabkan oleh adanya gaya ke atas dari air yang mengurangi berat ember. Gaya ke atas dalam zat cair disebut dengan gaya Archimedes. Untuk lebih memahami gaya ke atas dalam zat cair, lakukan kegiatan berikut!



### Kegiatan 7.2

#### Hukum Archimedes

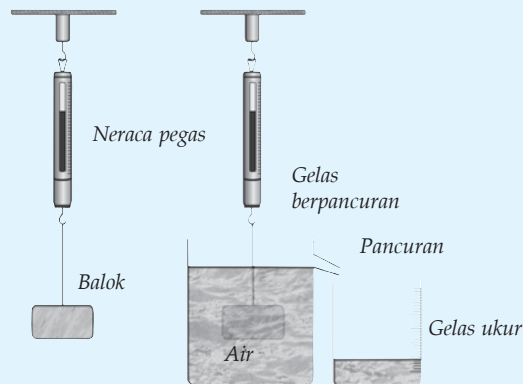
##### A. Tujuan

Anda dapat memahami gaya ke atas dalam zat cair.

##### B. Alat dan Bahan

1. Neraca pegas
2. Tiga buah balok
3. Gelas berpancur
4. Gelas ukur

##### C. Langkah Kerja



1. Isilah gelas berpancur dengan air sampai permukaan air tepat berada di bibir bawah lubang pancur!
2. Letakkan gelas ukur di bawah pancuran!
3. Timbanglah berat balok di udara ( $w_u$ ), kemudian timbanglah berat balok di air ( $w_a$ ) dengan menggunakan neraca pegas, dan catatlah hasilnya pada tabel berikut yang telah Anda salin di dalam buku tugas!

**Tabel Hasil Pengamatan**

Balok	Gaya ke Atas ( $F_a = w_u - w_a$ )	Berat Air yang Dipindahkan ( $w_c = m_c \times g$ )
1 buah	...	...
2 buah	...	...
3 buah	...	...

4. Timbanglah massa air yang tumpah ( $m_c$ ), kemudian kalikan dengan percepatan gravitasi!
5. Ulangilah langkah 3 dan 4 dengan menambah jumlah balok!
6. Tulislah kesimpulan Anda dalam buku tugas!

Berdasarkan tabel hasil percobaan pada Kegiatan 7.2, terlihat bahwa besarnya gaya ke atas sebanding dengan berat air yang ditumpahkan oleh balok. Artinya, suatu benda yang dicelupkan sebagian atau seluruhnya ke dalam zat cair mengalami gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat zat cair yang dipindahkan oleh benda tersebut. Pernyataan ini dikenal sebagai *hukum Archimedes*. Secara matematis hukum Archimedes dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$w_u - w_a = w_c$$

$$F_a = w_c$$

$$F_a = m_c \times g$$

$$F_a = \rho_c \times V_c \times g$$

Keterangan:

$F_a$  : gaya Archimedes

$w_u$  : berat balok di udara

$w_a$  : berat balok di dalam zat cair

$w_c$  : berat zat cair yang ditumpahkan (N)

$m_c$  : massa zat cair yang ditumpahkan (kg)

$\rho_c$  : massa jenis zat cair ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_c$  : volume benda yang tercelup ( $\text{m}^3$ )

$g$  : percepatan gravitasi bumi ( $\text{m/s}^2$ )



### Contoh 7.3

Diketahui massa jenis air  $1.000 \text{ kg/m}^3$  dan gravitasi bumi  $9,8 \text{ m/s}^2$ .  
Jika ada benda yang tercelup ke dalam air tersebut dengan volume benda yang tercelup  $20 \text{ m}^3$ , maka berapakah gaya tekan ke atasnya?

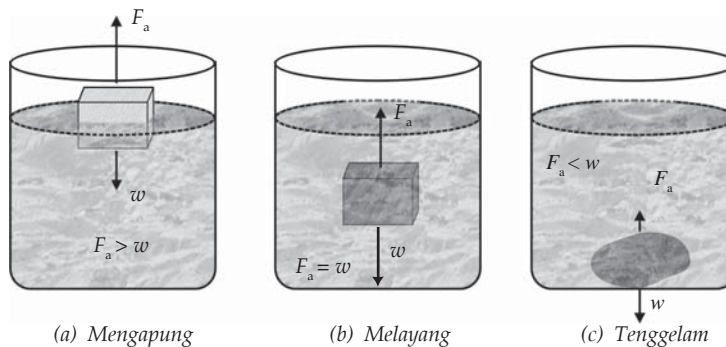
Diketahui : a.  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$   
b.  $\rho_c = 1.000 \text{ kg/m}^3$   
c.  $V_c = 20 \text{ m}^3$

Ditanyakan :  $F_a = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} F_a &= \rho_c \times V_c \times g \\ &= 1.000 \times 20 \times 9,8 \\ &= 196.000 \text{ N} \end{aligned}$$

Adanya gaya Archimedes dalam zat cair menjadikan benda yang dimasukkan ke dalam zat cair mengalami tiga kemungkinan, yaitu terapung, melayang, dan tenggelam.



Gambar 7.3 Keadaan benda di dalam zat cair

Terapung adalah keadaan seluruh benda tepat berada di atas permukaan zat cair atau hanya sebagian benda yang berada di bawah permukaan zat cair. Benda dapat terapung dikarenakan massa jenis benda lebih kecil daripada massa jenis zat cair ( $\rho_b < \rho_c$ ), sehingga berat benda juga lebih kecil daripada gaya Archimedes ( $w_b < F_A$ ). Contoh peristiwa terapung, antara lain, gabus atau kayu yang dimasukkan ke dalam air.

Melayang adalah keadaan benda yang berada di antara permukaan dan dasar dari zat cair. Benda dapat melayang dikarenakan massa jenis benda sama dengan massa jenis zat cair ( $\rho_b = \rho_c$ ), sehingga berat benda menjadi sama dengan gaya Archimedes ( $w_b = F_A$ ). Dengan kata lain, berat benda di dalam zat cair sama dengan nol. Contoh peristiwa melayang adalah ikan-ikan di dalam perairan.

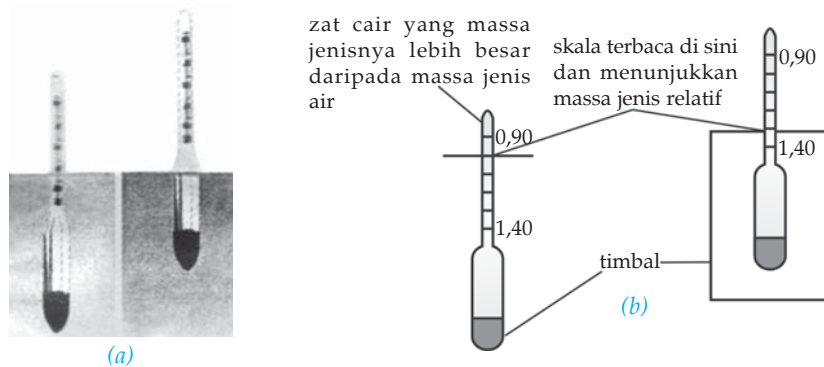
Tenggelam adalah keadaan benda yang berada di dasar zat cair. Benda dapat tenggelam dikarenakan massa jenis benda lebih besar dari-pada massa jenis zat cair ( $\rho_b > \rho_c$ ), sehingga berat benda juga lebih besar daripada gaya Archimedes ( $w_b > F_A$ ). Contoh peristiwa tenggelam, antara lain, batu yang dimasukkan ke dalam air.

### 3. Penerapan Hukum Archimedes

Penerapan hukum Archimedes dapat Anda jumpai dalam berbagai peralatan dari yang sederhana sampai yang canggih, misalnya hidrometer, kapal laut, kapal selam, galangan kapal, balon udara, dan jembatan ponton.

#### a. Hidrometer

Hidrometer merupakan alat untuk mengukur berat jenis atau massa jenis zat cair. Jika hidrometer dicelupkan ke dalam zat cair, sebagian alat tersebut akan tenggelam. Makin besar massa jenis zat cair, Makin sedikit bagian hidrometer yang tenggelam. Hidrometer banyak digunakan untuk mengetahui besar kandungan air pada bir atau susu.



Gambar 7.4 (a) Hidrometer (b) Bagian-bagian hidrometer.

Hidrometer terbuat dari tabung kaca. Supaya tabung kaca terapung tegak dalam zat cair, bagian bawah tabung dibebani dengan butiran timbal. Diameter bagian bawah tabung kaca dibuat lebih besar supaya volume zat cair yang dipindahkan hidrometer lebih besar. Dengan demikian, dihasilkan gaya ke atas yang lebih besar dan hidrometer dapat mengapung di dalam zat cair.

Tangkai tabung kaca hidrometer didesain supaya perubahan kecil dalam berat benda yang dipindahkan (sama artinya dengan perubahan kecil dalam massa jenis zat cair) menghasilkan perubahan besar pada kedalaman tangki yang tercelup di dalam zat cair. Artinya perbedaan bacaan pada skala untuk berbagai jenis zat cair menjadi lebih jelas.

## b. Jembatan Ponton

Jembatan ponton adalah kumpulan drum-drum kosong yang berjajar sehingga menyerupai jembatan. Jembatan ponton merupakan jembatan yang dibuat berdasarkan prinsip benda terapung. Drum-drum tersebut harus tertutup rapat sehingga tidak ada air yang masuk ke dalamnya. Jembatan ponton digunakan untuk keperluan darurat. Apabila air pasang, jembatan naik. Jika air surut, maka jembatan turun. Jadi, tinggi rendahnya jembatan ponton mengikuti pasang surutnya air.



*Gambar 7.5 Jembatan ponton.*

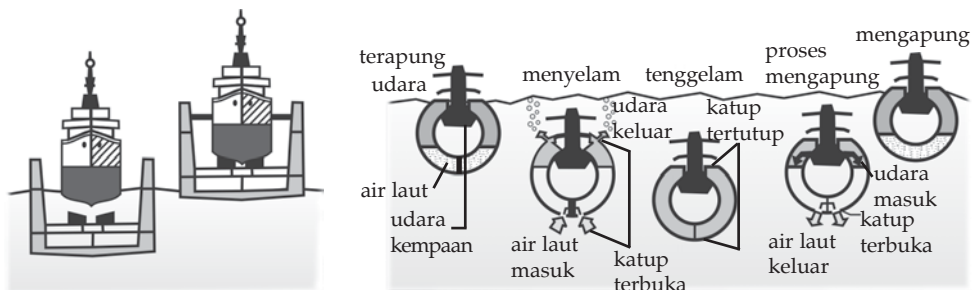
## c. Kapal Laut

Pada saat kalian meletakkan sepotong besi pada bejana berisi air, besi akan tenggelam. Namun, mengapa kapal laut yang massanya sangat besar tidak tenggelam? Bagaimana konsep fisika dapat menjelaskannya? Agar kapal laut tidak tenggelam badan kapal harus dibuat berongga. hal ini bertujuan agar volume air laut yang dipindahkan oleh badan kapal menjadi lebih besar. Berdasarkan persamaan besarnya gaya apung sebanding dengan volume zat cair yang dipindahkan, sehingga gaya apungnya menjadi sangat besar. Gaya apung inilah yang mampu melawan berat kapal, sehingga kapal tetap dapat mengapung di permukaan laut.

## d. Kapal Selam dan Galangan Kapal

Pada dasarnya prinsip kerja kapal selam dan galangan kapal sama. Jika kapal akan menyelam, maka air laut dimasukkan ke dalam ruang cadangan sehingga berat kapal bertambah. Pengaturan banyak sedikitnya air laut yang dimasukkan, menyebabkan kapal selam dapat menyelam pada kedalaman yang dikehendaki. Jika akan mengapung, maka air laut dikeluarkan dari ruang cadangan. Berdasarkan konsep tekanan hidrostatik, kapal selam mempunyai batasan tertentu dalam menyelam. Jika kapal menyelam terlalu dalam, maka kapal bisa hancur karena tekanan hidrostatiknya terlalu besar.

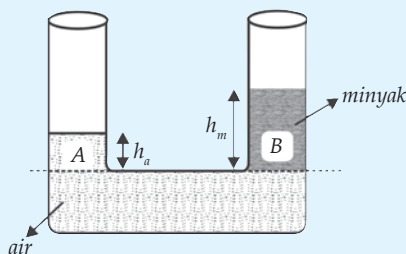
Untuk memperbaiki kerusakan kapal bagian bawah, digunakan galangan kapal. Jika kapal akan diperbaiki, galangan kapal ditenggelamkan dan kapal dimasukkan. Setelah itu galangan diapungkan. Galangan ditenggelamkan dan diapungkan dengan cara memasukkan dan mengeluarkan air laut pada ruang cadangan.



Gambar 7.6 (a) Galangan kapal (b) Prinsip mengapung dan tenggelam pada sebuah kapal selam.

### Soal Kompetensi 7.1

1. Jelaskan maksud dari gaya Archimedes tergantung pada massa jenis (kerapatan) fluida dan volume benda, tetapi tidak tergantung pada bentuk benda!
2. Tekanan pada permukaan air laut besarnya sekitar 100 kPa. Bandingkan tekanan ini dengan tekanan akibat berat air (tekanan hidrostatik) pada kedalaman 10,2 meter!  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$
3. Seekor ikan menyelam di air laut yang massa jenisnya  $1,013 \text{ g/cm}^3$ . Ikan mengalami tekanan hidrostatika yang sama dengan tekanan atmosfer. Tentukan kedalaman ikan tersebut, jika percepatan gravitasi  $g = 10 \text{ m/s}^2$ !
4. Dua tabung dihubungkan sehingga membentuk huruf U. Tabung sebelah kanan diisi minyak ( $\rho = 0,8 \text{ g/cm}^3$ ) dan sebelah kiri diisi air ( $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ ). Minyak dan air tidak bercampur. Jika tinggi minyak 10 cm, maka hitung ketinggian air!
5. Diketahui berat sebuah benda di udara 40 N dan ketika di dalam air 36 N. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan gaya apung benda oleh air dan massa jenis benda tersebut!



## 4. Tegangan Permukaan

Contoh peristiwa yang membuktikan adanya tegangan permukaan, antara lain, peristiwa jarum, silet, penjepit kertas, atau nyamuk yang dapat mengapung di permukaan air; butiran-butiran embun berbentuk bola pada sarang laba-laba; air yang menetes cenderung berbentuk bulat-bulat dan air berbentuk bola di permukaan daun talas.



Sumber: CD Clipart

**Gambar 7.7** (a) Seekor serangga yang mengapung di atas permukaan air (b) Penjepit kertas yang mengapung di permukaan air (c) Tegangan permukaan.

Tegangan permukaan suatu cairan berhubungan dengan garis gaya tegang yang dimiliki permukaan cairan tersebut. Gaya tegang ini berasal dari gaya tarik kohesi (gaya tarik antara molekul sejenis) molekul-molekul cairan. Gambar 7.7 (c) melukiskan gaya kohesi yang bekerja pada molekul  $P$  (di dalam cairan dan molekul  $Q$  (di permukaan). Molekul  $P$  mengalami gaya kohesi dengan molekul-molekul disekitarnya dari segala arah, sehingga molekul ini berada pada keseimbangan (resultan gaya nol). Namun, molekul  $Q$  tidak demikian. Molekul ini hanya mengalami kohesi dari partikel di bawah dan di sampingnya saja. Resultan gaya kohesi pada molekul ini ke arah bawah (tidak nol).

Gaya-gaya resultan arah ke bawah akan membuat permukaan cairan sekecil-kecilnya. Akibatnya permukaan cairan menegang seperti selaput yang tegang. Keadaan ini dinamakan tegangan permukaan.

Jika setetes air raksa diletakkan di atas permukaan kaca, maka raksa akan membentuk bulatan bulatan kecil seperti bentuk bola. Hal ini terjadi karena gaya kohesi molekul-molekul air raksa menarik molekul-molekul yang terletak di permukaan raksa ke arah dalam. Mengapa berbentuk seperti bola? Bola merupakan bangun yang mempunyai luas permukaan yang terkecil untuk volume yang sama. Permukaan raksa terasa seperti selaput yang terapung. Tegangan selaput ini dinamakan tegangan permukaan.

Tegangan permukaan suatu zat cair didefinisikan sebagai gaya tiap satuan panjang. Jika pada suatu permukaan sepanjang  $l$  bekerja gaya sebesar  $F$  yang arahnya tegak lurus pada  $l$ , dan  $\gamma$  menyatakan tegangan permukaan, maka persamaannya adalah sebagai berikut.

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

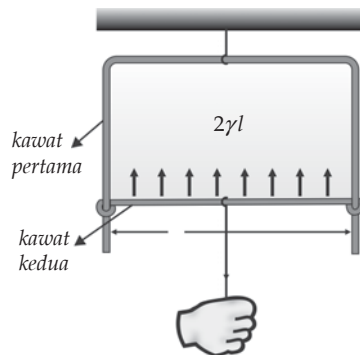
Keterangan:

$F$  : gaya (N)

$l$  : panjang permukaan (m)

$\gamma$  : tegangan permukaan (N/m)

Persamaan di atas menunjukkan bahwa ketika Anda mengatakan tegangan permukaan suatu cairan sabun 40 dyne/cm, ini artinya yang bekerja pada tiap cm panjang lapisan sabun adalah 40 dyne.



*Gambar 7.8 Bukti tegangan permukaan.*

Perhatikan Gambar 7.8! Seutas kawat dibengkokkan membentuk huruf U. Pada kaki-kaki kawat tersebut di pasang seutas kawat sedemikian rupa sehingga dapat bergeser. Ketika kedua kawat ini dicelupkan ke dalam larutan sabun dan di angkat kembali, maka kawat kedua akan tertari ke atas (kawat harus ringan). Agar kawat kedua tidak bergerak ke atas, Anda harus menahannya dengan gaya ke arah bawah.

Jika panjang kawat kedua  $l$  dan larutan sabun yang menyentuhnya memiliki dua permukaan, maka tegangan permukaan sabun bekerja sepanjang  $2l$ . Tegangan permukaan ( $\gamma$ ) dalam hal ini didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya tegangan permukaan ( $F$ ) dan panjang permukaan ( $2l$ ) tempat gaya tersebut bekerja. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\gamma = \frac{F}{2l}$$

Pada umumnya nilai tegangan permukaan zat cair berkurang dengan adanya kenaikan suhu. Perhatikan nilai tegangan permukaan berbagai zat cair pada Tabel 7.1 berikut.

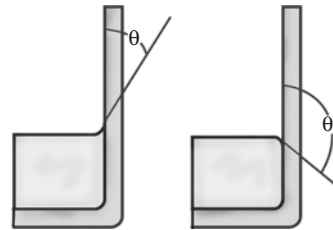
**Tabel 7.1 Nilai Tegangan Permukaan Beberapa Zat Cair**

Zat cair	Suhu (°C)	Tegangan Permukaan (N/m)
Raksa	20	0,440
Darah (seluruhnya)	37	0,058
Darah (plasma)	37	0,073
Alkohol	20	0,023
Air	0	0,076
Air	20	0,072
Air	100	0,059
Benzena	20	0,029
Larutan sabun	20	0,025
Oksigen	-193	0,016

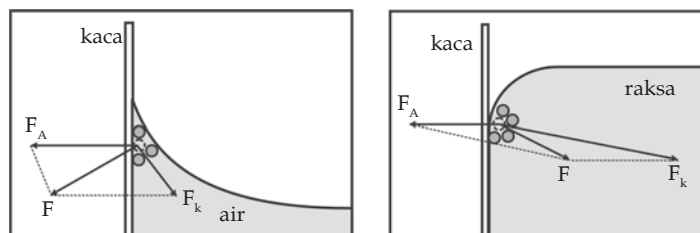
Sumber: Fisika, Kane & Sternheim, 1991.

## 5. Gejala Meniskus

Apabila Anda menuangkan raksa ke dalam suatu tabung kaca dan air pada tabung kaca lainnya, kemudian Anda perhatikan bentuk permukaannya. Apa yang Anda dapatkan? Anda akan mendapatkan bentuk kedua permukaan seperti yang dilukiskan pada Gambar 7.9. Jika pada lengkungan air dan raksa Anda tarik garis lurus, maka garis itu akan membentuk sudut  $\theta$  terhadap dinding vertikal tabung kaca. Sudut  $\theta$  tersebut dinamakan sudut kontak. Oleh karena itu, *sudut kontak* adalah sudut yang dibentuk antara permukaan zat cair dengan permukaan dinding pada titik persentuhan zat cair dengan dinding.



**Gambar 7.9** (a) Air membasahi dinding kaca  
(b) Raksa tidak membasahi dinding kaca.



**Gambar 7.10** Gaya kohesi dan adhesi pada zat cair yang membasahi dinding dan tidak membasahi dinding.

Untuk menjelaskan memahami peristiwa tersebut, Anda harus mengingat kembali konsep gaya adhesi dan gaya kohesi. Akibat adanya gaya kohesi antara partikel air ( $F_A$ ) lebih besar daripada gaya adhesi antara partikel air dengan partikel kaca ( $F_k$ ), maka resultan kedua gaya ( $F_R$ ) arahnya keluar. Agar tercapai keadaan yang seimbang, permukaan air yang menempel pada dinding kaca harus melengkung ke atas.

Kelengkungan permukaan suatu zat cair di dalam tabung disebut *meniskus*. Karena bentuknya cekung maka meniskus air dalam bejana kaca dinamakan meniskus cekung. Sudut yang dibentuk oleh kelengkungan air terhadap garis vertikal dinamakan sudut kontak  $\theta$ . Besarnya sudut kontak untuk meniskus cekung lebih kecil dari  $90^\circ$ .

Bagaimana dengan bentuk kelengkungan permukaan raksa dalam tabung? Gaya kohesi antara partikel-partikel raksa ( $F_A$ ) lebih kecil daripada gaya adhesi antara partikel raksa dengan partikel kaca ( $F_k$ ), sehingga resultan kedua gaya ( $F_R$ ) mengarah ke dalam. Agar tercapai keseimbangan, maka permukaan raksa yang menempel pada dinding kaca harus tegak lurus terhadap gaya resultan  $F_R$ . Akibatnya permukaan raksa yang menempel pada tabung kaca melengkung ke bawah dan disebut sebagai meniskus cembung. Besarnya sudut kontak untuk meniskus cembung ini lebih besar dari  $90^\circ$ .

Terdapat hubungan antara kemampuan membasahi air dengan tegangan permukaan air. Makin kecil nilai tegangan permukaan air, makin besar kemampuan air untuk membasahi benda. Makin tinggi suhu air, makin kecil tegangan permukaan. Artinya makin baik air tersebut untuk membasahi benda. Itulah sebabnya mencuci dengan air panas dan air sabun hasilnya lebih bersih daripada menggunakan air biasa.

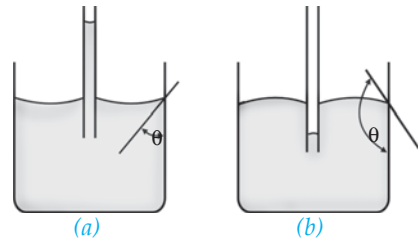
### Kolom Ilmuwan

Berdasarkan teori tegangan permukaan dan teori lain yang relevan, lakukan penyelidikan apa yang harus dilakukan para ibu rumah tangga agar cucian mereka lebih bersih dalam waktu singkat. Anda dapat mencari bahan referensi di buku-buku, majalah, artikel di internet, dan melakukan percobaan-percobaan. Buatlah artikel dari penelitian Anda dan kirimkan ke surat kabar atau majalah yang menyediakan kolom ilmuwan. Tunjukkan kepada guru jika tulisan Anda dimuat di majalah atau surat kabar!

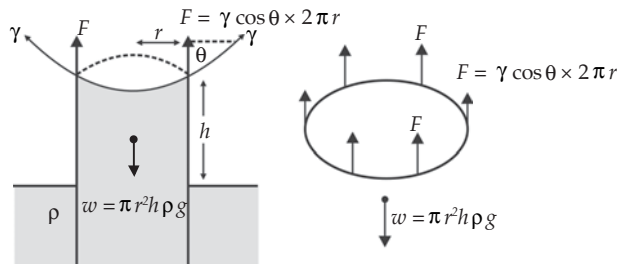


## 6. Gejala Kapilaritas

Kapilaritas adalah peristiwa naik atau turunnya zat cair di dalam pipa kapiler (pipa sempit). Kapilaritas dipengaruhi oleh adanya gaya kohesi dan adhesi antara zat cair dengan dinding kapiler. Karena dalam pipa kapiler gaya adhesi antara partikel air dan kaca lebih besar daripada gaya kohesi antara partikel-partikel air, maka air akan naik dalam pipa kapiler. Sebaliknya raksa cenderung turun dalam pipa kapiler, jika gaya kohesinya lebih besar daripada gaya adhesinya. Kenaikan atau penurunan zat cair pada pipa kapiler disebabkan oleh adanya tegangan permukaan ( $\gamma$ ) yang bekerja pada keliling persentuhan zat cair dengan pipa.



**Gambar 7.11** (a) Jika sudut kontak kurang dari  $90^\circ$ , maka permukaan zat cair dalam pipa kapiler naik (b) jika sudut kontak lebih besar dari  $90^\circ$ , maka permukaan zat cair dalam pipa kapiler turun.



**Gambar 7.12** Analisis gejala kapiler.

Mengapa permukaan zat cair bisa naik atau turun dalam permukaan pipa kapiler? Perhatikan Gambar 7.12! Gambar 7.12 menunjukkan zat cair yang mengalami meniskus cekung. Tegangan permukaan menarik pipa ke arah bawah karena tidak seimbang oleh gaya tegangan permukaan yang lain. Sesuai dengan hukum III Newton tentang aksi reaksi, pipa akan melakukan gaya yang sama besar pada zat cair, tetapi dalam arah berlawanan. Gaya inilah yang menyebabkan zat cair naik. Zat cair berhenti naik ketika berat zat cair dalam kolom yang naik sama dengan gaya ke atas yang dikerjakan pada zat cair.

$$w = F$$

Jika massa jenis zat cair adalah  $\rho$ , tegangan permukaan  $\gamma$ , sudut kontak  $\theta$ , kenaikan zat cair setinggi  $h$ , dan jari-jari pipa kapiler adalah  $r$ , maka berat zat cair yang naik dapat ditentukan melalui persamaan berikut.

$$\begin{aligned} w &= m g \\ w &= \rho V g \\ w &= \rho \pi r^2 h g \end{aligned}$$

Komponen gaya vertikal yang menarik zat cair sehingga naik setinggi  $h$  adalah:

$$F = (\gamma \cos \theta)(2\pi r) = F = 2\pi r \gamma \cos \theta$$

Jika nilai  $F$  Anda ganti dengan  $\rho \pi r^2 h g$ , maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$\rho \pi r^2 h g = 2\pi r \gamma \cos \theta$$

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

Keterangan:

$h$  : kenaikan/penurunan zat cair dalam pipa (m)

$\gamma$  : tegangan permukaan N/m

$\theta$  : sudut kontak (derajat)

$\rho$  : massa jenis zat cair (kg/m<sup>3</sup>)

$r$  : jari-jari pipa (m)

Gejala kapilaritas banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya, naiknya minyak tanah melalui sumbu kompor, pengisapan air oleh tanaman (naiknya air dari akar menuju daun-daunan melalui pembuluh kayu pada batang) dan peristiwa pengisapan air oleh kertas isap atau kain. Selain menguntungkan gejala kapilaritas ada juga yang merugikan misalnya ketika hari hujan, air akan merambat naik melalui pori-pori dinding sehingga menjadi lembap. Dinding yang lembap tidak baik untuk kesehatan.

#### Contoh 7.4

Sebuah pipa kapiler yang jari-jarinya 1 mm berisi raksa yang massa jenisnya 13,6 g/cm<sup>3</sup>. Jika sudut kontak, tegangan permukaan, dan percepatan gravitasi berturut-turut 120°, 1,36 N/m, 10 m/s<sup>2</sup>, maka tentukan penurunan raksa dalam pipa kapiler tersebut!

Diketahui : a.  $r = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$

b.  $\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3 = 13.600 \text{ kg/m}^3$

c.  $\theta = 120^\circ, \cos 120^\circ = 0,5$

d.  $\gamma = 1,36 \text{ N/m}$

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

Ditanyakan :  $h = \dots?$

Jawab:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} = \frac{2(1,36)(0,5)}{(13.600)(10)(10^{-3})}$$

$$= 10^{-2} \text{ m}$$

$$= 1 \text{ cm}$$

## 7. Viskositas atau Kekentalan

Viskositas merupakan ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida. Makin besar viskositas suatu fluida, maka makin sulit suatu fluida mengalir dan makin sulit suatu benda bergerak di dalam fluida tersebut. Di dalam zat cair, viskositas dihasilkan oleh gaya kohesi antara molekul zat cair. Sedangkan dalam gas, viskositas timbul sebagai akibat tumbukan antara molekul gas.

Viskositas zat cair dapat ditentukan secara kuantitatif dengan besaran yang disebut *koefisien viskositas* ( $\eta$ ). Satuan SI untuk koefisien viskositas adalah  $\text{Ns/m}^2$  atau pascal sekon ( $\text{Pa s}$ ). Ketika Anda berbicara viskositas Anda berbicara tentang fluida sejati. Fluida ideal tidak mempunyai koefisien viskositas.

Apabila suatu benda bergerak dengan kelajuan  $v$  dalam suatu fluida kental yang koefisien viskositasnya  $\eta$ , maka benda tersebut akan mengalami gaya gesekan fluida sebesar  $F_s = k \eta v$ , dengan  $k$  adalah konstanta yang bergantung pada bentuk geometris benda. Berdasarkan perhitungan laboratorium, pada tahun 1845, Sir George Stokes menunjukkan bahwa untuk benda yang bentuk geometrisnya berupa bola nilai  $k = 6\pi r$ . Bila nilai  $k$  dimasukkan ke dalam persamaan, maka diperoleh persamaan seperti berikut.

$$F_s = 6\pi \eta r v$$

Persamaan di atas selanjutnya dikenal sebagai *hukum Stokes*.

Keterangan:

$F_s$  : gaya gesekan stokes (N)

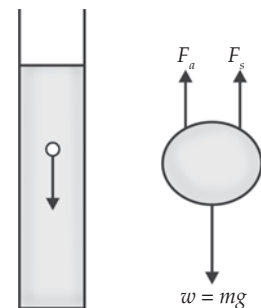
$\eta$  : koefisien viskositas fluida ( $\text{Pa s}$ )

$r$  : jari-jari bola (m)

$v$  : kelajuan bola (m/s)

Perhatikan sebuah bola yang jatuh dalam fluida pada Gambar 7.13. Gaya-gaya yang bekerja pada bola adalah gaya berat  $w$ , gaya apung  $F_a$ , dan gaya lambat akibat viskositas atau gaya stokes  $F_s$ . Ketika dijatuhkan, bola bergerak dipercepat. Namun, ketika kecepatannya bertambah, gaya stokes juga bertambah. Akibatnya, pada suatu saat bola mencapai keadaan seimbang sehingga bergerak dengan kecepatan konstan yang disebut *kecepatan terminal*.

Pada kecepatan terminal, resultan yang bekerja pada bola sama dengan nol. Misalnya sumbu vertikal ke atas sebagai sumbu positif, maka pada saat kecepatan terminal tercapai berlaku persamaan berikut.



Gambar 7.13 Gaya-gaya yang bekerja pada benda yang bergerak dalam fluida.

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= 0 \\
 F_a + F_s &= w \\
 \rho_f V_b g + 6\pi\eta r v_T &= \rho_b V_b g \\
 6\pi\eta r v_T &= \rho_b V_b g - \rho_f V_b g \\
 6\pi\eta r v_T &= gV_b (\rho_b - \rho_f)
 \end{aligned}$$

$$v_T = \frac{gV_b(\rho_b - \rho_f)}{6\pi\eta r}$$

Untuk benda berbentuk bola seperti pada Gambar 7.13, maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$v_T = \frac{g\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)(\rho_b - \rho_f)}{6\pi\eta r} = \frac{9}{2} \frac{R^2 g}{\eta} (\rho_b - \rho_f)$$

Keterangan:

- $v_T$  : kecepatan terminal (m/s)
- $\eta$  : koefisien viskositas fluida (Pa s)
- $R$  : jari-jari bola (m)
- $g$  : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- $\rho_b$  : massa jenis bola (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_f$  : massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)

### Contoh 7.5

Pada suatu hari hujan turun dengan derasnya. Jika jari-jari tetes air hujan yang jatuh di udara ( $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ ) adalah 0,2 mm dan koefisien viskositas udara  $\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ , maka hitunglah kecepatan terminalnya!

Diketahui : a.  $R = 0,2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$

b.  $\rho_f = 1.000 \text{ kg/m}^3$

c.  $\rho_b = 1,29 \text{ kg/m}^3$

d.  $\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$

Ditanyakan:  $v_T = \dots?$

Jawab:

Ingat, tetes air cenderung membentuk seperti bola.

$$\begin{aligned}v_T &= \frac{9 R^2 g}{2 \eta} (\rho_b - \rho_f) \\&= \frac{2 (2 \times 10^{-4})^2 9,8}{9 (18 \times 10^{-5})} (1000 - 1,29) \\&= 4,83 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Catatan: gaya Archimedes pada soal ini boleh diabaikan, karena hasilnya tidak berbeda jauh.

Untuk viskositas beberapa fluida dapat Anda lihat pada Tabel 7.2 berikut!

**Tabel 7.2 Viskositas Beberapa Fluida**

Fluida Viskositas	N s/m <sup>2</sup>
Air (0° C)	$1,79 \times 10^{-3}$
Air (20° C)	$1,00 \times 10^{-3}$
Air (100° C)	$0,28 \times 10^{-3}$
Darah (37° C)	$4,0 \times 10^{-3}$
Oli motor (0° C)	$110 \times 10^{-3}$
Udara (0° C)	$0,017 \times 10^{-3}$
CO <sub>2</sub> (20° C)	$0,014 \times 10^{-3}$
Gliserin	1,5

*Sumber: Fisika, Kane & Sternheim, 1991.*

Pada Tabel 7.2 terlihat bahwa air, udara, dan alkohol mempunyai koefisien kecil sekali dibandingkan dengan gliserin. Oleh karena itu, dalam perhitungan sering diabaikan. Berdasarkan eksperimen juga diperoleh bahwa koefisien viskositas tergantung suhu. Pada kebanyakan fluida makin tinggi suhu makin rendah koefisien viskositasnya. Itu sebabnya di musim dingin oli mesin menjadi kental sehingga kadang-kadang mesin sukar dihidupkan.

### Soal Kompetensi 7.2

1. Jelaskan dengan kata-kata Anda sendiri apa yang dimaksud tegangan permukaan gejala meniskus dan kapilaritas!
2. Manakah yang lebih mungkin, terapung di air laut atau air biasa? Jelaskan!

3. Sebongkah es terapung di dalam gelas yang penuh berisi air. Ketika es meleleh, apakah air tumpah?
4. Sebuah pipa kapiler mempunyai jari-jari 1 mm dimasukkan ke dalam air. Ternyata kenaikan air dalam pipa kapiler 5 cm. Apabila sudut kontak  $60^\circ$  dan  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan besar tegangan permukaan air!
5. Sebuah bola yang massa jenisnya  $6,26 \text{ g/cm}^3$  dan berdiameter 2 cm jatuh ke dalam gliserin yang massa jenisnya  $5,10 \text{ g/cm}^3$  dan koefisien viskositasnya  $1,4 \text{ Pa s}$ . Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan kecepatan terminal bola tersebut!

## T o k o h

### Blaise Pascal (1623 – 1662)



Sumber: Jendela Iptek, Gaya dan Gerak

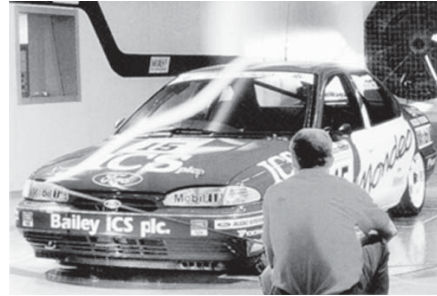
Blaise Pascal adalah ahli fisika Prancis, penemu hukum Pascal, pompa hidrolik, kalkulator digital yang pertama, dan ahli matematika. Ia lahir di Clermont Ferrand, Prancis, pada tanggal 19 Juni 1623. Ayahnya bernama Etienne Pascal, hakim yang sangat terpelajar di pengadilan pajak. Ibunya bernama Antoinette Bagon dan meninggal ketika Pascal baru berumur tiga tahun.

Pada umur 18 tahun, Pascal menciptakan kalkulator digital yang pertama di dunia. Hal ini diilhami dari seringnya ia melihat ayahnya yang sibuk menghitung pajak. Ia bermaksud menjual mesin hitungnya tapi tidak laku karena harganya sangat mahal. kesehatannya makin lama makin mencemaskan karena ia terlalu giat bekerja dan belajar. Penyakit kanker yang ia derita, membuat tiada hari yang terlewatkan oleh Pascal tanpa rasa sakit. Kemudian ia mendapat nasihat dokter agar hidup santai dan bersenang-senang. Maka, ia menghabiskan waktunya untuk bermain kartu. Oleh karena seringnya bermain kartu, ia bersama Fermat menemukan teori probabilitas. Untuk meringankan rasa sakitnya, ia mengadakan eksperimen-eksperimen. Ia mengulangi percobaan Torricelli. Ia bermain-main dengan air dan menemukan hukum tekanan zat cair. Pascal meninggal di Paris, pada tanggal 19 Agustus 1662 pada umur 39 tahun. Ia percaya bahwa iman lebih luas dan dalam daripada akal budi manusia.

(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)

## B. Fluida Bergerak

Untuk mengkaji desain mobil aerodinamis seperti tampak pada Gambar 7.14, mobil diuji dengan asap di dalam lorong angin. Tampak garis aliran laminar yang stasioner. Asap yang bergerak merupakan contoh fluida bergerak. Pokok-pokok bahasan yang berkaitan dengan fluida bergerak, antara lain, persamaan kontinuitas, hukum Bernoulli yang membahas tekanan pada fluida yang bergerak, dan penerapan hukum Bernoulli.



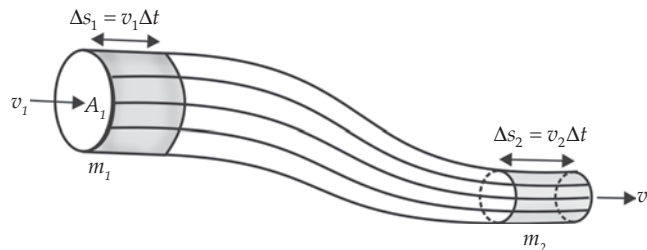
Sumber: jendela iptek, teknologi

**Gambar 7.14** Supaya dapat melaju dengan cepat, mobil harus aerodinamis.

### 1. Persamaan Kontinuitas

Pada saat Anda akan menyemprotkan air dengan menggunakan selang, Anda akan melihat fenomena fisika yang aneh tapi nyata. Ketika lubang selang dipencet, maka air yang keluar akan menempuh lintasan yang cukup jauh. Sebaliknya ketika selang dikembalikan seperti semula maka jarak pancaran air akan berkurang. Fenomena fisika tersebut dapat dijelaskan dengan mempelajari bahasan tentang persamaan kontinuitas berikut.

Persamaan kontinuitas menghubungkan kecepatan fluida di suatu tempat dengan tempat lain. Sebelum menurunkan hubungan ini, Anda harus memahami beberapa istilah dalam aliran fluida. *Garis alir (stream line)* didefinisikan sebagai lintasan aliran fluida ideal (aliran lunak). Garis singgung di suatu titik pada garis alir menyatakan arah kecepatan fluida. Garis alir tidak ada yang berpotongan satu sama lain. Tabung alir merupakan kumpulan dari garis-garis alir. Pada tabung alir, fluida masuk dan keluar melalui mulut-mulut tabung. Fluida tidak boleh masuk dari sisi tabung karena dapat menyebabkan terjadinya perpotongan garis-garis alir. Perpotongan ini akan menyebabkan aliran tidak lunak lagi.



**Gambar 7.15** Debit fluida yang masuk sama dengan yang keluar.

Misal terdapat suatu tabung alir seperti tampak pada Gambar 7.15. Air masuk dari ujung kiri dengan kecepatan  $v_1$  dan keluar di ujung kanan

dengan kecepatan  $v_2$ . Jika kecepatan fluida konstan, maka dalam interval waktu  $\Delta t$  fluida telah menempuh jarak  $\Delta s_1 = v_1 \times \Delta t$ . Jika luas penampang tabung kiri  $A_1$  maka massa pada daerah yang diarsir adalah:

$$\Delta m_1 = \rho_1 A_1 \Delta s_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t$$

Demikian juga untuk fluida yang terletak di ujung kanan tabung, massanya pada daerah yang diarsir adalah :

$$\Delta m_2 = \rho_2 A_2 \Delta s_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t$$

Karena alirannya lunak (*steady*) dan massa konstan, maka massa yang masuk penampang  $A_1$  harus sama dengan massa yang masuk penampang  $A_2$ . Oleh karena itu persamaannya menjadi:

$$\begin{aligned} \Delta m_1 &= \Delta m_2 \\ \rho_1 A_1 v_1 &= \rho_2 A_2 v_2 \\ \rho_1 A_1 v_1 &= \rho_2 A_2 v_2 \end{aligned}$$

Persamaan di atas dikenal dengan nama *persamaan kontinuitas*. Karena fluida inkompresibel (massa jenisnya tidak berubah), maka persamaan menjadi:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Menurut persamaan kontinuitas, perkalian luas penampang dan kecepatan fluida pada setiap titik sepanjang suatu tabung alir adalah konstan. Persamaan di atas menunjukkan bahwa kecepatan fluida berkurang ketika melewati pipa lebar dan bertambah ketika melewati pipa sempit. Itulah sebabnya ketika orang berperahu disebuah sungai akan merasakan arus bertambah deras ketika sungai menyempit.

Perkalian antara luas penampang dan volume fluida ( $A \times v$ ) dinamakan laju aliran atau fluks volume (dimensinya volume/waktu). Banyak orang menyebut ini dengan debit ( $Q$  = jumlah fluida yang mengalir lewat suatu penampang tiap detik). Secara matematis dapat ditulis:

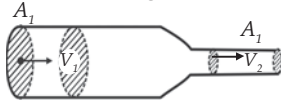
$$Q = A \times v = V/t$$

dengan  $V$  menyatakan volume fluida yang mengalir dalam waktu  $t$ .



### Contoh 7.6

Perhatikan gambar di bawah ini!



Diketahui air mengalir melalui sebuah pipa. Diameter pipa bagian kiri  $A_1 = 10$  cm dan bagian kanan  $A_2 = 6$  cm, serta kelajuan aliran air pada pipa bagian kiri  $v_1 = 5$  m/s. Hitunglah kelajuan aliran air yang melalui  $A_2$ !

Diketahui : a.  $d_1 = 10$  cm = 0,1 m  
b.  $r_1 = 0,05$  m  
c.  $d_2 = 6$  cm = 0,06 m  
d.  $r_2 = 0,03$  m

Ditanyakan:  $v_2 = \dots$ ?

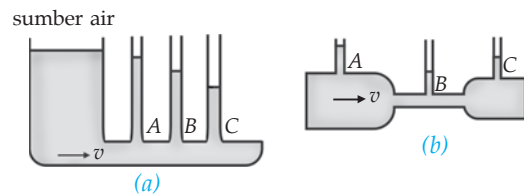
Jawab:

$$\begin{aligned} A_1 v_1 &= A_2 v_2 \Rightarrow v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} v_1 \\ &= \frac{d_1^2}{d_2^2} v_1 \\ &= \left( \frac{0,1}{0,06} \right)^2 5 \\ &= 13,9 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, kelajuan aliran air di  $A_2$  sebesar 13,9 m/s.

## 2. Tekanan di Dalam Fluida Dinamik

Hubungan antara tekanan dan kedalaman di dalam fluida telah Anda pelajari pada bab tentang fluida tak bergerak. Sekarang, bagaimana hubungan antara tekanan dan kecepatan di dalam fluida? Daniel Bernoulli telah membuktikan bahwa makin besar kecepatan fluida, makin kecil tekanannya. Begitu juga sebaliknya, makin kecil kecepatan fluida, makin besar tekanannya. Pernyataan tersebut dikenal sebagai *asas Bernoulli*.



**Gambar 7.16** (a) Fluida dinamik (b) Skema untuk menyelidiki tekanan pada fluida mengalir.

Perhatikan Gambar 7.16 (a)! Terlihat pada gambar tinggi kolom air  $A$ ,  $B$ , dan  $C$  berbeda. Hal ini disebabkan tekanan di titik  $A$ ,  $B$ , dan  $C$  berbeda. Tekanan terbesar ada pada kolom air  $A$  dan tekanan terkecil ada pada kolom air  $C$ .

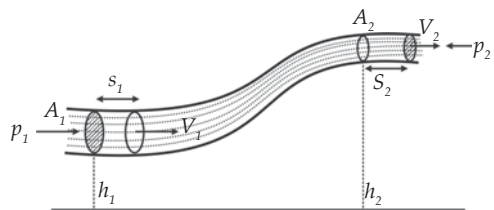
Perhatikan Gambar 7.16 (b)! Berdasarkan persamaan kontinuitas, pipa  $B$  akan memiliki kelajuan paling besar, karena memiliki diameter pipa paling kecil. Hasil pengamatan menunjukkan pada kolom  $B$  kenaikan permukaan airnya paling rendah. Hal ini menunjukkan pada titik  $B$  tekanannya paling rendah.

Dalam kehidupan sehari-hari, cukup banyak peristiwa yang melibatkan asas Bernoulli ini. Misalnya, Anda sedang mengendarai sepeda motor, kemudian tiba-tiba ada sebuah mobil mendahului dengan posisi sangat berdekatan. Anda pasti merasakan suatu tarikan ke arah mobil tersebut. Hal ini terjadi karena ruang antara sepeda motor dengan mobil cukup sempit sehingga kecepatan udara menjadi lebih cepat dibanding pada tempat lain. Naikinya kelajuan udara menyebabkan tekanan pada ruang ini menjadi lebih rendah dibanding ke tempat lain. Oleh karena itu, Anda mendapat tekanan yang lebih besar dari sisi luar sepeda motor dan mobil.

### a. Persamaan Bernoulli

Ketika mencoba menutup lubang selang di mana air sedang mengalir ke luar, apa yang Anda rasakan? Anda tentu merasakan gaya dorong (tekanan) dari air tersebut. Hal yang mirip terjadi ketika Anda berdiri di tengah angin yang cukup besar. Di sini udara yang bergerak mengerjakan gaya tekan pada tubuh Anda. Kedua peristiwa di atas menunjukkan bahwa fluida yang bergerak dapat menimbulkan tekanan. Besarnya tekanan akibat gerakan fluida dapat dihitung dengan konsep kekekalan energi atau prinsip usaha dan energi.

Perhatikan Gambar 7.17! Suatu fluida yang massa jenisnya  $\rho$  dialirkan ke dalam pipa dengan penampang yang berbeda. Tekanan  $p_1$  pada penampang  $A_1$  disebabkan oleh gaya  $F_1$  dan tekanan  $p_2$  disebabkan oleh gaya  $F_2$ . Gaya  $F_1$  melakukan usaha sebesar  $w_1 = F_1 s_1$  dan  $F_2$  melakukan usaha sebesar  $w_2 = -F_2 s_2$ . Tanda negatif menyatakan bahwa gaya yang bekerja ke arah kiri, sedangkan perpindahan ke arah kanan. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.



Gambar 7.17 Skema persamaan Bernoulli.

$$\begin{aligned}
w_{\text{total}} &= w_1 + w_2 \\
&= F_1 s_1 + (-F_2 s_2) \\
&= p_1 A_1 s_1 - p_2 A_1 s_2 \\
&= p_1 V_1 - p_2 V_2 \\
w_{\text{total}} &= (p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots (1)
\end{aligned}$$

Besar usaha total ini sesuai dengan perubahan energi mekanik ( $E_p + E_k$ ) yang terjadi saat fluida berpindah dari bagian penampang  $A_1$  ke  $A_2$ .

$$\begin{aligned}
w_{\text{total}} &= E_m = \Delta E_p + \Delta E_k \\
&= \left( \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \right) + (m g h_2 - m g h_1) \\
&= \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + m g (h_2 - h_1) \\
w_{\text{total}} &= m \left( \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + g (h_2 - h_1) \right) \dots\dots\dots (2)
\end{aligned}$$

Apabila persamaan (1) dan (2) digabungkan, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
(p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} &= m \left( \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + g (h_2 - h_1) \right) \\
p_1 - p_2 &= \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (h_2 - h_1)
\end{aligned}$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$\text{Jadi, } p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konstan.}$$

Persamaan diatas dikenal sebagai persamaan Bernoulli. Besaran  $\rho g h$  adalah energi potensial fluida per satuan volume  $\left( \frac{E_p}{V} \right)$ . Nilai  $\frac{1}{2} \rho v^2$  adalah energi kinetik fluida per satuan volume  $\left( \frac{E_k}{V} \right)$  sebab  $\frac{m}{V} = \rho$ .

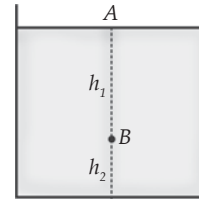
Berdasarkan persamaan Bernoulli, dapat diturunkan persamaan untuk fluida bergerak dan tidak bergerak.

### 1) Untuk Fluida Tidak Bergerak

Perhatikan Gambar 7.18! Karena fluida diam, maka kecepatan  $v_1 = v_2 = 0$ . Oleh karena itu, diperoleh persamaan seperti berikut.

$$p_1 + \rho gh_1 + 0 = p_2 + \rho gh_2 + 0$$

$$p_1 - p_2 = \rho g(h_2 - h_1)$$



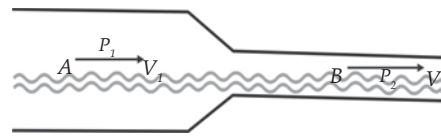
Gambar 7.18 Skema persamaan Bernoulli untuk fluida tidak bergerak.

### 2) Untuk Fluida yang Mengalir dalam Pipa Horizontal ( $h_1 = h_2$ )

Perhatikan Gambar 7.19! Karena  $h_1 = h_2$ , maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

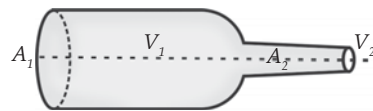
$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$$



Gambar 7.19 Skema persamaan Bernoulli untuk fluida yang mengalir di dalam pipa horizontal.

#### Contoh 7.7

Perhatikan gambar di samping! Besarnya diameter tabung besar dan kecil masing-masing 5 cm dan 3 cm. Jika diketahui tekanan di  $A_1$  sebesar  $16 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  dan memiliki kecepatan 3 m/s, maka hitunglah tekanan dan kecepatan di  $A_2$ !



- Diketahui :
- a.  $p_1 = 16 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
  - b.  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3 = 1.000 \text{ kg/m}^3$
  - c.  $v_1 = 3 \text{ m/s}$
  - d.  $d_1 = 5 \text{ cm}$
  - e.  $d_2 = 3 \text{ cm}$

- Ditanyakan:
- a.  $v_2 = \dots ?$
  - b.  $p_2 = \dots ?$

Jawab:

a. Kecepatan di  $A_2$

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{A_1 v_1}{A_2 v_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} v_1 \\ &= \frac{5^2}{3^2} 3 \\ &= 8,33 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b. Besarnya tekanan di  $A_2$

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \\ &= 16 \times 10^4 + \frac{1}{2} \times 1.000 (8,33^2 - 3^2) \\ &= 42,64 \times 10^4 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

## b. Penerapan Asas Bernoulli

Beberapa peristiwa atau alat yang menerapkan prinsip hukum Bernoulli, antara lain, tangki berlubang (penampungan air), alat penyemprot (obat nyamuk dan parfum), karburator, venturimeter, tabung pitot, dan gaya angkat pesawat terbang.

### 1) Tangki Berlubang

Perhatikan Gambar 7.20! Pada titik A, kecepatan fluida turun relatif kecil sehingga dianggap nol ( $v_1 = 0$ ). Oleh karena itu persamaan Bernoulli menjadi sebagai berikut.

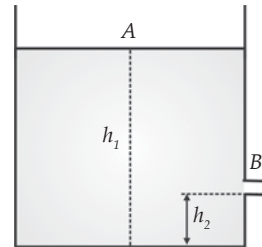
$$p_1 + \rho g h_1 + 0 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$g(h_1 - h_2) = \frac{1}{2} v^2$$

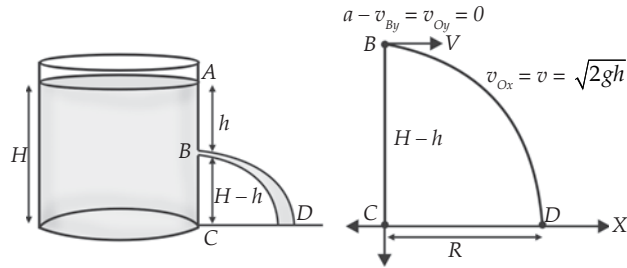
$$v = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

Jika  $h_1 - h_2 = h$ , maka:

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



**Gambar 7.20** Skema persamaan Bernoulli untuk fluida dalam tangki dan terdapat kebocoran dalam ketinggian tertentu.



*Gambar 7.21 Lintasan air (fluida) pada tangki berlubang.*

Perhatikan Gambar 7.21! Jika air keluar dari lubang B dengan kelajuan  $v$  yang jatuh di titik D, maka terlihat lintasan air dari titik B ke titik D berbentuk parabola. Berdasarkan analisis gerak parabola, kecepatan awal fluida pada arah mendatar sebesar  $v_{BX} = v = \sqrt{2gh}$ . Sedangkan kecepatan awal pada saat jatuh (sumbu Y) merupakan gerak lurus berubah beraturan (GLBB) dengan percepatan  $a_y = g$ . Berdasarkan persamaan jarak  $Y = v_{0y}t + \frac{1}{2}a_yt^2$  dengan  $Y = H - h$ ,  $v_{0y} = 0$ , dan  $a_y = g$ , maka Anda peroleh persamaan untuk menghitung waktu yang diperlukan air dari titik B ke titik D sebagai berikut.

$$H - h = 0 + \frac{1}{2}gt^2$$

$$t = \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}$$

Gerak air (fluida) pada sumbu X merupakan gerak lurus beraturan (GLB) sehingga berlaku persamaan:

$$X = v_{0X} t$$

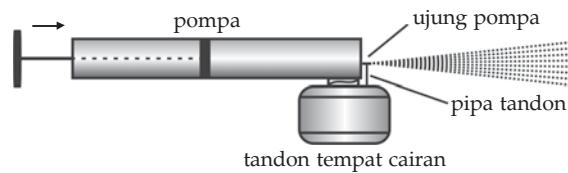
Karena  $v_{0X} = v_{BX} = v = \sqrt{2gh}$ , maka:

$$R = X = \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}$$

$$= \sqrt{4h(H-h)}$$

$$R = 2\sqrt{h(H-h)}$$

## 2) Alat Penyemprot

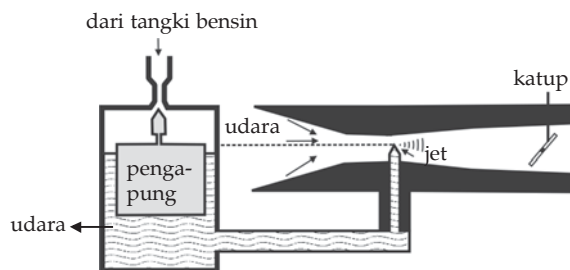


*Gambar 7.22 Penyemprot racun serangga.*

Alat penyemprot yang menggunakan prinsip Bernoulli yang sering Anda gunakan adalah alat penyemprot racun serangga. Perhatikan Gambar 7.22! Ketika Anda menekan batang pengisap, udara dipaksa keluar dari tabung pompa melalui tabung sempit pada ujungnya. Semburan udara yang bergerak dengan cepat mampu menurunkan tekanan pada bagian atas tabung tandon yang berisi cairan racun. Hal ini menyebabkan tekanan atmosfer pada permukaan cairan turun dan memaksa cairan naik ke atas tabung. Semburan udara berkelajuan tinggi meniup cairan, sehingga cairan dikeluarkan sebagai semburan kabut halus.

## 3) Karburator

Karburator adalah alat yang berfungsi untuk menghasilkan campuran bahan bakar dengan udara, campuran ini memasuki silinder mesin untuk tujuan pembakaran. untuk memahami cara kerja karburator pada kendaraan bermotor, perhatikan Gambar 7.23 berikut!



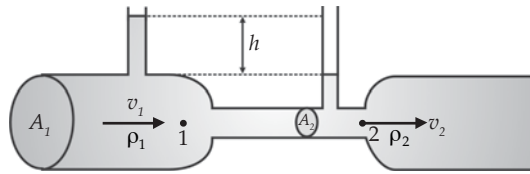
*Gambar 7.23 Diagram sebuah karburator.*

Penampang pada bagian atas jet menyempit, sehingga udara yang mengalir pada bagian ini bergerak dengan kelajuan yang tinggi. Sesuai asas Bernoulli, tekanan pada bagian ini rendah. Tekanan di dalam tangki bensin sama dengan tekanan atmosfer. Tekanan atmosfer memaksa bahan bakar (bensin atau solar) tersembur keluar melalui jet sehingga bahan bakar bercampur dengan udara sebelum memasuki silinder mesin.

## 4) Venturimeter

Tabung venturi adalah venturimeter, yaitu alat yang dipasang pada suatu pipa aliran untuk mengukur kelajuan zat cair. Ada dua venturimeter yang akan Anda pelajari, yaitu venturimeter tanpa manometer dan venturimeter menggunakan manometer yang berisi zat cair lain.

a) Venturimeter Tanpa Manometer



Gambar 7.24 Venturimeter tanpa sistem manometer.

Gambar 7.24 menunjukkan sebuah venturimeter yang digunakan untuk mengukur kelajuan aliran dalam sebuah pipa. Untuk menentukan kelakuan aliran  $v_1$  dinyatakan dalam besaran-besaran luas penampang  $A_1$  dan  $A_2$  serta perbedaan ketinggian zat cair dalam kedua tabung vertikal  $h$ . Zat cair yang akan diukur kelajuannya mengalir pada titik-titik yang tidak memiliki perbedaan ketinggian ( $h_1 = h_2$ ) sehingga berlaku persamaan berikut.

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Berdasarkan persamaan kontinuitas diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \Rightarrow v_1 = \frac{A_2 v_2}{A_1} \text{ atau } v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2}$$

Jika persamaan ini Anda masukan ke persamaaan  $p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$ , maka diperoleh persamaan seperti berikut.

$$p_1 = p_2 = \frac{1}{2} \rho \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 v_1^2 - v_1^2 \right]$$

$$p_1 = p_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]$$

Pada Gambar 7.24 terlihat perbedaan ketinggian vertikal cairan tabung pertama dan kedua adalah  $h$ . Oleh karena itu selisih tekanan sama dengan tekanan hidrostatik cairan setinggi  $h$ .

$$p_1 - p_2 = \rho g h$$

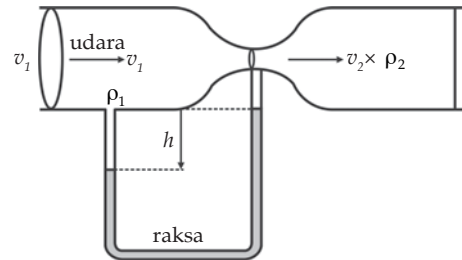


Dengan menggabungkan kedua persamaan yang melibatkan perbedaan tekanan tersebut diperoleh kelajuan aliran fluida  $v_1$ .

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}}$$

### b) Venturimeter dengan Manometer

Pada prinsipnya venturimeter dengan manometer hampir sama dengan venturimeter tanpa manometer. Hanya saja dalam venturimeter ini ada tabung U yang berisi raksa. Perhatikan Gambar 7.25! Berdasarkan penurunan rumus yang sama pada venturimeter tanpa manometer, diperoleh kelajuan aliran fluida  $v_1$  adalah sebagai berikut.



Gambar 7.25 Venturimeter dengan sistem manometer.

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\rho_r gh}{\rho_u \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}}$$

Keterangan:

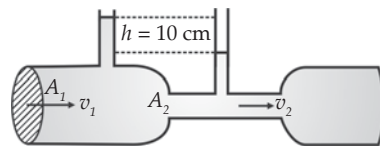
$\rho_r$  : massa jenis raksa

$\rho_u$  : massa jenis udara

### Contoh 7.8

Air mengalir melalui pipa venturi seperti gambar di samping. Perbandingan luas penampang pipa besar dengan penampang pipa kecil

adalah  $\frac{A_1}{A_2} = 2$ . Apabila beda tinggi



air pada tabung kecil sebesar 10 cm dan  $g = 10 \text{ m/s}$ , maka berapakah kelajuan air yang mengalir melalui penampang  $A_2$ ?

Diketahui : a.  $\frac{A_1}{A_2} = 2$

b.  $h = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

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

Ditanyakan :  $v_2 = \dots?$

Jawab:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Karena  $v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2}$  dan  $p_1 - p_2 = \rho g h$  maka:

$$\rho g h = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 v_2^2 \right])$$

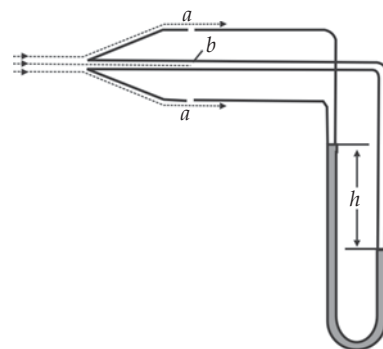
$$2 g h = v_2^2 \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]$$

$$v_2 = \frac{\sqrt{2 g h}}{\sqrt{1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2}} = \frac{\sqrt{2 \times 10 \times 0,1}}{\sqrt{1 - \left( \frac{1}{2} \right)^2}} = 2\sqrt{\frac{2}{3}}$$

Jadi, kelajuan aliran yang melewati  $A_2$  sebesar  $2\sqrt{\frac{2}{3}} \text{ m/s}$ .

## 5) Tabung Pitot

Alat ukur yang dapat Anda gunakan untuk mengukur kelajuan gas adalah *tabung pitot*. Perhatikan Gambar 7.26! Gas (misalnya udara) mengalir melalui lubang-lubang di titik  $a$ . Lubang-lubang ini sejajar dengan arah aliran dan dibuat cukup jauh di belakang sehingga kelajuan dan tekanan gas di luar lubang-lubang tersebut mempunyai nilai seperti halnya dengan aliran bebas. Jadi,  $v_a = v$  (kelajuan gas) dan tekanan pada kaki kiri manometer tabung pitot sama dengan tekanan aliran gas (Pa).



Gambar 7.26 Diagram penampang sebuah pitot.

Lubang dari kaki kanan manometer tegak lurus terhadap aliran sehingga kelajuan gas berkurang sampai ke nol di titik  $b$  ( $v_b = 0$ ). Pada titik ini gas berada dalam keadaan diam. Tekanan pada kaki kanan manometer sama dengan tekanan di titik  $b$  ( $p_b$ ). Beda ketinggian titik  $a$  dan  $b$  dapat diabaikan ( $h_a = h_b$ ), sehingga perbedaan tekanan yang terjadi menurut persamaan Bernoulli adalah sebagai berikut.

$$p_a + \frac{1}{2}\rho v_a^2 = p_b + 0$$

$$p_b - p_a = \frac{1}{2}\rho v_a^2$$

Perbedaan tekanan ini sama dengan tekanan hidrostatika fluida (raksa) pada manometer.

$$p_b - p_a = \rho_r g h$$

Oleh karena itu, kecepatan aliran gas  $v_A = v$  dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_r g h}{\rho}}$$

### Contoh 7.10

Sebuah pipa pitot digunakan untuk mengukur kelajuan udara yang melalui sebuah terowongan. Pipa pitot tersebut dilengkapi dengan manometer alkohol ( $\rho_a = 800 \text{ kg/m}^3$ ). Apabila beda tinggi antara kedua kaki manometer 18 cm dan massa jenis udara  $\rho_u = 1,2 \text{ kg/m}^3$ , maka hitunglah kelajuan aliran udara tersebut! ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ).

Diketahui : a.  $\rho_u = 1,2 \text{ kg/m}^3$

b.  $\rho_a = 800 \text{ kg/m}^3$

c.  $h = 18 \text{ cm} = 0,18 \text{ m}$

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

Ditanyakan :  $v = \dots?$

Jawab:

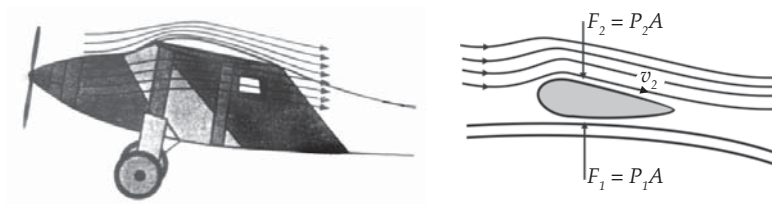
Persamaan yang berlaku dalam pipa pitot.

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_a g h}{\rho_u}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{2 \times 800 \times 10 \times 18}{1,2}} \\
 &= \sqrt{2.400} \\
 &= 20\sqrt{6} \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Jadi, kelajuan udara sebesar  $20\sqrt{6}$  m/s.

## 6) Gaya Angkat Sayap pada Pesawat Terbang



*Gambar 7.27 Garis-garis arus di sekitar sayap pesawat terbang.*

Pesawat terbang dapat terangkat ke udara karena kelajuan udara yang melalui sayap pesawat. Pesawat terbang tidak seperti roket yang terangkat ke atas karena aksi-reaksi antara gas yang disebarkan roket itu sendiri. Roket menyemburkan gas ke belakang, dan sebagai reaksinya gas mendorong roket maju. Jadi, roket dapat terangkat ke atas walaupun tidak ada udara, tetapi pesawat terbang tidak dapat terangkat jika tidak ada udara.

Penampang sayap pesawat terbang mempunyai bagian belakang yang lebih tajam dan sisi bagian atas yang lebih melengkung daripada sisi bagian bawahnya. Perhatikan Gambar 7.27! Garis arus pada sisi bagian atas lebih rapat daripada sisi bagian bawahnya. Artinya, kelajuan aliran udara pada sisi bagian atas pesawat  $v_2$  lebih besar daripada sisi bagian bawah sayap  $v_1$ . Sesuai dengan asas Bernoulli, tekanan pada sisi bagian atas  $p_2$  lebih kecil daripada sisi bagian bawah  $p_1$  karena kelajuan udaranya lebih besar. Dengan  $A$  sebagai luas penampang pesawat, maka besarnya gaya angkat dapat Adna ketahui melalui persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 F_1 - F_2 &= (p_1 - p_2) A \\
 F_1 - F_2 &= \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) A
 \end{aligned}$$

Pesawat terbang dapat terangkat ke atas jika gaya angkat lebih besar daripada berat pesawat. Jadi, suatu pesawat dapat terbang atau tidak tergantung dari berat pesawat, kelajuan pesawat, dan ukuran sayapnya.

Makin besar kecepatan pesawat, makin besar kecepatan udara. Hal ini berarti gaya angkat sayap pesawat makin besar. Demikian pula, makin besar ukuran sayap makin besar pula gaya angkatnya.

Supaya pesawat dapat terangkat, gaya angkat harus lebih besar daripada berat pesawat ( $F_1 - F_2 > m g$ ). Jika pesawat telah berada pada ketinggian tertentu dan pilot ingin mempertahankan ketinggiannya (melayang di udara), maka kelajuan pesawat harus diatur sedemikian rupa sehingga gaya angkat sama dengan berat pesawat ( $F_1 - F_2 = m g$ ).



### Kegiatan 7.3

#### Fluida Dinamik

##### A. Tujuan

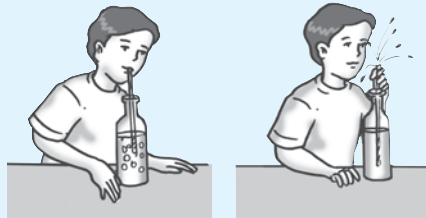
Anda dapat membuktikan hukum-hukum fluida dinamik.

##### B. Alat dan Bahan

1. Botol yang berisi soda
2. Tanah liat
3. Sedotan

##### C. Langkah Kerja

1. Sediakan satu botol soda dari kaca dan isi dengan air sampai tiga perempatnya!
2. Gunakan tanah liat sebagai penutup botol, di tengahnya pasang-kan sebuah sedotan dengan posisi berdiri, sampai salah satu ujungnya masuk ke dalam air (ke bawah permukaan air)!
3. Peganglah tanah liat penyumbat itu dengan tangan. Selanjutnya tiuplah sedotan tersebut!
4. Setelah Anda merasa tidak bisa meniup lebih lama lagi, cepat-cepat jauhkan mulut kalian dari sedotan!
5. Apa yang terjadi!
6. Buatlah kesimpulan dari kegiatan ini!



### Soal Kompetensi 7.3

1. Sebuah bejana yang tingginya 150 cm berisi penuh air. Pada jarak 25 cm dari dasar bak diberi lubang pengeluaran yang dapat dibuka dan ditutup. Jika percepatan gravitasi bumi sebesar  $9,8 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah tekanan air pada dasar bejana selama pipa ditutup, kelajuan air yang keluar dari lubang pengeluaran ketika lubang dibuka, dan luas penampang lubang kebocoran jika debit air per menit 30 L!
2. Sebuah penampungan berisi penuh air. Pada penampungan tersebut dibuat lubang pada jarak 8 m dari permukaan air dalam penampungan. Hitunglah kecepatan keluarnya air dari lubang tersebut dan banyaknya air yang keluar tiap menit jika diameter lubang 2 cm! (anggap bak luas sekali, sehingga penurunan permukaan dapat diabaikan dan  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ )

### 1 Info Kita

#### Bagaimana Pesawat Bisa Terbang?



Sumber: Encarta Encyclopedia

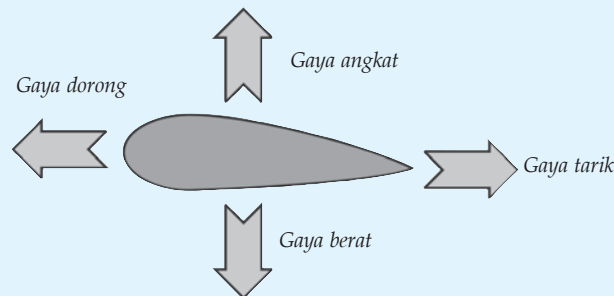
Pabrik-pabrik pesawat terbang modern sudah menggunakan mesin jet. Namun prinsip terbangnya masih menggunakan ilmu gaya udara seperti penemuan Wrigth bersaudara, yaitu Orville Wright dan Wilbur Wright. Mereka berhasil melakukan

penerbangan pertama di dunia menggunakan pesawat rancangan sendiri yang diberi nama flyer, pada 1903 di Amerika Serikat.

Selain Wright bersaudara, tercatat beberapa penemu pesawat terbang yang lain, yakni Samuel F cody yang melakukan penerbangan di lapangan udara Fanborough di Inggris pada 1910. Untuk pesawat jenis *lighter than air* (lebih ringan dari udara) menggunakan balon udara, bahkan sudah terbang jauh sebelumnya. Balon udara panas penemuan Joseph Montgolfier dan Etienne Montgolfier asal Prancis, kali pertama terbang pada tahun 1782. Penemuan mereka kemudian disempurnakan seorang Jerman bernama Ferdinand von Zeppelin dengan memodifikasi balon berbentuk cerutu yang digunakan untuk membawa penumpang dan barang pada 1900.

Setelah pesawat Flyer penemuan Wright bersaudara, pesawat terbang banyak mengalami modifikasi baik dari rancang bangun, bentuk, dan mesin untuk memenuhi kebutuhan transportasi udara. Perkembangan teknologi pesawat terbang mencapai beberapa kemajuan selama kurang dari satu abad, terlebih lagi setelah ditemukannya teknologi tidak kasat radar, yaitu *stealth*.

Pada umumnya, pesawat terdiri atas badan pesawat, kabin, sayap, ekor, sirip, dan roda. Awak pesawat terdiri atas pilot, co-pilot, navigator, operator radio, teknisi, dan pramugari/pramugara (khusus pesawat penumpang sipil). Satuan kecepatan pesawat adalah *mach*, dimana 1 Mach setara dengan kecepatan suara. Ketika pesawat terbang di angkasa, pada dasarnya memerlukan dua hal, yaitu mendorong dan mengangkat. Mendorong adalah mendesak pesawat maju ke depan menggunakan mesin atau baling-baling. Sebuah baling-baling mendorong, sama prinsipnya dengan baling-baling pengangkat. Dua kekuatan tersebut bekerja berlawanan dengan gaya tarik dan gravitasi (gaya berat). Secara umum, prinsip terbang pesawat menggunakan hukum fisika, yakni memanfaatkan hukum Bernoulli di udara dengan memanfaatkan arus laminair sayap yang dihasilkan akibat daya dorong mesin pesawat.



*Gambar teori Bernoulli*

Pada awalnya, navigasi pesawat menggunakan tanda-tanda yang mudah dikenal di darat, baik tanda-tanda alam maupun tanda-tanda buatan manusia seperti gunung, sungai, atau rel kereta api. Dalam perkembangannya, navigasi pesawat menjadi berbagai jenis, yaitu navigasi radio, radar, inersial dan satelit.

Pada praktiknya pesawat terbang menggunakan beberapa teknologi navigasi sekaligus. Pesawat komersial atau pesawat penumpang biasanya lebih sering menggunakan navigasi radio. Navigasi radar dan inersial lebih sering digunakan oleh pesawat militer mata-mata karena sifatnya yang *self contain* (tidak bergantung pada stasiun di luar). Sedangkan

navigasi satelit digunakan oleh semua jenis pesawat. Selain itu, pesawat-pesawat modern biasanya telah menggunakan suatu alat yang di sebut TICAS. Alat ini untuk memantau lalu lintas udara, yaitu memperingatkan jarak antara pesawat di udara.

*(Dikutip seperlunya dari suplemen anak, Suara Merdeka, edisi 38, 2006)*



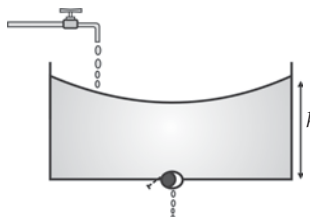
## Rangkuman

1. Fluida statis adalah fluida yang tidak mengalami perpindahan bagian-bagian pada zatnya.
2. Tekanan didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada suatu bidang persatuan luas bidang tersebut.
3. Tekanan pada fluida dikelompokkan menjadi dua, yaitu pada tekanan tertutup dan terbuka.
4. Contoh tekanan fluida statis pada ruang terbuka adalah hukum utama hidrostatik, bejana berhubungan, dan hukum Archimedes.
5. Tegangan permukaan adalah gaya membuat permukaan cairan menegang seperti selaput.
6. Gejala meniskus adalah peristiwa kelengkungan suatu permukaan di dalam tabung.
7. Gejala kapilaritas merupakan peristiwa naik turunnya zat cair di dalam pipa kapiler.
8. Viskositas adalah ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida.
9. Fluida dinamis adalah fluida yang mengalami perpindahan bagian-bagian pada zat itu.
10. Contoh peralatan yang menggunakan hukum Bernoulli, antara lain, alat penyemprot, karburator, sayap pesawat, dan tabung pitot.

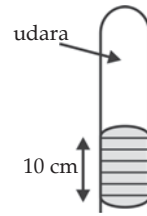


## P e l a t i h a n

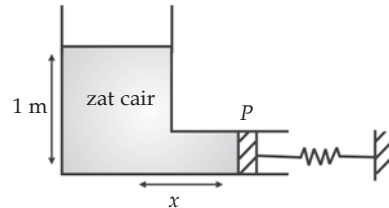
### A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!

1. Air terjun setinggi 10 m dengan debit 50 m<sup>3</sup>/s dimanfaatkan untuk memutar turbin yang menggerakkan generator listrik. Jika 25% energi air dapat berubah menjadi energi listrik dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka daya keluaran generator adalah ....
    - a. 0,9 MW
    - b. 1,10 MW
    - c. 1,25 MW
    - d. 1,30 MW
    - e. 1,50 MW
  
  2. Perhatikan gambar di samping! Air mengalir ke dalam bak berpermukaan luas dengan debit 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s. Bak ini bocor di bagian bawah melalui lubang yang luasnya 1 cm<sup>2</sup>. Ketinggian maksimum air dalam bak yang dapat dicapai adalah ....
    - a. 5 cm
    - b. 4 cm
    - c. 3 cm
    - d. 2 cm
    - e. 0,5 cm
- 
3. Sebuah pesawat terbang dapat mengangkasa karena ....
    - a. perbedaan tekanan dari aliran-aliran udara
    - b. pengaturan titik berat pesawat
    - c. gaya angkat dari mesin pesawat
    - d. perubahan momentum dari pesawat
    - e. berat pesawat yang lebih kecil daripada berat udara yang dipindahkan
  
  4. Air terjun setinggi 8 m dengan debit 10 m<sup>3</sup>/s dimanfaatkan untuk memutar generator listrik mikro. Jika 10% energi air berubah menjadi energi listrik dan gaya gravitasi sebesar 10 m/s<sup>2</sup>, maka daya keluaran generator listrik adalah ....
    - a. 70 kW
    - b. 75 kW
    - c. 80 kW
    - d. 90 kW
    - e. 95 kW
  
  5. Jika percepatan gravitasi adalah 9,8 m/s<sup>2</sup>, maka berat jenis raksa dalam satuan SI adalah ....
    - a. 13,6 kg/dm<sup>3</sup>
    - b. 13,6 × 1000 × 9,81 N/m<sup>3</sup>
    - c. 13,6 × 1000 kg/m<sup>3</sup>
    - d. 13,6 × 981 dyne/cm<sup>3</sup>
    - e. 13,6 N/m<sup>3</sup>
  
  6. Dimensi ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup> menyatakan dimensi ....
    - a. gaya
    - b. energi
    - c. daya
    - d. tekanan
    - e. momentum

7. Gambar di samping menunjukkan sebatang pipa kaca yang berisi udara. Ujung atas pipa tertutup, sedangkan ujung bawah tertutup oleh raksa yang tingginya 10 cm. Jika tekanan udara di luar 76 cmHg, maka tekanan udara di dalam pipa kaca adalah ....



- a. 0 cmHg  
b. 10 cmHg  
c. 66 cmHg  
d. 76 cmHg  
e. 86 cmHg
8. Perhatikan gambar di samping! Penghisap  $P$  mempunyai luas penampang  $0,75 \text{ cm}^2$  yang bergerak bebas tanpa gesekan sehingga dapat menekan pegas sejauh  $x$ . Jika konstanta pegas  $75 \text{ N/m}$ , dan massa jenis zat cair  $500 \text{ kg/m}^3$ , maka nilai  $x$  adalah ....



- a. 0,4  
b. 0,5  
c. 0,6  
d. 0,7  
e. 1
9. Sekeping mata uang logam yang dicelupkan dalam fluida  $A$  yang memiliki massa jenis  $0,8 \text{ g/cm}^3$  mengalami gaya ke atas sebesar  $F_A$ . Jika dicelupkan dalam fluida  $B$  yang memiliki massa jenis  $0,7 \text{ g/cm}^3$ , uang tersebut mengalami gaya tekan sebesar  $F_B$ . Perbandingan kedua gaya tersebut  $F_A/F_B$  bernilai ....

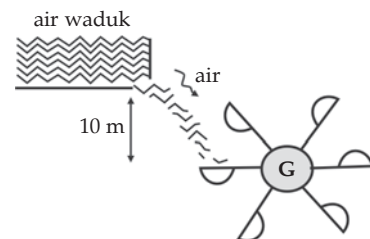
- a.  $\frac{8}{14}$   
b.  $\frac{4}{7}$   
c.  $\frac{7}{6}$   
d.  $\frac{7}{8}$   
e.  $\frac{8}{7}$

10. Apabila pipa barometer diganti dengan pipa yang luas penampangnya dua kalinya, maka pada tekanan udara luar 1 atmosfer tinggi air raksa dalam pipa adalah ....

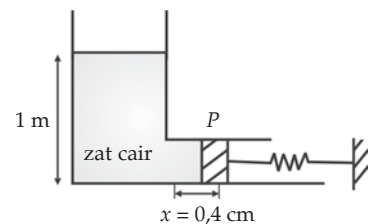
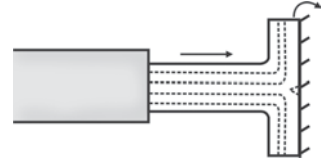
- a. 19 cm  
b. 38 cm  
c. 76 cm  
d. 114 cm  
e. 152 cm

### B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!

1. Perhatikan gambar di samping! Diketahui  $G$  adalah generator 1.000 W yang digerakkan dengan kincir air. Generator hanya menerima energi sebesar 80% dari energi air. Jika generator dapat bekerja normal, maka tentukan debit air yang sampai ke kincir!



2. Air terjun setinggi 20 m digunakan untuk pembangkit tenaga air (PLTA). Setiap detik air mengalir  $10 \text{ m}^3$ . Jika efisiensi generator 55 % dan percepatan gravitasi sebesar  $10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan daya rata-rata yang dihasilkan generator tersebut!
3. Perhatikan gambar di samping! Sebuah pipa memancarkan air dengan kecepatan  $80 \text{ cm/s}$  dengan debit  $30 \text{ cm}^3/\text{s}$  hingga mengenai dinding. Setelah mengenai dinding, air bergerak sejajar dinding. Bila massa  $1 \text{ cm}^3$  air memiliki massa  $1 \text{ g}$ , maka tentukan besar gaya yang dialami dinding!
4. Air mengalir pada suatu pipa yang diameternya berbeda dengan perbandingan 1 : 2. Jika kecepatan air yang mengalir pada bagian pipa yang besar sebesar  $40 \text{ m/s}$ , maka tentukan besarnya kecepatan air pada bagian pipa yang kecil!
5. Sebuah pipa silinder yang lurus mempunyai dua macam penampang masing-masing dengan luas  $200 \text{ mm}^2$  dan  $100 \text{ mm}^2$ . Pipa tersebut diletakkan secara horizontal, sedangkan air di dalamnya mengalir dari arah penampang besar ke penampang kecil. Apabila kecepatan arus di penampang besar adalah  $2 \text{ m/s}$ , maka tentukan kecepatan arus di penampang kecil!
6. Sebuah benda dimasukkan ke dalam air. Ternyata 25% dari benda terapung di atas permukaan air. Berapakah massa jenis benda tersebut?
7. Sebuah balon dengan diameter 10 m berisi udara panas. Kerapatan udara di dalam balon adalah 75 % kerapatan udara luar (kerapatan udara luar sebesar  $1,3 \text{ kg/m}^3$ ). Hitunglah besar massa total maksimum penumpang dan beban yang masih dapat diangkat balon tersebut, jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ !
8. Sebuah benda terapung di atas permukaan yang berlapis minyak dengan 50% volume benda berada di dalam air, 30% di dalam minyak, dan sisanya berada di atas permukaan minyak. Jika massa jenis minyak  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , maka tentukan massa jenis benda tersebut!
9. Sebuah balok es terapung di dalam bejana berisi air. Jika diketahui massa jenis es dan air masing-masing adalah  $0,9 \text{ g/cm}^3$  dan  $1 \text{ g/cm}^3$ , maka tentukan bagian es yang terendam dalam air!
10. Untuk menentukan massa jenis zat cair dirangkai alat seperti gambar di samping. Pengisap  $P$  dapat bergerak bebas dan memiliki luas penampang  $1 \text{ cm}^2$ . Jika konstanta pegas  $100 \text{ N/m}$  dan pegas tertekan sejauh  $0,4 \text{ cm}$ , maka hitunglah massa jenis zat cair tersebut!



## Bab VIII

# Teori Kinetik Gas Ideal



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik.



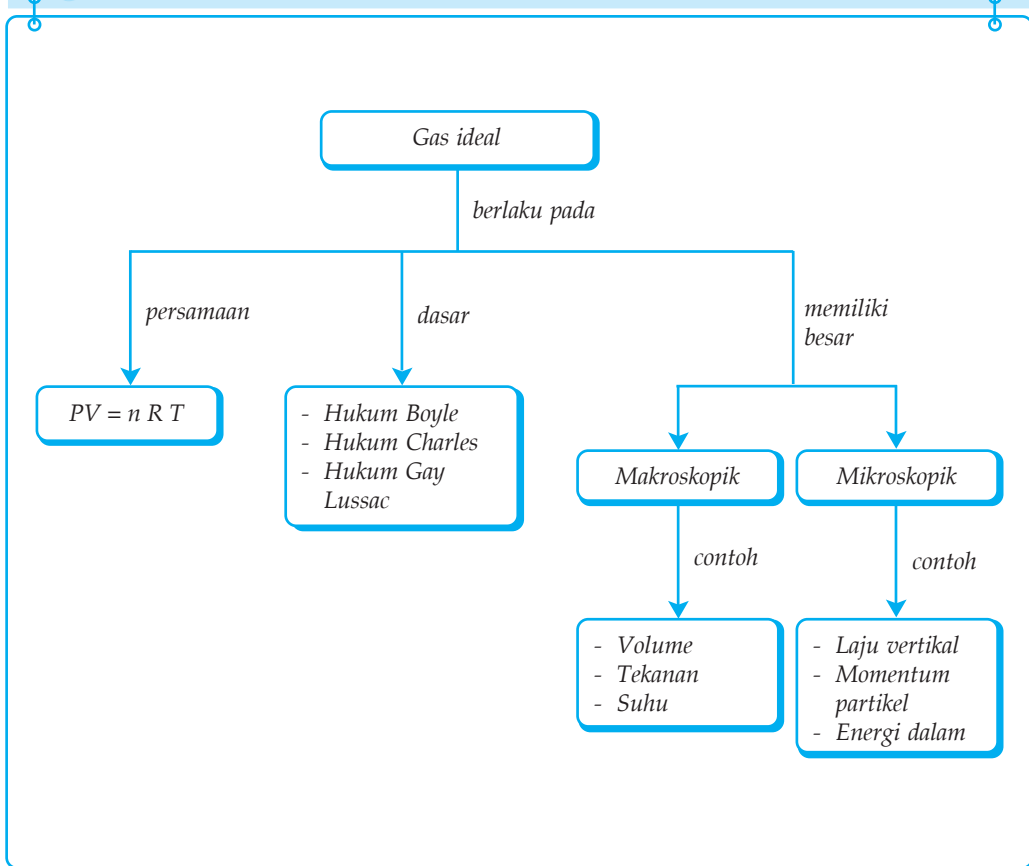
Sumber: Encarta Encyclopedia

Berdasarkan kemampuan akalunya yang terus berkembang, manusia dapat membuat sesuatu yang tadinya tidak mungkin menjadi mungkin. Dengan memahami tentang sifat dan karakteristik gas, manusia dapat terbang menggunakan balon udara. Prinsip gas manakah yang diterapkan pada sistem ini?

### Kata Kunci

- Makroskopik
- Mikroskopik
- Hukum Boyle
- Hukum Charles
- Ekipartisi
- Gas Ideal
- Energi Dalam
- Derajat Kebebasan
- Hukum Gay Lussac
- Tetapan Boltzmann
- Keadaan standar

## Peta Konsep



Telah Anda ketahui bahwa gas termasuk salah satu dari tiga wujud zat. Di SMP Juga dipelajari bahwa gas menempati ruang dan bergerak secara acak. Gas dapat dipandang secara makroskopik dan mikroskopik. Gas memiliki besaran makroskopik, antara lain, volume, tekanan, dan suhu. Besaran-besaran ini secara langsung dapat diukur di laboratorium. Besaran-besaran lain seperti laju molekul, momentum molekul, dan energi kinetik molekul adalah besaran-besaran mikroskopik. Besaran-besaran ini tidak dapat diukur secara langsung di laboratorium.

Pada bab ini Anda akan mempelajari tentang gas ideal. Gas ideal merupakan gas yang secara tepat memenuhi hukum-hukum gas. Pada kehidupan sehari-hari, tidak ada gas yang termasuk gas ideal. Oleh karena itu, Anda akan mempelajari terlebih dahulu mengenai hukum-hukum tentang gas ideal. Bab ini juga membicarakan mengenai teori ekipartisi. Teori ekipartisi pada prinsipnya menjelaskan hubungan antara derajat kebebasan dengan energi kinetik.

## A. Hukum-Hukum yang Mendasari Persamaan Gas Ideal

Teori kinetik gas memberikan jembatan antara tinjauan gas secara mikroskopik dan makroskopik. Hukum-hukum gas seperti hukum Boyle, Charles, dan Gay Lussac, menunjukkan hubungan antara besaran-besaran makroskopik dari berbagai macam proses serta perumusannya. Kata kinetik berasal dari adanya anggapan bahwa molekul-molekul gas selalu bergerak.

Hukum Boyle dikemukakan oleh fisikawan Inggris yang bernama Robert Boyle. Hasil percobaan Boyle menyatakan bahwa apabila suhu gas yang berada dalam bejana tertutup dipertahankan konstan, maka tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya. Untuk gas yang berada dalam dua keadaan keseimbangan yang berbeda pada suhu konstan, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Keterangan:

$p_1$  : tekanan gas pada keadaan 1 ( $\text{N/m}^2$ )

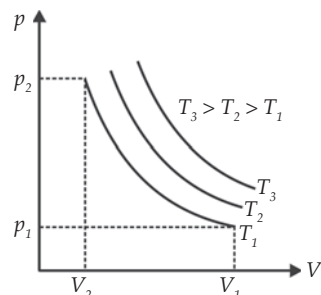
$p_2$  : tekanan gas pada keadaan 2 ( $\text{N/m}^2$ )

$V_1$  : volume gas pada keadaan 1 ( $\text{m}^3$ )

$V_2$  : volume gas pada keadaan 2 ( $\text{m}^3$ )

Jika dibuat grafik, maka akan menghasilkan sebuah kurva yang disebut kurva isotermal. Perhatikan Gambar 8.1! Kurva isotermal merupakan kurva yang bersuhu sama.

Hukum Charles dikemukakan oleh fisikawan Prancis bernama Jacques Charles. Charles menyatakan bahwa jika tekanan gas



**Gambar 8.1** Grafik hubungan volume dan tekanan gas pada suhu konstan (isotermal).

yang berada dalam bejana tertutup dipertahankan konstan, maka volume gas sebanding dengan suhu mutlaknya. Untuk gas yang berada dalam dua keadaan seimbang yang berbeda pada tekanan konstan, diperoleh persamaan sebagai berikut.

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

Keterangan:

$V_1$  : volume gas pada keadaan 1 ( $\text{m}^3$ )

$V_2$  : volume gas pada keadaan 2 ( $\text{m}^3$ )

$T_1$  : suhu mutlak gas pada keadaan 1 (K)

$T_2$  : suhu mutlak gas pada keadaan 2 (K)

Apabila hubungan antara volume dan suhu pada hukum Charles Anda lukiskan dalam grafik, maka hasilnya tampak seperti pada Gambar 8.2. Kurva yang terjadi disebut kurva isobarik yang artinya bertekanan sama.

Hukum Gay Lussac dikemukakan oleh kimiawan Perancis bernama Joseph Gay Lussac. Gay Lussac menyatakan bahwa jika volume gas yang berada dalam bejana tertutup dipertahankan konstan, maka tekanan gas sebanding dengan suhu mutlaknya. Untuk gas yang berada dalam dua keadaan seimbang yang berbeda pada volume konstan, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Keterangan:

$T_1$  : suhu mutlak gas pada keadaan 1 (K)

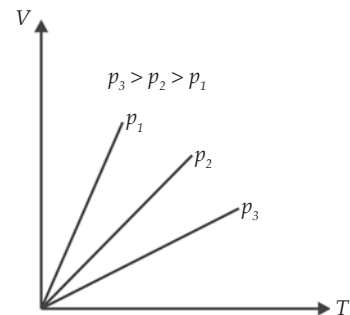
$T_2$  : suhu mutlak gas pada keadaan 2 (K)

$p_1$  : tekanan gas pada keadaan 1 ( $\text{N/m}^2$ )

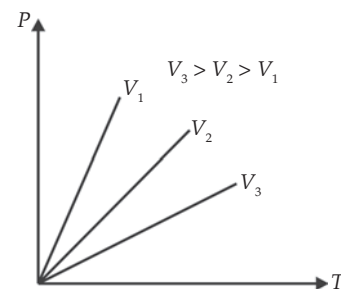
$p_2$  : tekanan gas pada keadaan 2 ( $\text{N/m}^2$ )

Apabila hubungan antara tekanan dan suhu gas pada hukum Gay Lussac dilukiskan dalam grafik, maka hasilnya tampak seperti pada Gambar 8.3. Kurva yang terjadi disebut kurva isokhorik yang artinya volume sama.

Apabila hukum Boyle, hukum Charles, dan hukum Gay Lussac digabungkan, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.



*Gambar 8.2 Grafik hubungan volume dan suhu gas pada tekanan konstan (isobarik)*



*Gambar 8.3 Grafik hubungan tekanan dan suhu gas pada volume konstan (isokhorik)*

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Persamaan di atas disebut hukum Boyle-Gay Lussac. Anda telah mempelajari hukum-hukum tentang gas, yaitu hukum Boyle, Charles, dan Gay Lussac. Namun, dalam setiap penyelesaian soal biasanya menggunakan hukum Boyle-Gay Lussac. Hal ini disebabkan hukum ini merupakan gabungan setiap kondisi yang berlaku pada ketiga hukum sebelumnya.

### Kolom Diskusi 8.1

Diskusikan dengan teman Anda tentang hubungan antara hukum Boyle dengan persamaan pada pipa Torricelli! Diskusikan juga jawaban dari soal berikut. Dalam sebuah pipa Torricelli terdapat gas dengan panjang kolom 10 cm dan panjang raksa (merkuri) dalam pipa 50 cm. Apabila pipa ditekan lebih dalam sehingga kolom raksa menjadi 20 cm, maka tentukan panjang kolom udara dalam pipa dan banyaknya mol gas dalam pipa tersebut (diketahui luas penampang pipa 1 cm<sup>2</sup>, tekanan barometer 75 cm Hg, dan suhu 27° C)! Kumpulkan hasil diskusi dan jawaban Anda di meja guru!

## T o k o h

### Joseph Louis Gay Lussac (1778 - 1850)



Sumber: Encarta  
Encyclopedia

J.L Gay Lusaac adalah ahli fisika dan kimia dari Prancis. Ia penemu hukum Gay Lussac, iodine, hidrometer, alkoholmeter, proses titrasi, dan merupakan salah seorang pendiri meteorologi. Ia lahir pada tanggal 6 Desember 1778 di Saint Leonard de Noblat.

Dua tahun setelah lulus kuliah ia menemukan Hukum Gay Lussac yang menyatakan “Jika tekanan gas dijaga tetap, maka kenaikan suhunya sebanding dengan kenaikan suhu mutlaknya”. Ia orang pertama yang terbang solo dengan balon hidrogen sampai ketinggian 7.016 meter untuk menyelidiki medan magnetik bumi, tekanan, dan suhu udara.



Bersama Thenard, ia mengadakan riset yang dibiayai dan dilindungi oleh Napoleon Bonaparte. Di sini ia menemukan unsur iodine dan menyatakan bahwa unsur prinsip dalam asam adalah hidrogen dan menemukan bahwa konsentrasi suatu asam dalam suatu larutan bisa ditemukan dengan menambahkan jumlah yang persis dari suatu basa yang sudah dikenal hingga asamnya ternetralkan.

Gay Lussac diangkat menjadi professor fisika di Sarbonne. Selanjutnya ia menjadi anggota French Chamber of Deputies, Chamber of Peers dan menjabat sebagai pembuat undang-undang di Paris. Ia meninggal tanggal 9 Mei 1850 setelah menyumbangkan banyak penemuan.

*(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)*

## B. Pengertian Gas Ideal

Berdasarkan eksperimen diketahui bahwa semua gas dalam kondisi kimia apapun, pada temperatur tinggi, dan tekanan rendah cenderung memperlihatkan suatu hubungan sederhana tertentu di antara sifat-sifat makroskopisnya, yaitu tekanan, volume dan temperatur. Hal ini menganjurkan adanya konsep tentang gas ideal yang memiliki sifat makroskopis yang sama pada kondisi yang sama. Berdasarkan sifat makroskopis suatu gas seperti kelajuan, energi kinetik, momentum, dan massa setiap molekul penyusun gas, Anda dapat mendefinisikan gas ideal dengan suatu asumsi (anggapan) tetapi konsisten (sesuai) dengan definisi makroskopis. Gas ideal merupakan gas yang memenuhi asumsi-asumsi berikut.

1. Suatu gas terdiri atas molekul-molekul yang disebut molekul. Setiap molekul identik (sama) sehingga tidak dapat dibedakan dengan molekul lainnya.
2. Molekul-molekul gas ideal bergerak secara acak ke segala arah.
3. Molekul-molekul gas ideal tersebar merata di seluruh bagian.
4. Jarak antara molekul gas jauh lebih besar daripada ukuran molekulnya.
5. Tidak ada gaya interaksi antarmolekul; kecuali jika antarmolekul saling bertumbukan atau terjadi tumbukan antara molekul dengan dinding.
6. Semua tumbukan yang terjadi baik antarmolekul maupun antara molekul dengan dinding merupakan tumbukan lenting sempurna dan terjadi pada waktu yang sangat singkat (molekul dapat dipandang seperti bola keras yang licin).
7. Hukum-hukum Newton tentang gerak berlaku pada molekul gas ideal.

## C. Persamaan Gas Ideal

Hukum Boyle-Gay Lussac berlaku untuk gas ideal dalam keadaan bejana tertutup. Persamaan hukum Boyle-Gay Lussac dapat dituliskan dalam bentuk seperti di bawah ini.

$$\frac{pV}{T} = \text{tetapan (konstan)}$$

Para ahli kimia menemukan bahwa tetapan (konstan) itu sebanding dengan jumlah mol ( $n$  R). Oleh karena itu, persamaannya menjadi seperti berikut.

$$\frac{pV}{T} = nR \text{ atau } pV = nRT$$

R selanjutnya disebut konstanta gas umum yang nilainya 8,31 J/mol K atau 0,082 L atm/mol K. Persamaan ini disebut persamaan gas ideal. Jika

$n = \frac{N}{N_a}$ , maka persamaan gas ideal di atas dapat ditulis sebagai berikut.

$$pV = \frac{N}{N_a} RT = N \left( \frac{R}{N_a} \right) T$$

Jika  $\frac{R}{N_a} = k$ , maka persamaannya menjadi:

$$pV = NkT$$

dengan  $k$  merupakan tetapan Boltzman yang nilainya  $1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ .

Jika  $n = \frac{m}{M}$  dengan  $n$  merupakan jumlah mol,  $m$  merupakan massa total gas, dan  $M$  merupakan massa molekul gas, maka persamaan gas ideal menjadi seperti berikut.

$$pV = \frac{m}{M} RT = \frac{m}{V} \frac{RT}{m}$$

Jika  $\frac{m}{V} = \rho$ , maka persamaannya menjadi:

$$p = \frac{\rho RT}{m}$$

dengan  $\rho$  merupakan massa jenis benda.

### Contoh 8.1

Diketahui sebuah tangki dengan kapasitas 10.000 liter berisi gas hidrogen pada tekanan 10 atm dan bersuhu 27° C. Tangki tersebut bocor sehingga tekanannya menjadi 8 atm. Hitunglah banyaknya gas hidrogen yang keluar?

Diketahui : a.  $M = 2$   
 b.  $V = 10.000$  liter  
 c.  $p_1 = 10$  atm  
 d.  $T = 300$  K  
 e.  $p_2 = 8$  atm

Ditanyakan :  $m = \dots?$

Jawab:

Keadaan awal (1)

$$\begin{aligned} p_1 V_1 = n_1 RT &\Rightarrow n_1 = \frac{p_1 V_1}{RT} \\ &= \frac{10 \times 10.000}{0,082 \times 300} \\ &= 4,065 \times 10^3 \text{ mol} \end{aligned}$$

Setelah bocor (2)

$$\begin{aligned} p_2 V_2 = n_2 RT &\Rightarrow n_2 = \frac{p_2 V_2}{RT} \\ &= \frac{8 \times 10.000}{0,082 \times 300} \\ &= 3,252 \times 10^3 \text{ mol} \end{aligned}$$

Gas hidrogen yang keluar:

$$\begin{aligned} n &= n_1 - n_2 \\ &= (4,065 - 3,252) \times 10^3 \\ &= 813 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{m}{M} \Rightarrow m = n \times M \\ &= 813 \times 2 \\ &= 1,626 \text{ gram} \end{aligned}$$

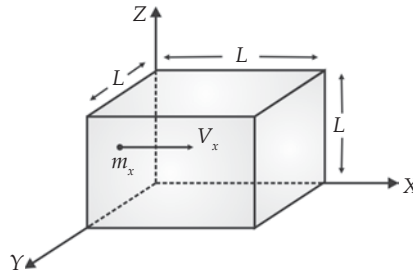
Jadi, banyaknya gas hidrogen yang keluar adalah 1,626 gram.

### Soal Kompetensi 8.1

1. Sebuah gelembung udara naik dari dasar danau ke permukaan. Suhu air di dasar dan di permukaan danau adalah sama, volume di permukaan dua kali volume di dasar danau, dan tekanan udara luar di permukaan danau 76 cm Hg. Hitunglah kedalaman danau tersebut, jika  $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{raksa}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$ !
2. Sebuah tabung udara yang berisi 20 kg udara pada tekanan 9 atm disimpan pada tempat yang suhunya  $6^\circ \text{C}$ . Ketika dipindahkan ke tempat lain yang suhunya  $37^\circ \text{C}$ , katup pengaman pada tabung bekerja dan membebaskan sejumlah udara. Jika katup mulai bekerja ketika tekanan udara dalam tabung melebihi 9 atm, maka tentukan massa udara yang keluar!

## D. Tekanan dan Tetapan Gas Ideal

Tekanan gas pada dinding bejana sama dengan besarnya momentum yang diberikan oleh molekul gas pada tiap satuan luas tiap satuan waktu. Untuk lebih jelasnya, perhatikan Gambar 8.4 berikut!



Gambar 8.4 Diagram gerakan molekul gas dalam dinding bejana berbentuk kubus.

Misalnya terdapat suatu molekul gas ideal yang berada dalam sebuah bejana berbentuk kubus dengan panjang sisi  $L$ . Molekul gas tersebut memiliki massa  $m$ , dan kecepatan terhadap sumbu  $X$  sebesar  $v_x$ . Sebelum molekul menumbuk dinding momentumnya  $m \times v_x$ . Setelah menumbuk dinding molekul berubah arahnya sehingga momentumnya menjadi  $-m \times v_x$ . Jadi, setiap kali molekul menumbuk dinding, molekul tersebut mengalami perubahan momentum sebesar selisih antara momentum sebelum tumbukan dan momentum setelah tumbukan. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_1 - p_2 \\ &= (m \times v_x) - (-m \times v_x) \\ &= 2 m v_x\end{aligned}$$

Molekul tersebut akan menumbak dinding untuk kedua kalinya setelah selang waktu

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x}$$

Sehingga momentum persatuan waktu yang diberikan oleh molekul ke dinding bejana adalah:

$$p_x = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\frac{2L}{v_x}} = \frac{2mv_x^2}{2L}$$

Sebaliknya, dinding akan mengalami momentum persatuan waktu yang sama besarnya tetapi berlawanan arahnya. Jika dalam bejana terdapat  $N$  molekul gas dengan kecepatan rata-rata  $v_x$ , maka besar momentum persatuan waktu yang diterima dinding adalah sebagai berikut.

$$p_x = \frac{Nm v_x^2}{L_x}$$

Diketahui bahwa molekul gas bergerak dalam tiga dimensi (ke segala arah). Sesuai dengan anggapan bahwa setiap molekul bergerak acak ke segala arah, maka rata-rata kecepatan kuadrat kelajuan pada arah sumbu  $X, Y$ , dan  $Z$  adalah sama besar ( $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ ). Jadi, resultan rata-rata kuadrat kecepatan ( $\overline{v^2}$ ) adalah sebagai berikut.

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2} \text{ atau } \overline{v^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$$

Oleh karena itu, besar momentum per satuan waktu yang diterima dinding bejana kubus dapat di tulis sebagai berikut.

$$p = \frac{Nm \left( \frac{1}{3} \overline{v^2} \right)}{L^3} = \frac{1}{3} \frac{Nm \overline{v^2}}{L^3}$$

Karena  $L^3$  merupakan volume kubus ( $V$ ), maka persamannya dapat ditulis:

$$p = \frac{1}{3} \frac{Nm \overline{v^2}}{V} \text{ atau } p = \frac{1}{3} m \overline{v^2} \left( \frac{N}{V} \right) \text{ atau } pV = \frac{1}{3} m \overline{v^2} N$$

Apabila dihubungkan dengan  $pV = N k T$ , maka persamaan berubah menjadi:

$$v = \sqrt{\frac{3 N k T}{N m}} = \sqrt{\frac{3 k T}{m}} \text{ atau } v = \sqrt{\frac{3 P V}{N m}}$$

Jika dihubungkan dengan energi kinetik rata-rata ( $E_k = \frac{1}{2} m v^2$ ), maka persamaan menjadi:

$$p = \frac{2}{3} E_k \left( \frac{N}{V} \right) \text{ atau } p V = \frac{2}{3} E_k N$$

Keterangan:

$p$  : tekanan gas ( $\text{Nm}^{-2}$ )

$N$  : jumlah molekul

$v$  : kecepatan ( $\text{m/s}$ )

$m$  : massa molekul ( $\text{kg}$ )

$V$  : volume gas ( $\text{m}^3$ )

$E_k$  : energi kinetik ( $\text{J}$ )

## E. Suhu dan Energi Kinetik Gas Ideal

Telah Anda ketahui bahwa  $p V = \frac{2}{3} E_k N$ . Jika dihubungkan dengan persamaan  $p V = n R T$ , maka dapat diperoleh persamaan berikut.

$$n R T = \frac{2}{3} E_k N \text{ atau } T = \frac{2 N E_k}{3 n R}$$

Jika dihubungkan dengan persamaan  $p V = N k T$ , maka diperoleh persamaan:

$$N k T = \frac{2}{3} E_k N \text{ atau } E_k = \frac{3}{2} k T \text{ atau } T = \frac{2 E_k}{3 k} \text{ (untuk } N = 1 \text{)}$$

### Contoh 8.2

Diketahui di dalam sebuah bejana yang memiliki volume  $1 \text{ m}^3$  berisi 10 mol gas monoatomik dengan energi kinetik molekul rata-rata  $1,5 \times 10^{-20}$  Joule (bilangan Avogadro  $6,02 \times 10^{23}$  molekul/mol). Tentukan tekanan gas dalam bejana!

- Diketahui : a.  $V = 1 \text{ m}^3$   
 b.  $n = 10 \text{ mol}$   
 c.  $E_k = 1,5 \times 10^{-20} \text{ J}$   
 d.  $N_a = 6,02 \times 10^{23} \text{ molekul/mol}$

Ditanyakan:  $p = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} N &= n \times N_a \\ &= 10 \times (6,02 \times 10^{23}) \\ &= 60,2 \times 10^{23} \text{ molekul} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p &= \frac{2}{3} E_k \left( \frac{N}{V} \right) \\ &= \frac{2}{3} (1,5 \times 10^{-20}) \left( \frac{60,2 \times 10^{23}}{1} \right) \\ &= 6,02 \times 10^4 \text{ Nm}^{-2} \end{aligned}$$

Jadi, besarnya tekanan gas dalam bejana adalah  $6,02 \times 10^4 \text{ Nm}^{-2}$ .



## Kegiatan 8.1

### Tumbukan Antarmolekul

#### A. Tujuan

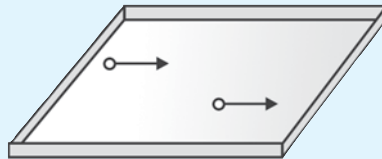
Anda dapat menjelaskan tumbukan antarmolekul gas.

#### B. Alat dan Bahan

- Papan datar yang ada pembatasnya
- Beberapa kelereng

#### C. Langkah Kerja

- Sediakan beberapa butir kelereng dan sebuah papan datar yang tepinya diberi pembatas!
- Letakkan 2 butir kelereng pada papan tersebut kemu-dian goyangkan. Amati Bagaimana kelakuan kelereng pada saat membentur tepi papan atau sesama kelereng!
- Ulangi langkah nomor dua dengan menggunakan kelereng yang lebih banyak!



4. Berdasarkan hasil pengamatan Anda, manakah yang lebih banyak, kelereng menumbuk tepi papan atau tumbukan antarkelereng?
5. Jika papan tersebut digoyangkan lebih cepat lagi apa yang terjadi?
6. Apa kesimpulan Anda?

## F. Kecepatan Efektif Gas Ideal

Karena molekul-molekul gas tidak seluruhnya bergerak dalam kecepatan yang sama, maka Anda perlu mendefinisikan arti  $\overline{v^2}$ . Misalnya, di dalam sebuah bejana tertutup terdapat  $N_1$  molekul yang bergerak dengan kecepatan  $v_1$ ,  $N_2$  molekul yang bergerak dengan kecepatan  $v_2$ , dan seterusnya, maka rata-rata kuadrat kecepatan molekul gas ( $\overline{v^2}$ ) dapat dinyatakan melalui persamaan berikut.

$$\overline{v^2} = \frac{N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + N_3 v_3^2 + \dots + N_i v_i^2}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_i} = \frac{\sum N_i v_i^2}{\sum N_i}$$

Kecepatan efektif  $v_{rms}$  (rms = *root mean square*) didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat kecepatan.

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} \text{ atau } \overline{v^2} = v_{rms}^2$$

Mengingat bahwa  $\overline{E_k} = \frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{1}{2} m v_{rms}^2$ , maka persamaan dapat ditulis menjadi:

$$\frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{3}{2} kT \text{ atau } v_{rms}^2 = \frac{\sqrt{3kT}}{m}$$

Karena  $k = \frac{R}{N_a}$  dan  $m = \frac{M_r}{N_a}$ , maka persamaannya menjadi:

$$v_{rms}^2 = \frac{\sqrt{3RT}}{M_r}$$



Mengingat bahwa massa jenis  $\rho = \frac{m}{V}$ , maka persamaan tekanan gas dan kecepatan efektifnya dapat ditulis menjadi:

$$p = \frac{1}{3} \frac{m}{V} v_{rms}^2 = \frac{1}{3} \rho v_{rms}^2 \text{ dan } v_{rms} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$$

### Contoh 8.3

Di angkasa luar terdapat kira-kira 1 atm hidrogen tiap  $\text{cm}^3$  dengan suhu 3,5 K. Jika massa atom hidrogen adalah 1 g/mol, tentukanlah kecepatan efektif dan tekanan udara pada tempat tersebut!

Diketahui : a.  $N = 1$  atom  
 b.  $V = 1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$   
 c.  $T = 3,5 \text{ K}$   
 d.  $A_r H = 1 \text{ g/mol} = 1 \text{ kg/k mol}$   
 e.  $R = 8,31 \times 10^3 \text{ J/k mol K}$

Ditanyakan : a.  $v_{rms} = \dots ?$   
 b.  $p = \dots ?$

Jawab:

a. Kecepatan efektif

$$\begin{aligned} v_{rms} &= \frac{\sqrt{3RT}}{M_r} \\ &= \frac{\sqrt{3(8,31 \times 10^3)(3,5)}}{1} \\ &= 295,4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b. Tekanan udara

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{3} \frac{m}{V} v_{rms}^2 \\ &= \frac{1}{3} \frac{NA_r}{VN_A} v_{rms}^2 \\ &= \frac{1}{3} \frac{(1)(1)(295)^2}{(10^{-6})(6,02 \times 10^{23})} \\ &= 4,83 \times 10^{-17} \text{ Pa} \end{aligned}$$

### Soal Kompetensi 8.2

1. Pada teori kinetik gas ideal berlaku hukum II dan III Newton, jelaskan!
2. Buatlah 10 rumus atau persamaan yang berbeda dengan menggunakan persamaan-persamaan pada gas ideal!
3. Sebuah tangki dengan volume  $0,5 \text{ m}^3$  mengandung 4 mol gas neon pada suhu  $27^\circ \text{C}$ . Hitunglah energi kinetik total gas neon dan energi kinetik rata-rata setiap molekul gas!
4. Energi kinetik rata-rata sebuah molekul gas monoatomik yang berada dalam tangki bervolume 30 liter dengan tekanan 1 atm adalah  $2,52 \times 10^{-21}$  Joule. Berapa mol gas yang berada dalam tangki tersebut?

## G. Derajat Kebebasan dan Teorema Ekipartisi Energi

Berdasarkan hasil analisis mekanika statistik, untuk sejumlah besar molekul yang memenuhi hukum gerak Newton pada suatu sistem dengan suhu mutlak  $T$ , maka energi yang tersedia terbagi merata pada setiap derajat

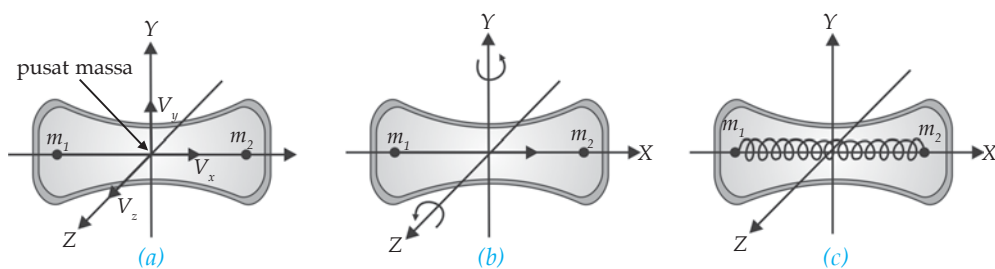
kebebasan sebesar  $\frac{1}{2}kT$ . Pernyataan ini selanjutnya disebut *teorema ekipartisi energi*. Derajat kebebasan yang dimaksud dalam teorema ekipartisi energi adalah setiap cara bebas yang dapat digunakan oleh partikel untuk menyerap energi. Oleh karena itu, setiap molekul dengan  $f$  derajat kebebasan akan memiliki energi rata-rata.

$$E = f\left(\frac{1}{2}kT\right)$$

Pada molekul gas monoatomik atau beratom tunggal, molekul melakukan gerak translasi sehingga energi yang ada masing-masing digunakan untuk gerak translasi pada arah sumbu  $X$ ,  $Y$ , dan  $Z$

$\left(\frac{1}{2}mv_x^2, \frac{1}{2}mv_y^2, \text{ dan } \frac{1}{2}mv_z^2\right)$ . Oleh karena itu, molekul gas monoatomik dikatakan memiliki tiga derajat kebebasan.

Untuk molekul gas diatomik atau beratan dua, di samping melakukan gerak translasi, molekul juga melakukan gerak rotasi dan vibrasi. Perhatikan Gambar 8.5 berikut!



Gambar 8.5 (a) Gerak translasi, (b) Gerak rotasi, (c) Gerak vibrasi

Dalam model yang melibatkan gerak translasi dan rotasi, molekul gas diatomik digambarkan sebagai dua buah bola yang dihubungkan oleh batang. Pusat massa molekul melakukan gerak translasi dengan komponen

energi kinetik pada arah sumbu  $X$ ,  $Y$ , dan  $Z$  ( $\frac{1}{2}mv_x^2$ ,  $\frac{1}{2}mv_y^2$ , dan  $\frac{1}{2}mv_z^2$ ),

sehingga memiliki tiga derajat kebebasan. Molekul juga dapat melakukan gerak rotasi terhadap sumbu  $X$ ,  $Y$ , dan  $Z$  dengan energi kinetik rotasi masing-

masing  $E_{kx} = \frac{1}{2}I_x\omega^2$ ,  $E_{ky} = \frac{1}{2}I_y\omega^2$ , dan  $E_{kz} = \frac{1}{2}I_z\omega^2$ . Namun, karena kedua

atom merupakan massa titik dengan batang penghubung terletak pada sumbu  $X$  sebagai proses, maka momen inersia terhadap sumbu  $X$ , yaitu  $I_x = 0$ .

Akibatnya energi kinetik rotasi terhadap sumbu  $X$  yaitu  $E_{kx} = \frac{1}{2}I_x\omega^2 = 0$ .

Oleh karena itu, gerak rotasi hanya memiliki dua komponen energi kinetik yaitu  $E_{ky}$  dan  $E_{kz}$ . Hal ini menunjukkan bahwa gerak rotasi molekul hanya memiliki dua derajat kebebasan.

## H. Energi Dalam pada Gas Ideal

Energi dalam suatu gas atau sering diberikan notasi  $U$ , merupakan jumlah energi kinetik total dari seluruh molekul gas dalam suatu ruangan.

$$U = E_{k1} + E_{k2} + \dots + E_{kn}$$

$$U = N\bar{E} = \frac{NfkT}{2} = \frac{nfRT}{2}$$

Keterangan:

$U$  : energi dalam gas (J)

$f$  : derajat kebebasan

$T$  : suhu mutlak (K)

$N$  : banyaknya molekul

$k$  : tetapan Boltzman

$R$  : tetapan umum gas

Berdasarkan rumus di atas, besar energi dalam tergantung dari jumlah molekul, suhu gas, serta jenis gas apakah monoatomik, diatomik, atau triatomik.

1. Gas monoatomik ( $f = 3$ ) seperti He, Ne, dan Ar.

$$U = N\bar{E} = N\bar{E}_k = \frac{3}{2} NkT$$

2. Gas diatomik seperti H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>.

Pada suhu rendah ( $T = \pm 250$  K),  $f = 3$ , maka  $U = N\bar{E} = N\bar{E}_k = \frac{3}{2} NkT$

Pada suhu sedang ( $T = \pm 500$  K),  $f = 5$ , maka  $U = N\bar{E} = N\bar{E}_k = \frac{5}{2} NkT$

Pada suhu tinggi ( $T = \pm 1000$  K),  $f = 7$ ,  $U = N\bar{E} = N\bar{E}_k = \frac{7}{2} NkT$

#### Contoh 8.4

Gas He ( $Mr = 4$  g/mol) pada suhu 27° C dan volume 1 liter massanya 8 gram. Tentukan energi dalam gas! ( $R = 8,31$  J/mol K).

Diketahui : a.  $m = 8$  g  
 b.  $Mr = 4$  g/mol  
 c.  $T = 273 + 27 = 300$  K  
 d.  $R = 8,31$  J/mol K

Ditanyakan :  $U = \dots$ ?

Jawab:

Gas He merupakan gas monoatomik sehingga derajat kebebasannya  $f = 3$ .

$$n = \frac{m_{gas}}{Mr}$$

$$= \frac{8}{4}$$

$$= 2 \text{ mol}$$

$$U = \frac{nfRT}{2}$$

$$= \frac{2 \times 3 \times 8,31 \times (273 + 27)}{2}$$

$$= 7,479 \text{ J}$$

### Soal Kompetensi 8.3

1. Sebuah tabung berisi 0,04 mol gas yang suhunya 400 K. Jika derajat kebebasan gas pada suhu ini adalah 5 dan konstanta Boltzmann sebesar  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/k, maka tentukan energi dalam gas tersebut!
2. Sebuah molekul gas pada permukaan bumi kecepatan efektifnya sama dengan kecepatan efektif gas pada  $0^\circ\text{C}$ . Seandainya molekul ini dapat bergerak ke atas secara tegak lurus tanpa bertumbukan dengan molekul lain, maka hitunglah ketinggian yang dapat dicapai!



### Rangkuman

1. Persamaan gas ideal secara umum dirumuskan sebagai berikut.  
 $pV = nRT$  atau  $pV = NkT$ .
2. Keadaan standar yaitu keadaan gas pada tekanan 1 atmosfer dan suhu  $0^\circ\text{C}$ . 1 mol gas pada keadaan standar mempunyai volume 22,4 liter.

3. Persamaan hukum Boyle-Gay Lussac  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ .

4. Hubungan antara suhu, tekanan, dan energi pada suatu gas dapat diterangkan secara matematis menggunakan teori kinetik gas.

Hubungan ketiga besaran teori tersebut adalah  $pV = \frac{2}{3} NE_k$ ,

$$pV = \frac{1}{3} Nmv^2, \text{ dan } T = \frac{2}{3} \frac{E_k}{k}.$$

5. Persamaan kelajuan efektif adalah

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}.$$

6. Menurut prinsip ekipartisi energi, energi gas didistribusikan secara merata pada setiap derajat kebebasan. Setiap derajat kebebasan

besarnya  $\frac{1}{2} kT$ .

7. Untuk gas monoatomik terdapat 3 derajat kebebasan yang terdistribusi atas 3 energi translasi ke arah sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z.

8. Untuk gas diatomik pada suhu rendah terdapat 5 derajat kebebasan yang terdiri atas 3 energi translasi dan 2 energi rotasi sehingga

$$E_k = \frac{5}{2}kT.$$

9. Untuk gas poliatomik pada suhu rendah terdapat 7 derajat kebebasan yang terdiri atas 3 energi translasi, 4 energi rotasi, dan 2 energi vibrasi sehingga  $E_k = \frac{7}{2}kT$ .

### Kolom Ilmuwan

Aplikasi persamaan umum gas ideal, antara lain, pada saat terjadi proses pernapasan, naiknya gelembung-gelembung udara pada zat cair, dan kantong udara pengaman pada mobil. Sekarang buatlah artikel mengenai aplikasi teori ini. Anda dapat mengambil salah satu contoh di atas atau mencari aplikasi yang lain. Buku, majalah, atau artikel di internet dapat Anda jadikan rujukan. Kumpulkan artikel Anda di meja guru!

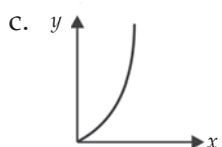
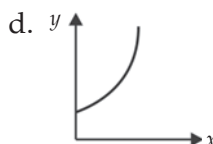
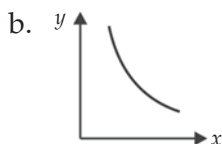
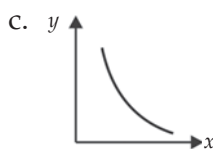
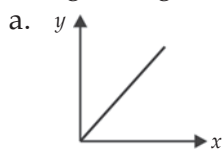
## P e l a t i h a n

### A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, dan e di dalam buku tugas Anda!

1. 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. Besar momentum rata-rata molekul kedua gas adalah  $p_A$  dan  $p_B$  akan berkaitan satu sama lain menurut rumus ....

- |   |  |
|---|--|
| a. $p_A = p_B$                                    | d. $p_A = \left(\frac{M_A}{M_B}\right)p_B$ |
| b. $p_A = \sqrt{\left(\frac{M_A}{M_B}\right)}p_B$ | e. $p_A = \left(\frac{M_B}{M_A}\right)p_B$ |
| c. $p_A = \sqrt{\left(\frac{M_B}{M_A}\right)}p_B$ |  |

2. Grafik antara tekanan gas  $y$  yang massanya tertentu pada volume tetap sebagai fungsi dari suhu mutlak  $x$  adalah ....



3. Jika suatu gas ideal dimampatkan secara isotermik sampai volumenya menjadi setengahnya, maka ....

- tekanan dan suhu tetap
- tekanan menjadi dua kali dan suhu tetap
- tekanan tetap dan suhu menjadi dua kalinya
- tekanan menjadi dua kalinya dan suhu menjadi setengahnya
- tekanan dan suhu menjadi setengahnya

4. Sejumlah gas ideal menjalani proses isobarik sehingga suhu kelvinnya menjadi 2 kali semula, maka volumenya menjadi  $n$  kali semula. Nilai  $n$  adalah ....

- 4
- 3
- 2
- $\frac{1}{2}$
- $\frac{1}{4}$

5. Bila sejumlah gas yang massanya tetap ditekan pada suhu tetap, maka molekul-molekul gas tersebut akan ....

- mempunyai energi kinetik lebih besar
- mempunyai momentum lebih besar
- lebih sering menumbuk dinding tempat gas
- bergerak lebih cepat
- bergerak lebih lambat

6. Jika suhu gas ideal dalam ruangan tertutup dinaikkan menjadi 4 kali suhu semula, maka kecepatan gerak molekul-molekulnya menjadi ....

- $\frac{1}{4}$  kali semula
- $\frac{1}{2}$  kali semula
- 2 kali semula
- 4 kali semula
- 16 kali semula

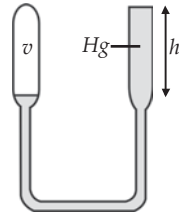
7. Sebuah tabung gas dengan volume tertentu berisi gas ideal dengan tekanan  $p$ . Akar nilai rata-rata kuadrat kelajuan molekul gas disebut  $v_{rms}$ . Jika ke dalam tabung tersebut dipompakan gas sejenis, sehingga tekanannya menjadi  $2p$  sedangkan suhunya dibuat tetap, maka  $v_{rms}$ -nya menjadi ....
- $\frac{v_{rms}}{2}$
  - $v_{rms}$
  - $\sqrt{2}v_{rms}$
  - $2v_{rms}$
  - $4v_{rms}$
8. Bila dalam ruang tertutup gas dipanaskan sampai suhu  $T$  K, maka ....
- energi potensial molekul makin kecil
  - energi kinetik molekul-molekul tersebut adalah  $\frac{2}{3}NkT$
  - energi kinetik molekul-molekul tersebut adalah  $\frac{3}{2}NkT$
  - volume gas selalu akan bertambah, karena gas akan memuai
  - tekanan gas besarnya tetap
9. Sebuah tabung berisi udara pada tekanan 0,5 atm dalam keadaan tertutup. Kemudian tabung dibuka sehingga berhubungan dengan udara luar (anggap suhu tidak berubah), maka ....
- udara keluar dari dalam tabung sebanyak 25% dari volume semula
  - udara luar masuk ke dalam tabung sebanyak 25 % dari volume tabung
  - udara keluar dari dalam tabung sebanyak 50% dari volume semula
  - udara luar masuk ke dalam tabung sebanyak 50% dari volume tabung
  - volume udara dalam tabung menjadi dua kali semula
10. Suatu gas ideal pada suhu 300 K dipanaskan pada volume tetap sehingga energi kinetik rata-rata dari molekul gas menjadi dua kali lipat. Pernyataan berikut yang benar adalah ....
- kecepatan "rms" rata-rata dari molekul menjadi dua kali
  - suhu berubah menjadi 600 K
  - momentum rata-rata dari molekul menjadi dua kali
  - suhu berubah menjadi  $300\sqrt{2}$  K
  - kecepatan rata-rata molekul menjadi dua kali

**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

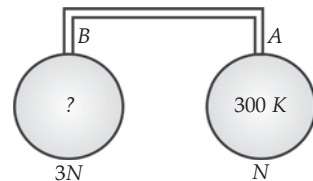
- Helium (He), suatu gas monoatomik, mengisi bejana bervolume  $0,01 \text{ m}^3$ . Tekanan gas adalah  $6,2 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Berapa lama sebuah mesin 200 W harus bekerja untuk menghasilkan jumlah energi yang sama dengan energi dalam gas tersebut?



2. Perhatikan gambar di samping! Berdasarkan eksperimen hukum Boyle diperoleh data sebagai berikut; ketika  $h = 50$  mm,  $V = 18 \text{ cm}^3$  dan ketika  $h = 150$  mm,  $V = 16 \text{ cm}^3$ . Hitunglah besar tekanan udara luar dalam (mmHg)!



3. Sebuah tabung yang volumenya 1 liter mempunyai lubang yang memungkinkan udara keluar dari tabung. Mula-mula suhu udara dalam tabung  $27^\circ \text{C}$ , kemudian tabung dipanaskan hingga suhunya  $127^\circ \text{C}$ . Hitunglah perbandingan antara massa gas yang keluar dari tabung dan massa awalnya!
4. Sebuah ban sepeda mempunyai volume  $100 \text{ cm}^3$ . Tekanan awal dalam ban sepeda adalah  $0,5 \text{ atm}$ . Ban tersebut dipompa dengan suatu pompa yang volumenya  $50 \text{ cm}^3$ . Jika tekanan udara luar  $76 \text{ cm}$  air raksa dengan menganggap temperatur tidak berubah, maka berapa tekanan ban sepeda setelah dipompa 4 kali?
5. Pada keadaan normal ( $T = 0^\circ \text{C}$  dan  $p = 1 \text{ atm}$ ), hitunglah volume 4 gram gas oksigen  $\text{O}_2$  (berat molekul  $M = 32$ ,  $R = 8314 \text{ J/kmol K}$ ,  $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$ )!
6. Sejumlah gas ideal menjalani proses isobarik sehingga volumenya menjadi 3 kali semula. Hitunglahnya suhu gas tersebut sekarang!
7. Massa jenis suatu gas ideal pada suhu  $T$  dan tekanan  $p$  adalah  $\rho$ . Jika tekanan gas tersebut dijadikan  $2p$  dan suhunya diturunkan menjadi  $0,5 T$ , maka tentukan massa jenis gas dalam keadaan terakhir ini!
8. Massa sebuah molekul nitrogen adalah empat belas kali massa sebuah molekul hidrogen. Jika molekul-molekul nitrogen berada pada suhu  $294 \text{ K}$ , maka hitunglah suhu molekul-molekul hidrogen agar mempunyai kelajuan rata-rata yang sama!
9. Pada suatu temperatur tertentu, kecepatan "rms" suatu gas ideal adalah  $v$ . Jika pada tekanan konstan volume gas diekspansikan menjadi dua kali semula, maka hitunglah kecepatan "rms" molekul gas ideal tersebut!
10. Perhatikan gambar di samping! Diketahui volume tabung B dua kali volume tabung A. Keduanya terisi gas ideal. Volume tabung penghubung dapat diabaikan. Gas A berada pada suhu  $300 \text{ K}$ . Bila jumlah molekul dalam A adalah  $N$  dan jumlah molekul B adalah  $3N$ , maka Hitunglah suhu gas dalam B!



# Bab

# IX

## Termodinamika



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan hukum termodinamika.



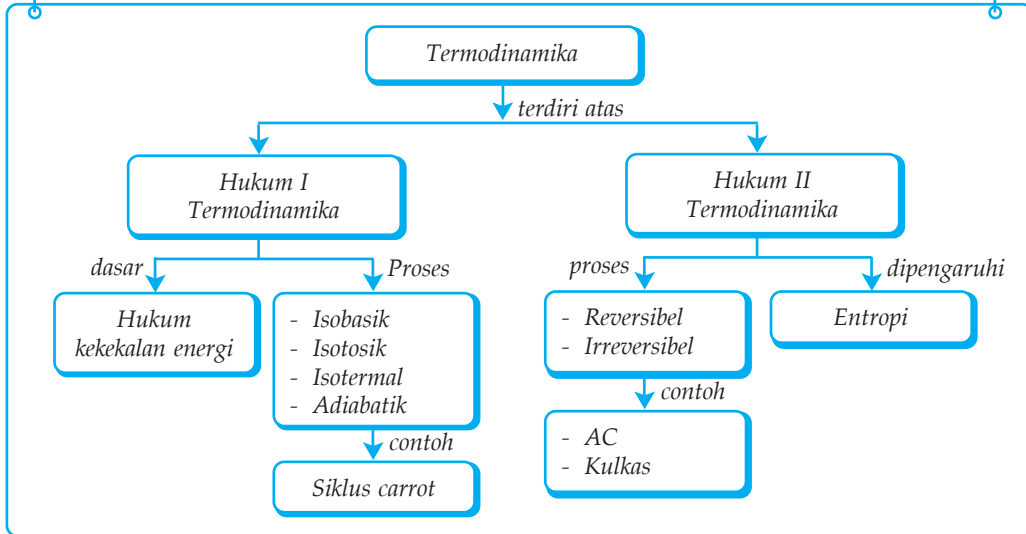
Sumber: Pembakaran dan Peleburan, Mandira Jaya Abadi & Clip art

Hukum II termodinamika mengisyaratkan kepada Anda bahwa lebih mudah menghancurkan sesuatu daripada membangun. Gedung misalnya, untuk menghancurkannya Anda hanya memerlukan waktu dalam hitungan detik. Sebaliknya, untuk membangun sebuah gedung diperlukan waktu sehari-hari, bahkan terkadang sampai beberapa tahun.

### Kata Kunci

- |                    |                    |                          |
|--------------------|--------------------|--------------------------|
| • Usaha            | • Proses Isokorik  | • Hukum I Termodinamika  |
| • Entropi          | • Proses Adiabatik | • Hukum II Termodinamika |
| • Proses Isobarik  | • Tetapan Laplace  | • Mesin Pendingin        |
| • Proses Ekspansi  | • Energi Dalam     | • Efisiensi Mesin Carnot |
| • Proses Isotermal | • Kapasitas Kalor  | • Siklus Carnot          |

## Peta Konsep



Sewaktu di SMP Anda sudah mempelajari tentang kalor atau panas. Energi kalor tidak hanya sebatas dapat digunakan untuk menaikkan suhu benda, mengubah ukuran benda, ataupun mengubah wujud benda. Energi kalor dapat digunakan untuk banyak hal. Misalnya, untuk menghasilkan tenaga pada mesin-mesin kalor seperti mesin diesel, otto, dan rankine. Jika kalor dipaksa mengalir dari suhu rendah ke suhu tinggi, maka tempat yang bersuhu rendah makin lama makin “dingin”. Prinsip ini dipakai pada mesin pendingin seperti AC dan kulkas.

Pada kehidupan sehari-hari Anda tentu banyak menemui peralatan yang menerapkan konsep termodinamika. Misalnya, radiator yang tersimpan pada setiap mesin mobil merupakan alat termodinamika yang dapat menyerap panas yang cukup tinggi. Bayangkan bila mobil tidak memakai pendingin radiator, mungkin dalam waktu relatif singkat mobil tersebut akan terbakar habis.

Termodinamika merupakan salah satu cabang ilmu fisika yang memusatkan perhatian pada energi (terutama energi panas) dan transformasinya. Transformasi energi pada termodinamika berlandaskan pada dua hukum, yaitu hukum pertama termodinamika yang merupakan pernyataan lain dari hukum kekekalan energi dan hukum kedua termodinamika yang memberi batasan apakah suatu proses dapat berlangsung atau tidak.

Sebelum menggunakan hukum-hukum termodinamika Anda perlu mendefinisikan terlebih dahulu sistem dan lingkungan. *Sistem* adalah suatu benda atau keadaan yang menjadi pusat perhatian. Sedangkan *lingkungan* merupakan segala sesuatu di luar sistem yang dapat memengaruhi keadaan sistem secara langsung. Apabila antara sistem dan lingkungan memungkinkan terjadinya pertukaran materi dan energi, maka sistemnya disebut *sistem terbuka*.

Jika hanya terbatas pada pertukaran energi disebut *sistem tertutup*. Sedangkan jika pertukaran materi maupun energi tidak mungkin terjadi, maka disebut *sistem terisolasi*. Sistem dan lingkungan dinamakan *semesta*.

## A. Usaha dan Proses Termodinamika

Sampai permulaan abad sembilan belas, kalor dianggap sebagai zat alir atau kalori yang terdapat pada setiap benda. Benda yang panas dianggap mempunyai kalori yang lebih banyak daripada benda yang bersuhu rendah. Benyamin Thomson, seorang Amerika yang kemudian berganti nama menjadi Count Rumford, merupakan orang pertama yang membuktikan bahwa kalor tidak mungkin merupakan zat. Ketika melakukan pemboran meriam, ia mengamati suatu fakta bahwa meskipun mata bor telah tumpul sehingga tidak dapat mengebor lagi, air yang digunakan untuk pendingin tetap mendidih. Ia menarik kesimpulan bahwa gesekan antara air dan bor dapat menimbulkan kalor atau panas. Artinya, panas atau kalor adalah bentuk energi, bukan zat alir seperti yang dipahami sebelumnya.

Sekitar tahun 1850, James Prescott Joule melakukan percobaan untuk mengukur kesetaraan antara kalor dan energi mekanik. Berdasarkan percobaan tersebut diperoleh nilai antara kalori dan joule, yaitu 1 kalori setara dengan 4,18 joule atau 1 joule setara 0,24 kalori.

Energi selalu berkaitan dengan usaha. Telah Anda ketahui bahwa usaha merupakan hasil perkalian gaya dengan perpindahan ( $W = F \times s$ ). Perhatikan Gambar 9.1 berikut!

Gambar 9.1 memperlihatkan penampang gas silinder yang didalamnya terdapat piston (penghisap). Piston ini dapat bergerak bebas naik turun. Jika luas piston  $A$  dan tekanan gas  $p$ , maka gas akan mendorong piston dengan gaya  $F = p \times A$ . Oleh karena itu, usaha yang dilakukan gas adalah sebagai berikut.

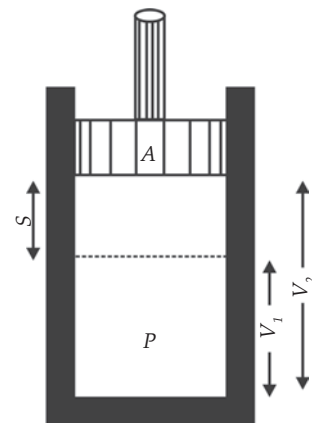
$$W = F \times \Delta s$$

Jika  $F = p \times A$ , maka

$$W = p \times A \times \Delta s$$

Jika  $\Delta s = \frac{\Delta V}{A}$ , maka

$$W = p \times \Delta V \text{ atau } W = p (V_2 - V_1)$$



Gambar 9.1 Percobaan kalor dan usaha.

Keterangan:

$W$  : usaha (J)

$p$  : tekanan tetap ( $\text{N/m}^2$ )

$V_1$  : volume awal ( $\text{m}^3$ )

$V_2$  : volume akhir ( $\text{m}^3$ )

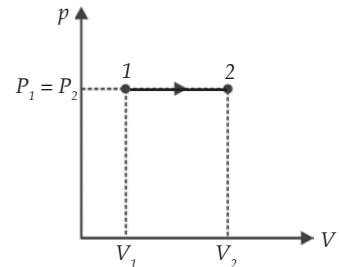
Gas dalam ruang tertutup dapat mengalami beberapa proses yaitu proses isobarik, proses isothermal, proses isokori, dan proses adiabatik.

## 1. Proses Isobarik

Proses yang berlangsung pada tekanan tetap dinamakan *proses isobarik*. Bila volume gas bertambah, berarti gas melakukan usaha atau usaha gas positif (proses ekspansi). Jika volume gas berkurang, berarti pada gas dilakukan usaha atau usaha gas negatif (proses kompresi). Usaha yang dilakukan oleh gas pada proses isobarik besarnya sebagai berikut

$$W = p \times \Delta V \text{ atau } W = p (V_2 - V_1)$$

Usaha yang dilakukan gas terhadap lingkungannya atau kebalikannya sama dengan luas daerah bawah grafik tekanan terhadap volume (grafik  $p - V$ ). Perhatikan Gambar 9.2!



Gambar 9.2 Proses Isobarik

## 2. Proses Isothermal

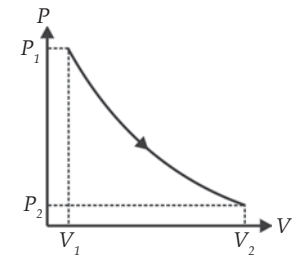
*Proses isothermal* adalah proses yang dialami gas pada suhu tetap. Usaha yang dilakukan gas pada proses ini tidak dapat dihitung dengan persamaan  $W = p \times \Delta V$ . Hal ini dikarenakan tekanannya tidak konstan. Namun, dapat diselesaikan dengan melakukan pengintegralan sebagai berikut.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Ingat  $p = \frac{nRT}{V}$ , maka  $W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV$

karena  $n$ ,  $R$ , dan  $T$  konstan, maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$\begin{aligned} W &= nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \\ &= nRT [\ln V]_{V_1}^{V_2} \\ &= nRT [\ln V_2 - \ln V_1] \end{aligned}$$



Gambar 9.3 Proses Isothermal

$$W = nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

### Contoh 9.1

Lima mol suatu gas ideal suhunya  $27^\circ \text{C}$  memuai secara isothermal dari  $0,5 \text{ m}^3$  menjadi  $1 \text{ m}^3$ . Tentukan usaha yang dilakukan oleh gas jika menggunakan tetapan gas umum  $R = 8,31 \text{ J/mol K}$

- Diketahui : a.  $n = 5 \text{ mol}$   
 b.  $T = 27 + 273 = 300 \text{ K}$   
 c.  $V_1 = 0,5 \text{ m}^3$   
 d.  $V_2 = 1 \text{ m}^3$

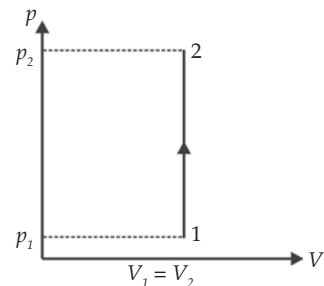
Ditanyakan :  $W = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} W &= nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \\ &= 5 \times 8,31 \times 300 \times \ln \frac{1}{0,5} \\ &= 5184 \text{ J} \end{aligned}$$

### 3. Proses Isokorik

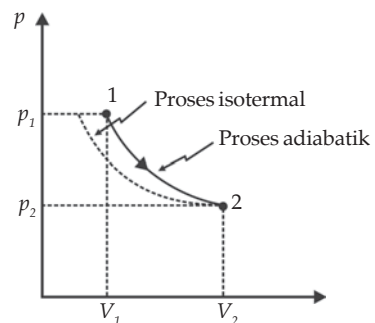
*Proses isokorik* adalah proses yang dialami oleh gas di mana gas tidak mengalami perubahan volume atau volume tetap ( $\Delta V = 0$ ). Oleh karena itu, usaha yang dilakukan gas pada proses isokorik adalah nol ( $W = p \times 0 = 0$ ).



Gambar 9.4 Proses Isokorik

### 4. Proses Adiabatik

Pada proses isobarik, isothermal, dan isokorik dipengaruhi oleh lingkungan yaitu menerima atau melepaskan kalor. *Proses adiabatik* merupakan proses yang tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem (gas) ke lingkungan ( $\Delta Q = 0$ ). Hal ini dapat terjadi apabila terdapat sekat yang tidak menghantarkan kalor atau prosesnya berlangsung cepat. Pada proses adiabatik berlaku rumus Poisson.



Gambar 9.5 Proses Adiabatik

$$pV^\gamma = \text{Konstan}$$

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

Dengan  $\gamma$  merupakan perbandingan kalor jenis gas pada tekanan tetap ( $C_p$ ) dan kalor jenis gas pada volum tetap ( $C_v$ ). Selanjutnya, perbandingan ini dinamakan tetapan Laplace.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Untuk gas ideal,  $p = \frac{nRT}{V}$ , sehingga persamaan adiabatik di atas dapat ditulis dalam bentuk:

$$\begin{aligned} p_1 V_1^\gamma &= p_2 V_2^\gamma \\ \frac{nRT_1}{V_1} V_1^\gamma &= \frac{nRT_2}{V_2} V_2^\gamma \end{aligned}$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

Adapun usaha pada proses adiabatik dapat dicari dengan cara sebagai berikut.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Karena  $p = CV^{-\gamma}$ , maka

$$W = \int_{V_1}^{V_2} CV^{-\gamma} dV = \frac{C}{1-\gamma} V^{1-\gamma} \Big|_{V_1}^{V_2} = \frac{C}{1-\gamma} V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}$$

Karena  $C = p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$ , maka

$$W = \frac{1}{1-\gamma} (p_2 V_2^\gamma V_2^{1-\gamma} - p_1 V_1^\gamma V_1^{1-\gamma})$$

$$W = \frac{1}{1-\gamma} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

Pada bab VIII Anda telah membahas mengenai energi dalam gas monoatomik. Anda juga mengetahui bahwa  $U = \frac{3}{2} nRT$ , maka

$\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1)$ . Oleh karena itu, usaha yang dilakukan oleh sistem pada proses adiabatik dapat juga dituliskan:

$$W = -\Delta U = \frac{3}{2}nR(T_1 - T_2)$$

### Contoh 9.2

Hitunglah usaha yang dilakukan 2 mol gas ideal monoatomik pada gas ideal jika volume akhirnya menjadi  $\frac{1}{2}$  volume semula, dan suhu akhir menjadi 600 K! (Tetapan Laplace ( $\gamma$ ) = 1,2)

Diketahui : a.  $T_2 = 600$  K  
 b.  $n = 2$  mol  
 c.  $R = 8,31$  J/mol K  
 d.  $V_2 = 0,5 V_1$   
 e.  $\gamma = 1,2$

Ditanyakan :  $W = \dots$ ?

Jawab:

$T_1$  dicari dengan persamaan persamaan Poisson

$$\begin{aligned} T_1 V_1^{\gamma-1} &= T_2 V_2^{\gamma-1} \\ \Rightarrow T_1 &= T_2 \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \\ &= 600 \left( \frac{\frac{1}{2} V_1}{V_1} \right)^{(1,2)-1} \\ &= 522,3 \text{ K} \end{aligned}$$

Usaha pada proses adiabatik untuk gas ideal monoatomik

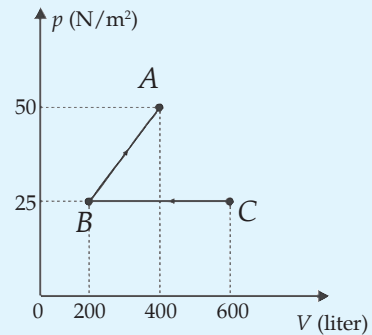
$$\begin{aligned} W &= \frac{3}{2}nR(T_1 - T_2) \\ &= \frac{3}{2} \times 2 \times 8,31 \times (600 - 522,3) \\ &= 1.936 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, besarnya usaha yang dilakukan adalah 1.936 J.



### Soal Kompetensi 9.1

1. Jelaskan jika pada proses isobarik berlaku hukum Gay Lussac!
2. Jelaskan jika pada proses isothermal berlaku hukum Boyle!
3. Jelaskan jika proses isokorik berlaku hukum Gay Lussac!
4. Suatu tabung tertutup yang volumenya 600 liter berisi gas bertekanan 6 atm. Hitunglah usaha yang dilakukan oleh gas jika gas memuai pada tekanan tetap sehingga volumenya 3 kali volum semula dan jika gas dimampatkan pada tekanan tetap sehingga volumenya menjadi setengah kali semula ( $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ pa}$ )!
5. Perhatikan gambar diagram di samping! Tentukanlah usaha yang dilakukan oleh gas untuk proses ABC!



### T o k o h

#### Lord William Thomson Kelvin (1824 - 1907)



Sumber: 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005

William Thomson Kelvin adalah ahli fisika, ahli matematika, penemu (memiliki 70 hak paten), guru besar, pengarang, dan presiden Royal Society. Ia lahir di Belfast, Irlandia, pada tanggal 26 Juni 1824. Gelar bangsawan Lord ia peroleh dari Ratu Victoria.

Karena kecerdasannya, pada usia 10 tahun Thomson sudah masuk universitas. Usia 15 tahun, ia mendapat medali emas karena karangannya yang berjudul "*Sebuah Esai tentang Bentuk Bumi*". Usia 17 tahun, ia meraih gelar BA dari Universitas Cambridge dan diangkat menjadi guru besar pada usia 22 tahun di Universitas Glasgow.

Tahun 1848, Thomson mengemukakan skala suhu mutlaknya. Nol derajat skala Kelvin (nama belakangnya) merupakan nol mutlak, karena suhu paling rendah yang bisa diharapkan, yaitu benda tidak lagi

memancarkan panas sedikit pun. Ia menjadi kaya raya dan terkenal setelah menemukan *galvanometer kelvin* dan *siphon recorder* yang dapat menangkap sinyal listrik yang lemah dan berhasil memasang kabel telegraf di dasar Samudera Atlantik yang menghubungkan antara Benua Amerika dan Benua Eropa.

(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)

## B. Hukum Pertama Termodinamika

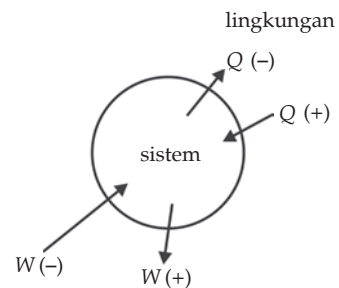
Hukum pertama termodinamika merupakan salah satu contoh hukum kekekalan energi. Artinya, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Energi hanya dapat berubah dari bentuk satu ke bentuk lainnya. Hukum I termodinamika menyatakan bahwa untuk setiap proses apabila kalor ( $Q$ ) diberikan kepada sistem dan sistem melakukan usaha ( $W$ ), maka akan terjadi perubahan energi dalam ( $\Delta U$ ). Pernyataan ini dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut.

$$\Delta U = Q - W \text{ atau } Q = \Delta U + W$$

Untuk memahami persamaan tersebut, perhatikan tanda positif dan negatif pada Gambar 9.6!

Peraturan tanda positif dan negatif adalah sebagai berikut:

1.  $Q$  dianggap positif (+) apabila kalor memasuki sistem.
2.  $W$  dianggap positif (+) apabila usaha dilakukan oleh sistem.
3.  $\Delta U$  dianggap positif (+) apabila energi dalam sistem bertambah.
4.  $Q$  dianggap negatif (-) apabila kalor keluar dari sistem.
5.  $W$  dianggap negatif (-) apabila lingkungan melakukan usaha pada sistem.
6.  $\Delta U$  dianggap negatif (-) apabila energi dalam sistem berkurang.



Gambar 9.6 Hukum pertama termodinamika.

Berdasarkan teori kinetik gas energi dalam ( $U$ ) merupakan energi total molekul-molekul gas yang besarnya tergantung pada jumlah molekul ( $N$ ) dan suhu mutlak gas ( $T$ ).

$$U = NE_k = Nf \left( \frac{1}{2} kT \right), \text{ dengan } f \text{ sebagai derajat kebebasan.}$$

Gas monoatomik mempunyai derajat kebebasan  $f = 3$ . Energi dalam gas monoatomik sebesar  $U = Nf \left( \frac{1}{2} kT \right)$ . Oleh karena itu, energi dalam gas

monoatomik  $U = \frac{3}{2}NkT$ . Perubahan energi dalam gas monoatomik dapat ditentukan dengan persamaan  $\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2}Nk(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}Nk \Delta T$ .

Anda akan menerapkan hukum I termodinamika pada keempat proses termodinamika, yaitu proses isothermal, isobarik, isokorik, dan adiabatik. Perlu ditekankan bahwa konsep tentang perubahan energi dalam ( $\Delta U$ ) dan usaha ( $W$ ) pada berbagai proses yang telah dibahas sebelumnya akan digunakan langsung pada aplikasi hukum I termodinamika.

**Tabel Proses Termodinamika**

Proses	Usaha	Perubahan Energi Dalam	Hukum I Termodinamika	Keterangan
Isobarik	$W = p\Delta V$	$\Delta U = \frac{3}{2}nR \Delta T$	$Q_p = W + \Delta U$	$\Delta p = 0$
Isokorik	$W = 0$	$\Delta U = \frac{3}{2}nR \Delta T$	$Q_v = \Delta U$	$\Delta V = 0$
Isothermal	$W = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	$\Delta U = 0$	$Q = W$	$\Delta T = 0$
Adiabatik	$W = \frac{3}{2}nR(T_1 - T_2)$	$\Delta U = \frac{3}{2}nR \Delta T$	$\Delta U = -W$	$\Delta Q = 0$

### Contoh 9.1

Dua mol gas ideal monoatomik suhunya dinaikkan dari 27°C menjadi 127°C pada tekanan tetap. Jika konstanta gas umum  $R = 8,31 \text{ J/molK}$ , maka hitunglah perubahan energi dalam, usaha yang dilakukan oleh gas, dan kalor yang diperlukan!

Diketahui : a.  $n = 2 \text{ mol}$   
b.  $T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K}$   
c.  $T_2 = 127 + 273 = 400 \text{ K}$   
d.  $R = 8,31 \text{ J/mol k}$

Ditanyakan : a.  $\Delta U = \dots?$   
b.  $W = \dots?$   
c.  $Q = \dots?$

Jawab:

a. Perubahan energi dalam

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= \frac{3}{2}nR(T_1 - T_2) \\
 &= \frac{3}{2}(2)(8,31)(400 - 300) \\
 &= 2.493 \text{ J}
 \end{aligned}$$

- b. Usaha yang dilakukan oleh gas

$$\begin{aligned}W &= p\Delta V = p(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1) \\&= 2 \times 8,31 \times (400 - 300) \\&= 1.662 \text{ J}\end{aligned}$$

- c. Kalor yang diperlukan oleh gas

$$\begin{aligned}Q &= \Delta U + W \\&= 2.493 + 1.662 \\&= 4.155 \text{ J}\end{aligned}$$

### Kolom Diskusi 9.1

Anda mungkin pernah berlibur ke daerah pegunungan. Di sana udara terasa dingin, bukan? Di sisi lain mungkin Anda pernah mendengar bencana yang disebabkan angin yang bertiup kering dan panas (ini merupakan salah satu penyebab terbentuknya gurun di bumi). Diskusikan dengan kelompok Anda, mengapa terdapat variasi suhu di atmosfer bumi. Mintalah kepada guru Anda agar menunjuk salah satu kelompok untuk mempresentasikan hasil diskusinya! Buatlah kesimpulan secara mandiri dan kumpulkan di meja guru!

## C. Kapasitas Kalor

Kapasitas kalor adalah banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu sebesar 1 kelvin. Secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$Q = C \times \Delta T$$

Keterangan:

$Q$  : kalor yang diserap (J)

$C$  : kapasitas kalor (J/K)

$\Delta T$  : perubahan suhu (K)

Persamaan ini berlaku untuk gas. Kalor yang diberikan kepada gas untuk menaikkan suhunya dapat dilakukan pada tekanan tetap (proses isobarik) atau pada volume tetap (proses isokorik). Oleh karena itu, pada gas ada dua jenis kapasitas kalor, yaitu kapasitas kalor pada tekanan tetap ( $C_p$ ) dan kapasitas kalor pada volume tetap ( $C_v$ ). Secara matematis dapat ditulis seperti berikut.

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T} \text{ dan } C_v = \frac{Q_v}{\Delta T}$$

Keterangan:

$Q_V$  : kalor yang diberikan pada volume tetap

$Q_p$  : kalor yang diberikan pada tekanan tetap

Hukum I termodinamika pada proses isobaris  $Q_p = \Delta U + W$ , sedangkan untuk proses isobarik  $Q_V = \Delta U$ . Bila kedua persamaan digabungkan, diperoleh:

$$Q_p = Q_V + W$$

$$C_p \Delta T = C_V \Delta T + p \Delta V$$

$$(C_p - C_V) \Delta T = p \Delta V$$

$$C_p - C_V = \frac{p \Delta V}{\Delta T}$$

Berdasarkan persamaan gas ideal  $pV = nRT$ , maka  $p \frac{\Delta V}{\Delta T} = nR$ . Oleh karena itu persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut.

$$C_p - C_V = nR$$

## 1. Untuk Gas Monoatomik

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T$$

$$C_V = \frac{\frac{3}{2} nR \Delta T}{\Delta T} = \frac{3}{2} nR$$

$$C_V = \frac{3}{2} nR$$

$$C_p = C_V + nR = \frac{3}{2} nR + nR = \frac{5}{2} nR$$

$$C_p = \frac{5}{2} nR$$

## 2. Untuk Gas Diatomik

Pada suhu sedang maupun tinggi, energi dalam gas diatomik bertambah besar. Hal ini disebabkan pada suhu sedang terdapat energi kinetik rotasi, sedangkan pada suhu tinggi terdapat energi kinetik rotasi dan vibrasi (getaran gas).

**a. Pada Suhu Rendah ( $T < 160 \text{ K}$ )**

$$\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$$

$$C_V = \frac{\frac{3}{2}nR\Delta T}{\Delta T} = \frac{3}{2}nR$$

$$C_V = \frac{3}{2}nR$$

$$C_p = C_V + nR = \frac{3}{2}nR + nR = \frac{5}{2}nR$$

$$C_p = \frac{5}{2}nR$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{\frac{5}{2}nR}{\frac{3}{2}nR} = \frac{5}{3} = 1,67 \text{ (tetapan Laplace)}$$

**b. Pada Suhu Sedang ( $160 \text{ K} < T < 5.000 \text{ K}$ )**

$$\Delta U = \frac{5}{2}nR\Delta T$$

$$C_V = \frac{\frac{5}{2}nR\Delta T}{\Delta T} = \frac{5}{2}nR$$

$$C_V = \frac{5}{2}nR$$

$$C_p = C_V + nR = \frac{5}{2}nR + nR = \frac{7}{2}nR$$

$$C_p = \frac{7}{2}nR$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{\frac{7}{2}nR}{\frac{5}{2}nR} = \frac{7}{5} = 1,4 \text{ (tetapan Laplace)}$$

**c. Pada Suhu Tinggi ( $T > 5.000 \text{ K}$ )**

$$\Delta U = \frac{7}{2} nR \Delta T$$

$$C_V = \frac{\frac{7}{2} nR \Delta T}{\Delta T} = \frac{7}{2} nR$$

$$C_V = \frac{7}{2} nR$$

$$C_p = C_V + nR = \frac{7}{2} nR + nR = \frac{9}{2} nR$$

$$C_p = \frac{9}{2} nR$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{\frac{9}{2} nR}{\frac{7}{2} nR} = \frac{9}{7} = 1,28 \text{ (tetapan Laplace)}$$

**Contoh 9.4**

Suatu gas massanya 7 gram dan massa molekulnya 28 gram/mol dipanaskan dari 280 K pada proses isobarik membutuhkan kalor 2.900 J.

- Hitunglah kapasitas kalor pada tekanan tetap dan kapasitas kalor pada volume tetap!
- Hitunglah kalor yang diperlukan untuk memanaskan gas dari 280 K menjadi 330 K pada volume tetap!

Diketahui : a.  $m = 7 \text{ gram}$

b.  $M = 28 \text{ gram/mol}$

c.  $T_1 = 280 \text{ K}$

d.  $T_2 = 330 \text{ K}$

e.  $Q_p = 2.900 \text{ J}$

Ditanyakan : a.  $C_V$  dan  $C_p = \dots?$

b.  $Q_V = \dots?$

- Kapasitas kalor pada tekanan tetap dan pada volume tetap.

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{Q_p}{\Delta T} \\ &= \frac{2.900}{330 - 280} \\ &= 58 \text{ J/K} \end{aligned}$$

Anda cari terlebih dahulu nilai  $n$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{7}{28} = \frac{1}{4}$$

$$\begin{aligned} C_p - C_V &= nR \quad \Rightarrow \quad C_V = C_p - nR \\ &= 58 - \left( \frac{1}{4} \times 8,31 \right) \\ &= 55,92 \text{ J/K} \end{aligned}$$

b. Kalor yang diperlukan

$$\begin{aligned} Q_V &= C_V \Delta T \\ &= 55,92 \times (330 - 280) \\ &= 2.800 \text{ J} \end{aligned}$$

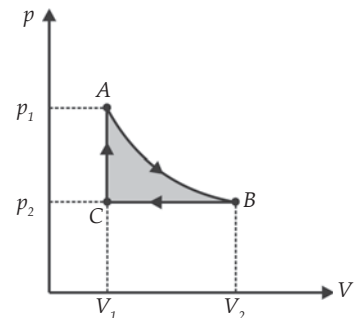
### Soal Kompetensi 9.2

1. Suatu tangki volumenya  $4 \text{ m}^3$  berisi gas ideal monoatomik  $0,8 \text{ mol}$  pada suhu  $27^\circ \text{C}$ . Gas tersebut dipanaskan pada tekanan tetap sehingga suhunya menjadi  $77^\circ \text{C}$ . Hitunglah perubahan energi dalam gas, usaha yang dilakukan oleh gas, dan kalor yang diserap gas!
2. Suatu gas pada tekanan konstan  $8,1 \times 10^4 \text{ Pa}$  dimampatkan dari  $9 \text{ liter}$  menjadi  $2 \text{ liter}$ . Jika dalam proses tersebut gas melepas kalor sebesar  $400 \text{ joule}$ , maka hitunglah usaha yang dilakukan oleh gas dan perubahan energi dalam!
3. Kalor jenis gas amonia ( $M_r = 17$ ) pada volume tetap adalah  $0,41 \text{ kal/JK}$ . Hitunglah kalor jenis gas pada tekanan tetap!

## D. Siklus Carnot

### 1. Pengertian Siklus

*Siklus* adalah suatu rangkaian sedemikian rupa sehingga akhirnya kembali kepada keadaan semula. Perhatikan Gambar 9.7! Misalnya, terdapat suatu siklus termodinamika yang melibatkan proses isothermal, isobarik, dan isokorik. Sistem menjalani proses isothermal dari keadaan A sampai B, kemudian menjalani proses isobarik untuk mengubah sistem dari



Gambar 9.7 Siklus termodinamika.



keadaan  $B$  ke keadaan  $C$ . Akhirnya proses isokorik membuat sistem kembali ke keadaan awalnya ( $A$ ). Proses dari  $A$  ke keadaan  $B$ , kemudian ke keadaan  $C$ , dan akhirnya kembali ke keadaan  $A$ , menyatakan suatu siklus.

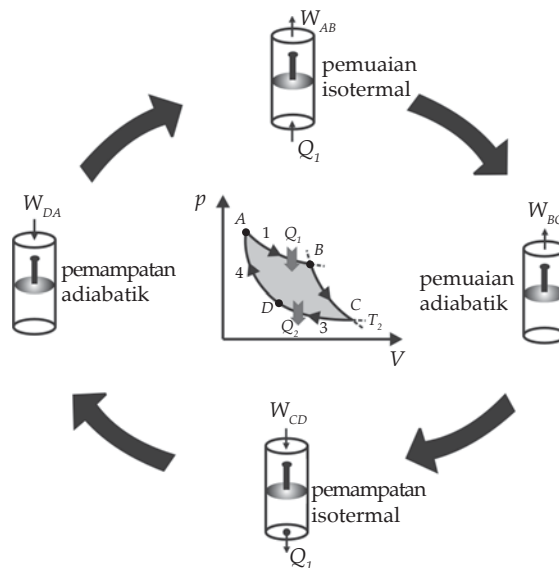
Apabila siklus tersebut berlangsung terus menerus, kalor yang diberikan dapat diubah menjadi usaha mekanik. Tetapi tidak semua kalor dapat diubah menjadi usaha. Kalor yang dapat diubah menjadi usaha hanya pada bagian yang diarsir (diraster) saja (perhatikan kembali Gambar 9.7). Berdasarkan Gambar 9.7 besar usaha yang bermanfaat adalah luas daerah  $ABCA$ . Secara matematis dapat ditulis seperti berikut.

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} - p(V_2 - V_1)$$

Usaha bernilai positif jika arah proses dalam siklus searah putaran jam, dan bernilai negatif jika berlawanan arah putaran jarum jam. Perubahan energi dalam  $\Delta U$  untuk satu siklus sama dengan nol ( $\Delta U = 0$ ) karena keadaan awal sama dengan keadaan akhir.

## 2. Siklus Carnot

Berdasarkan percobaan joule diketahui bahwa tenaga mekanik dapat seluruhnya diubah menjadi energi kalor. Namun, apakah energi kalor dapat seluruhnya diubah menjadi energi mekanik? Adakah mesin yang dapat mengubah kalor seluruhnya menjadi usaha? Pada tahun 1824, seorang insinyur berkebangsaan Prancis, Nicolas Leonardi Sadi Carnot, memperkenalkan metode baru untuk meningkatkan efisiensi suatu mesin berdasarkan siklus usaha. Metode efisiensi Sadi Carnot ini selanjutnya dikenal sebagai *siklus Carnot*. Siklus Carnot terdiri atas empat proses, yaitu dua proses isothermal dan dua proses adiabatik. Perhatikan Gambar 9.8 berikut!



Gambar 9.8 Siklus Carnot.

Berdasarkan Gambar 9.8 dijelaskan siklus Carnot sebagai berikut.

1. Proses  $AB$  adalah pemuaian isotermal pada suhu  $T_1$ . Pada proses ini sistem menyerap kalor  $Q_1$  dari reservoir bersuhu tinggi  $T_1$  dan melakukan usaha  $W_{AB}$ .
2. Proses  $BC$  adalah pemuaian adiabatik. Selama proses ini berlangsung suhu sistem turun dari  $T_1$  menjadi  $T_2$  sambil melakukan usaha  $W_{BC}$ .
3. Proses  $CD$  adalah pemampatan isotermal pada suhu  $T_2$ . Pada proses ini sistem menerima usaha  $W_{CD}$  dan melepas kalor  $Q_2$  ke reservoir bersuhu rendah  $T_2$ .
4. Proses  $DA$  adalah pemampatan adiabatik. Selama proses ini suhu sistem naik dari  $T_2$  menjadi  $T_1$  akibat menerima usaha  $W_{DA}$ .

Siklus Carnot merupakan dasar dari mesin ideal yaitu mesin yang memiliki efisiensi tertinggi yang selanjutnya disebut *mesin Carnot*. Usaha total yang dilakukan oleh sistem untuk satu siklus sama dengan luas daerah di dalam siklus pada diagram  $p - V$ . Mengingat selama proses siklus Carnot sistem menerima kalor  $Q_1$  dari reservoir bersuhu tinggi  $T_1$  dan melepas kalor  $Q_2$  ke reservoir bersuhu rendah  $T_2$ , maka usaha yang dilakukan oleh sistem menurut hukum I termodinamika adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + W \\ Q_1 - Q_2 &= 0 + W \\ W &= Q_1 - Q_2 \end{aligned}$$

Dalam menilai kinerja suatu mesin, efisiensi merupakan suatu faktor yang penting. Untuk mesin kalor, efisiensi mesin ( $\eta$ ) ditentukan dari perbandingan usaha yang dilakukan terhadap kalor masukan yang diberikan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

Untuk siklus Carnot berlaku hubungan  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ , sehingga efisiensi mesin Carnot dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \times 100\%$$

Keterangan:

- $\eta$  : efisiensi mesin Carnot  
 $T_1$  : suhu reservoir bersuhu tinggi (K)  
 $T_2$  : suhu reservoir bersuhu rendah (K)

Efisiensi mesin Carnot merupakan efisiensi yang paling besar karena merupakan mesin ideal yang hanya ada di dalam teori. Artinya, tidak ada mesin yang mempunyai efisien melebihi efisiensi mesin kalor Carnot. Berdasarkan persamaan di atas terlihat efisiensi mesin kalor Carnot hanya tergantung pada suhu kedua tandon atau reservoir. Untuk mendapatkan efisiensi sebesar 100%, suhu tandon  $T_2$  harus  $= 0$  K. Hal ini dalam praktik tidak mungkin terjadi. Oleh karena itu, mesin kalor Carnot adalah mesin yang sangat ideal. Hal ini disebabkan proses kalor Carnot merupakan proses reversibel. Sedangkan kebanyakan mesin biasanya mengalami proses irreversibel (tak terbalikkan).

### Contoh 9.1

Sebuah mesin Carnot menyerap kalor sebesar 500 kJ. Mesin ini bekerja pada reservoir bersuhu 600 K dan 400 K. Berapa kalor yang terbangun oleh mesin?

Diketahui : a.  $T_1 = 600$  K  
 b.  $T_2 = 400$  K  
 c.  $Q_1 = 500$  kJ

Ditanyakan :  $Q_2 = \dots$ ?

Jawab:

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{T_2}{T_1} \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{400}{600}\right) \times 100\% \\ &= 33,33\% = \frac{1}{3}\end{aligned}$$

Untuk menghitung  $Q_2$ , dapat Anda gunakan persamaan efisiensi:

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \times 100\% \\ \frac{1}{3} &= 1 - \frac{Q_2}{500} \\ Q_2 &= 333,3 \text{ kJ}\end{aligned}$$

## E. Hukum II Termodinamika

Hukum I termodinamika menyatakan bahwa energi adalah kekal, tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Energi hanya dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Berdasarkan teori ini, Anda dapat mengubah energi kalor ke bentuk lain sesuka Anda asalkan memenuhi hukum kekekalan energi.

Namun, kenyataannya tidak demikian. Energi tidak dapat diubah sekehendak Anda. Misalnya, Anda menjatuhkan sebuah bola besi dari suatu ketinggian tertentu. Pada saat bola besi jatuh, energi potensialnya berubah menjadi energi kinetik. Saat bola besi menumbuk tanah, sebagian besar energi kinetiknya berubah menjadi energi panas dan sebagian kecil berubah menjadi energi bunyi. Sekarang, jika prosesnya Anda balik, yaitu bola besi Anda panaskan sehingga memiliki energi panas sebesar energi panas ketika bola besi menumbuk tanah, mungkinkah energi ini akan berubah menjadi energi kinetik, dan kemudian berubah menjadi energi potensial sehingga bola besi dapat naik? Peristiwa ini tidak mungkin terjadi walau bola besi Anda panaskan sampai meleleh sekalipun.

Hal ini menunjukkan proses perubahan bentuk energi di atas hanya dapat berlangsung dalam satu arah dan tidak dapat dibalik. Proses yang tidak dapat dibalik arahnya dinamakan *proses irreversibel*. Proses yang dapat dibalik arahnya dinamakan *proses reversibel*.

Peristiwa di atas mengilhami terbentuknya hukum II termodinamika. Hukum II termodinamika membatasi perubahan energi mana yang dapat terjadi dan yang tidak dapat terjadi. Pembatasan ini dapat dinyatakan dengan berbagai cara, antara lain, hukum II termodinamika dalam pernyataan aliran kalor: *“Kalor mengalir secara spontan dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah dan tidak mengalir secara spontan dalam arah kebalikannya”*; hukum II termodinamika dalam pernyataan tentang mesin kalor: *“Tidak mungkin membuat suatu mesin kalor yang bekerja dalam suatu siklus yang semata-mata menyerap kalor dari sebuah reservoir dan mengubah seluruhnya menjadi usaha luar”*; hukum II termodinamika dalam pernyataan entropi: *“Total entropi semesta tidak berubah ketika proses reversibel terjadi dan bertambah ketika proses ireversibel terjadi”*.

## 1. Entropi

*Entropi* adalah ukuran banyaknya energi atau kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha. Besarnya entropi suatu sistem yang mengalami proses reversibel sama dengan kalor yang diserap sistem dan lingkungannya ( $\Delta Q$ ) dibagi suhu mutlak sistem tersebut ( $T$ ). Perubahan entropi diberi tanda  $\Delta S$ , secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Ciri proses reversibel adalah perubahan total entropi ( $\Delta S = 0$ ) baik bagi sistem maupun lingkungannya. Pada proses irreversibel perubahan entropi  $\Delta S_{\text{semesta}} > 0$ . Proses irreversibel selalu menaikkan entropi semesta.

$$\Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{lingkungan}} = \Delta S_{\text{seluruhnya}} \geq 0$$

**Contoh 9.7**

Diketahui 100 gram air bersuhu  $27^{\circ}\text{C}$  dihubungkan dengan suatu reservoir (tandon) yang mempunyai suhu  $77^{\circ}\text{C}$ .

- Jika suhu air mencapai  $77^{\circ}\text{C}$ , maka tentukan perubahan entropi dari air, reservoir, dan keseluruhan sistem!
- Jika air dipanasi dari  $27^{\circ}\text{C}$  hingga  $77^{\circ}\text{C}$  dengan menghubungkan air pertama-tama ke reservoir  $47^{\circ}\text{C}$  dan kemudian ke reservoir  $77^{\circ}\text{C}$ , maka tentukan perubahan entropi keseluruhan sistem!

Diketahui :

- $T_1 = (77 + 273) = 300\text{ K}$
- $T_2 = (77 + 273) = 350\text{ K}$
- $C_{\text{air}} = 1\text{ kal/g }^{\circ}\text{C}$
- $m_{\text{air}} = 100\text{ g}$
- $T_3 = (273 + 47) = 320\text{ K}$
- $T_4 = T_2 = 350\text{ K}$

Ditanyakan : a.  $\Delta S_{\text{air}}$ ,  $\Delta S_{\text{reservoir}}$ , dan  $\Delta S_{\text{keseluruhan}} = \dots?$

b.  $\Delta S_{\text{keseluruhan}} = \dots?$

Jawab:

- a. Perubahan entropi air ( $\Delta S_{\text{air}}$ )

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{air}} &= \frac{\Delta Q}{T} = \int_{T_1}^{T_2} m C_{\text{air}} \frac{dT}{T} = m C_{\text{air}} \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= 100 \times 1 \times \ln \left( \frac{350}{300} \right) \\ &= 15,42\text{ kal/K}\end{aligned}$$

Kalor yang diserap air dari reservoir

$$\begin{aligned}Q &= m C_{\text{air}} (T_2 - T_1) \\ &= 100 \times 1 \times (350 - 300) \\ &= 5.000\text{ kal}\end{aligned}$$

Perubahan entropi reservoir ( $\Delta S_{\text{reservoir}}$ )

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{reservoir}} &= \frac{Q}{T} \\ &= -\frac{Q}{T_2} \\ &= -\frac{5.000}{350} \\ &= -14,28\text{ kal/K}\end{aligned}$$

(tanda negatif (-) menunjukkan bahwa reservoir mengeluarkan kalor)

Jika air sebagai sistem dan reservoir sebagai keliling (lingkungan), maka perubahan entropi keseluruhan dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{keseluruhan}} &= \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{sekeliling}} \\ &= \Delta S_{\text{air}} + \Delta S_{\text{reservoir}} \\ &= 15,42 - 14,28 \\ &= 1,14 \text{ kal/K}\end{aligned}$$

b. Kalor yang diserap air dari reservoir 1 adalah

$$\begin{aligned}Q_1 &= m C_{\text{air}} (T_3 - T_1) \\ &= 100 \times 1 \times (320 - 300) \\ &= 2.000 \text{ kal}\end{aligned}$$

Perubahan entropi reservoir 1

$$\begin{aligned}\Delta S_1 &= -\frac{Q}{T_3} \\ &= -\frac{2.000}{320} \\ &= -6,25 \text{ kal/K}\end{aligned}$$

Kalor yang diserap air dari reservoir 2 adalah

$$\begin{aligned}Q_2 &= m C_{\text{air}} (T_4 - T_3) \\ &= 100 \times 1 \times (350 - 320) \\ &= 3.000 \text{ kal}\end{aligned}$$

Perubahan entropi reservoir 2

$$\begin{aligned}\Delta S_2 &= -\frac{Q_2}{T_4} \\ &= -\frac{3.000}{350} \\ &= -8,57 \text{ kal/K}\end{aligned}$$

Jika air sebagai sistem dan reservoir sebagai lingkungan (sekeliling), maka perubahan entropi keseluruhan dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{keseluruhan}} &= \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{sekeliling}} \\ &= \Delta S_{\text{air}} + (\Delta S_1 + \Delta S_2) \\ &= 15,42 + ((-6,25) - (-8,57)) \\ &= 15,42 - 14,82 \\ &= 0,6 \text{ kal/K}\end{aligned}$$

## 2. Mesin Pendingin

Mesin yang menyerap kalor dari suhu rendah dan mengalirkannya pada suhu tinggi dinamakan mesin pendingin (*refrigerator*). Misalnya, pendingin ruangan (AC) dan almari es (kulkas). Perhatikan Gambar 9.9 di samping!

Kalor diserap dari suhu rendah  $T_2$  dan kemudian diberikan pada suhu tinggi  $T_1$ . Berdasarkan hukum kedua termodinamika, kalor yang dilepaskan ke suhu tinggi sama dengan kerja yang ditambah kalor yang diserap. Secara matematis dapat ditulis dalam persamaan berikut.

$$Q_1 = Q_2 + W$$

Hasil bagi antara kalor yang masuk ( $Q_1$ ) dengan usaha yang diperlukan ( $W$ ) dinamakan koefisien daya guna (performansi) yang diberi simbol  $K_p$ . Secara umum, kulkas dan pendingin ruangan memiliki koefisien daya guna dalam jangkauan 2 sampai 6. Makin tinggi nilai  $K_p$ , makin baik kerja mesin tersebut.

$$K_p = \frac{Q_2}{W}$$

Untuk gas ideal berlaku:

$$K_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Keterangan

$K_p$  : koefisien daya guna

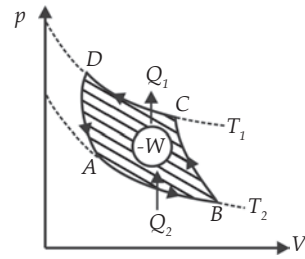
$Q_1$  : kalor yang diberikan pada reservoir suhu tinggi (J)

$Q_2$  : kalor yang diserap pada reservoir suhu rendah (J)

$W$  : usaha yang diperlukan (J)

$T_1$  : suhu reservoir suhu tinggi (K)

$T_2$  : suhu reservoir suhu rendah (K)



Gambar 9.9 Siklus mesin pendingin.

### Contoh 9.8

Sebuah mesin pendingin ideal memiliki daya guna 7. Jika reservoir tinggi bersuhu  $30^\circ\text{C}$ , maka berapakah temperatur suhu rendahnya?

Diketahui : a.  $K_p = 7$

b.  $T_1 = (30 + 273) = 303 \text{ K}$

Ditanyakan :  $T_2 = \dots?$

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{T_2}{T_1 - T_2} \Rightarrow T_2 = K_p (T_1 - T_2) \\
 &= 7 (303 - T_2) \\
 &= 2.121 - 7T_2 \\
 \Rightarrow 8T_2 &= 2.121 \\
 T_2 &= 265,12 \text{ K} \\
 &= 7,88^\circ \text{ C}
 \end{aligned}$$

### Soal Kompetensi 9.2

1. Suatu mesin kalor menyerap  $10^5$  kalori dari reservoir tinggi  $527^\circ \text{C}$  dan membuang kalor pada suhu  $127^\circ \text{C}$ . Jika usaha yang dilakukan mesin  $4 \times 10^4$  kalori, maka hitunglah efisien mesin dan efisien maksimumnya!
2. Sebuah lemari es (*refrigerator*) memiliki efisiensi  $\frac{1}{3}$  efisiensi refrigerator carnot yang bekerja pada suhu  $-3^\circ \text{C}$  dan  $37^\circ \text{C}$ . Refrigerator tersebut dapat menyerap kalor dari reservoir dingin sebesar 100 kal/jam. Berapa kalor yang dibuang oleh refrigerator ke reservoir suhu tinggi?
3. 20 gram es yang bersuhu  $-20^\circ \text{C}$  dicampur dengan 100 gram air yang bersuhu  $80^\circ \text{C}$ . Jika  $C_{\text{es}} = 0,5 \text{ kal/g } ^\circ\text{C}$ ,  $C_{\text{air}} = 1 \text{ kal/g } ^\circ\text{C}$ , dan kalor lebur es ( $K_{\text{L es}}$ ) = 80 kal/g, maka tentukan perubahan entropi sistem (sistem terisolasi)!



### Rangkuman

1. Sistem adalah benda kerja atau objek yang ditinjau dan dibatasi oleh permukaan tertutup.
2. Lingkungan adalah segala sesuatu di luar sistem.
3. Proses merupakan perubahan keadaan dari keadaan satu ke keadaan yang lain.
4. Usaha yang dilakukan sistem dinyatakan sebagai  $W = p\Delta V$ .
5. Usaha pada proses isothermal ( $T = \text{konstan}$ ) adalah  $W = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$ .
6. Usaha pada proses isobarik ( $p = \text{konstan}$ ) adalah  $W = p(V_2 - V_1)$ .



7. Usaha pada proses isokorik ( $V = \text{konstan}$ ) adalah  $W = 0$ .
8. Pada proses adiabatik berlaku  $pV^\gamma = \text{konstan}$ , dengan  $\frac{C_p}{C_v}$ .
9. Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa perubahan energi dalam,  $\Delta U$ , ketika suatu gas (sistem) berubah dari keadaan 1 ke keadaan 2. Persamaan ini di tulis  $\Delta U = Q - W$ .
10. Kapasitas kalor gas pada proses volume tetap adalah  $C_v = \frac{Q}{\Delta T}$ .
11. Kapasitas kalor gas pada proses tekanan tetap adalah  $C_p = \frac{Q}{\Delta T}$ .
12. Mesin kalor Carnot merupakan mesin kalor yang paling ideal dan tidak ada mesin yang mempunyai efisiensi melebihi mesin Carnot.
13. Efisiensi mesin kalor Carnot secara umum dinyatakan 
$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%.$$
14. Efisiensi mesin kalor Carnot juga dapat dinyatakan 
$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%.$$
15. Pernyataan hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa kalor tidak mungkin mengalir spontan dari benda rendah ke benda bersuhu tinggi (Clausius) dan tidak mungkin membuat mesin kalor yang dapat mengubah semua kalor menjadi usaha (Kelvin – Planck).
16. Persamaan perubahan entropi adalah  $\Delta S = \frac{Q}{T}$ .

### Kolom Ilmuwan

Banyak sekali pemanfaatan termodinamika dalam sehari-hari, misalnya motor bakar, motor diesel, mesin uap, kulkas, dan AC. Pilihlah salah satu alat yang menerapkan konsep termodinamika yang ada di sekitar Anda. Pelajari sistem kerja alat tersebut. Amati juga bagian yang mudah rusak dan tentukan cara memperbaikinya. Buatlah sebuah artikel berdasarkan pengamatan Anda. Tulislah cara kerja, cara merawat, dan tips-tips agar alat tersebut awet. Anda dapat memperbagus tulisan dengan mencari informasi alat yang Anda amati di buku, majalah, surat kabar, atau di internet. Kumpulkan hasil karya Anda di meja guru!

## **I** nfo Kita

### **Insulator**

Hampir semua makhluk hidup memerlukan tempat tinggal. Tempat tinggal tersebut bisa berupa rumah, sarang, ataupun liang yang melindungi penghuninya dari hawa dingin atau panas yang menyengat.

Manusia telah memiliki teknologi yang memungkinkan untuk membuat rumah yang nyaman. Pada waktu membuat rumah, manusia yang tinggal di daerah dingin akan memasang beberapa insulator yang berfungsi menghambat panas pada bangunan tersebut. Pemasangan insulator bisa berupa pemasangan busa-busa plastik pada rongga-rongga dinding; pemasangan kaca ganda pada jendela atau penggunaan korden tebal; dan pemasangan penyumbat lubang bawah pintu. Selain itu, panas juga bisa dipertahankan dengan membuat sekat-sekat yang berupa kamar-kamar dan memasang eternit pada langit-langit rumah tersebut.

Setelah Anda membuat rumah yang tetap hangat meskipun cuaca dingin, lantas bagaimana cara mengatasi saat Anda berada di luar rumah? Saat di luar rumah Anda sebaiknya mengenakan pakaian yang berlapis-lapis daripada hanya memakai sebuah jaket yang tebal dan memakai topi, karena sepersepuluh panas tubuh Anda keluar dari kepala. Memahami cara-cara perpindahan kalor, dan sifat gas ternyata membuat hidup Anda lebih mudah dan enak. Lantas bagaimana cara membuat rumah yang tetap sejuk di daerah yang panas, seperti di daerah tropis? Selamat mencoba menjadi ahli fisika!

**A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!**

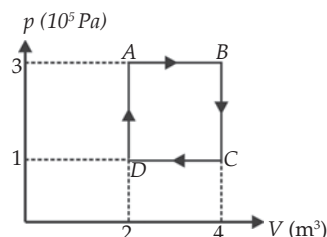
- Entropi  $\Delta S$  suatu sistem tertutup termodinamika adalah ....
  - tetap
  - berubah dengan penambahan  $\Delta S$  berharga positif
  - berubah dengan penambahan  $\Delta S$  berharga negatif
  - dapat tetap atau berubah dengan harga  $\Delta S$  positif
  - dapat berubah dengan harga  $\Delta S$  positif atau negatif tergantung dari macam prosesnya
- Sejumlah gas ideal dengan massa tertentu mengalami pemampatan secara adiabatik. Jika  $W$  adalah kerja yang dilakukan oleh sistem (gas) dan  $\Delta T$  adalah perubahan suhu dari sistem, maka berlaku keadaan ....
  - $W = 0, \Delta T > 0$
  - $W = 0, \Delta T < 0$
  - $W > 0, \Delta T = 0$
  - $W < 0, \Delta T > 0$
  - $W < 0, \Delta T < 0$
- Suatu sistem mengalami proses adiabatik. Pada sistem dilakukan usaha 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem adalah  $\Delta U$  dan kalor yang diserap sistem adalah  $Q$ , maka ....
  - $\Delta U = -1000 \text{ J}$
  - $\Delta U = 100 \text{ J}$
  - $\Delta U = 10 \text{ J}$
  - $Q = 0$
  - $\Delta U + Q = -100 \text{ J}$
- Usaha yang dilakukan oleh gas ideal yang mengalami proses isokorik dari tekanan  $p_1$  sampai  $p_2$  adalah ....
  - 0
  - $p_1 V_2$
  - $p_2 V_2$
  - $\frac{p_1 + p_2}{2} \times \frac{V_1 + V_2}{2}$
  - $(p_1 - p_2)V$
- Gas helium yang memiliki volume  $1,5 \text{ m}^3$  dan suhu  $27^\circ\text{C}$  dipanaskan secara isobarik sampai suhu  $87^\circ\text{C}$ . Jika tekanan gas helium  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ , maka gas helium melakukan usaha luar sebesar ....
  - 60 kJ
  - 120 kJ
  - 280 kJ
  - 480 kJ
  - 660 kJ

6. Jika reservoir suhu tinggi bersuhu 800 K, maka efisiensi maksimum mesin 40%. Agar efisiensi maksimumnya naik menjadi 50%, maka suhu reservoir suhu tingginya harus diubah menjadi ....
  - a. 900 K
  - b. 960 K
  - c. 1.000 K
  - d. 1.180 K
  - e. 1.600 K
7. Efisiensi mesin Carnot yang beroperasi dengan suhu rendah  $\frac{1}{2}T$  kelvin dan dengan suhu tinggi  $T$  kelvin adalah ....
  - a. 25%
  - b. 33%
  - c. 50%
  - d. 66%
  - e. 75%
8. Sebuah mesin turbin memakai uap dengan suhu awal 550° C dan membuangnya pada suhu 35° C. Efisiensi maksimum mesin turbin tersebut adalah ....
  - a. 33%
  - b. 43 %
  - c. 53 %
  - d. 63%
  - e. 73%
9. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi 727° C mempunyai efisiensi 30%. Reservoir suhu rendahnya memiliki suhu ....
  - a. 327° C
  - b. 373° C
  - c. 417° C
  - d. 427° C
  - e. 509° C
10. Diketahui suatu mesin carnot jika reservoir panasnya bersuhu 400 K akan mempunyai efisiensi 40%. Jika reservoir panasnya bersuhu 640 K, maka efisiensinya sebesar ...
  - a. 50%
  - b. 52,5%
  - c. 57%
  - d. 62,5%
  - e. 64%

**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

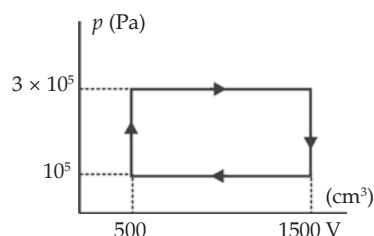
1. Sebuah mesin menyerap panas sebesar 2.000 joule dari suatu reservoir yang suhunya 500 K dan membuangnya sebesar 1.200 joule pada reservoir yang bersuhu 250 K. Hitunglah efisiensi mesin tersebut!
2. Sebuah mesin Carnot membangkitkan tenaga 2.000 joule dari reservoir bertemperatur 1.200 K ke reservoir 400 K. Hitunglah energi yang dipakai mesin pada saat itu!

3. Suatu gas ideal mengalami proses siklus seperti pada diagram  $p - V$  di atas. Hitunglah usaha yang dihasilkan pada proses siklus tersebut!



4. Satu mol gas ideal menempati suatu silinder berpengisap tanpa gesekan, mula-mula mempunyai suhu  $T$ . Gas tersebut kemudian dipanaskan pada tekanan konstan sehingga volumenya menjadi 4 kali lebih besar. Bila  $R$  adalah tetapan gas universal, maka tentukan besarnya usaha yang telah dilakukan oleh gas untuk menaikkan volumenya!

5. Perhatikan gambar di samping! Suatu mesin kalor yang bekerja dengan siklus yang dibangun dari dua proses isobar dan dua isokorik digunakan untuk menggerakkan sebuah generator yang tegangan keluarannya 200 V. Apabila generator ini mendapat beban arus 5 A, maka hitunglah putaran per menit mesin kalor tersebut!



6. Mesin Carnot dioperasikan antara 2 reservoir kalor masing-masing suhunya  $T_1$  dan  $T_2$ , dengan  $T_2 > T_1$ . Diketahui efisiensi mesin tersebut 40%, dan besarnya  $T_1 = 27^\circ \text{C}$ . Agar efisiensinya naik menjadi 60 %, maka tentukan besarnya perubahan  $T_2$ !
7. Diketahui sebuah mesin kalor yang bekerja antara reservoir kalor bersuhu rendah  $27^\circ \text{C}$  dan reservoir kalor bersuhu tinggi  $T_2^\circ \text{C}$ , ditingkatkan efisiensi maksimumnya dari 25% hingga menjadi 50% dengan menaikkan suhu  $T_2^\circ \text{C}$  menjadi  $T_3^\circ \text{C}$ . Hitunglah suhu  $T_2$  dan  $T_3$ !
8. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi 800 K mempunyai efisiensi sebesar 40%. Agar efisiensinya naik menjadi 50%, maka hitunglah suhu reservoir suhu tingginya!
9. Sebuah mesin kalor Carnot bekerja di antara dua reservoir bersuhu  $527^\circ \text{C}$  dan  $127^\circ \text{C}$ . Tentukan efisiensi mula-mula dan terakhir mesin tersebut!
10. Suatu mesin kalor Carnot dengan efisiensi 60% dioperasikan antara dua reservoir kalor, reservoir bersuhu rendah  $27^\circ \text{C}$ . Agar mesin Carnot tersebut daya gunanya menjadi 80%, maka hitunglah suhu reservoir kalor suhu tingginya!

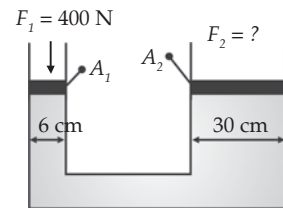


# Pelatihan Ulangan Semester Genap

**A. Pilihlah jawaban yang benar dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!**

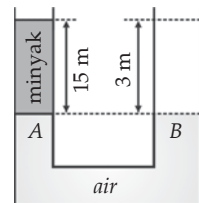
1. Seongkah batu memiliki volume  $15 \text{ cm}^3$  dan massa 27 gram. Maka massa jenis batu tersebut adalah ....
  - a.  $1,3 \text{ g/cm}^3$
  - b.  $1,8 \text{ g/cm}^3$
  - c.  $2 \text{ g/cm}^3$
  - d.  $\frac{15}{28} \text{ g/cm}^3$
  - e.  $\frac{15}{10} \text{ g/cm}^3$
2. Zat yang dapat mengalir dan memberikan sedikit hambatan terhadap perubahan bentuk saat ditekan adalah ....
  - a. fluida
  - b. zat padat
  - c. daya
  - d. tekanan
  - e. massa jenis
3. Sebuah balok dengan berat 24 N terletak pada lantai yang sisinya 3 m dan 2 m. Tekanan balok pada lantai adalah ....
  - a. 1 Pa
  - b. 2 Pa
  - c. 3 Pa
  - d. 4 Pa
  - e. 5 Pa
4. Suatu besaran yang didefinisikan sebagai gaya bekerja tegak lurus pada suatu bidang persatuan luas bidang itu disebut ....
  - a. fluida
  - b. massa jenis
  - c. tekanan
  - d. gaya
  - e. usaha

5. Tekanan zat cair yang hanya disebabkan oleh beratnya disebut tekanan ....
- atmosfer
  - udara
  - permukaan
  - zat cair
  - hidrostatik
6. Sebuah wadah berisi air raksa (massa jenis raksa =  $13.600 \text{ kg/m}^3$  setinggi 76 cm. Tekanan hidrostatik yang bekerja pada dasar wadah adalah ....
- 101.292,8 Pa
  - 105.315,76 Pa
  - 121.115 Pa
  - 130.000 Pa
  - 142.231 Pa
7. Berdasarkan soal nomor 6, maka tinggi yang setara dengan tekanan hidrostatik tersebut adalah ....
- 10,34 m
  - 10,5 m
  - 11 m
  - 11,2 m
  - 11,35 m
8. Tekanan yang diberikan pada zat cair di dalam ruang tertutup diteruskan sama besar ke segala arah, adalah hukum ....
- Boyle
  - Gay-Lussac
  - Ohm
  - Pascal
  - Archimedes
9. Sebuah dongkrak hidrolik memiliki pengisap kecil yang diameternya 6 cm dan pengisap besar yang diameternya 30 cm. Bila pengisap kecil ditekan dengan gaya 400 N, besarnya gaya yang dihasilkan pada pengisap besar adalah ....
- $10^4 \text{ N}$
  - $10^3 \text{ N}$
  - $10^2 \text{ N}$
  - 10 N
  - 1 N



10. Hukum pokok hidrostatika menyatakan bahwa semua titik yang terletak pada bidang datar, di dalam satu jenis zat cair, memiliki ....
- massa jenis berbeda
  - usaha yang sama
  - tekanan yang sama
  - energi yang sama
  - fluida

11. Sebuah pipa U berisi air dan minyak. Tinggi kolom minyak dan air pada kedua kaki adalah 3 m. Bila massa jenis air  $1.000 \text{ kg/m}^3$ , maka massa jenis minyak adalah ....
- $500 \text{ kg/m}^3$
  - $550 \text{ kg/m}^3$
  - $580 \text{ kg/m}^3$
  - $600 \text{ kg/m}^3$
  - $800 \text{ kg/m}^3$



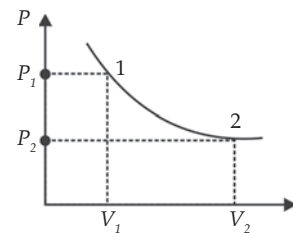
12. Alat yang diperlukan untuk mengukur tekanan atmosfer (udara) adalah ....
- altometer
  - barometer
  - termometer
  - hidrometer
  - higrometer
13. Diketahui tekanan atmosfer sebesar 72 cm Hg,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , massa jenis air sebesar  $1.000 \text{ kg/m}^3$ , dan massa jenis raksa =  $13.600 \text{ kg/m}^3$ . Tekanan pada kedalaman 5 m dalam suatu danau adalah ....
- $1,42 \times 10^5 \text{ Pa}$
  - $1,46 \times 10^5 \text{ Pa}$
  - $1,48 \times 10^5 \text{ Pa}$
  - $1,48 \times 10^4 \text{ Pa}$
  - $1,5 \times 10^4 \text{ Pa}$
14. Besarnya volume udara pada tekanan atmosfer  $1,02 \times 10^5 \text{ Pa}$  yang dapat disimpan dalam sebuah kompresor udara bervolume 326 L, dan mampu menahan  $7,02 \times 10^5 \text{ Pa}$  adalah ....
- 1.700 L
  - 1.735 L
  - 1.819 L
  - 2.000 L
  - 2.106 L
15. Pada kasus benda yang melayang dan mengapung berlaku bahwa gaya ke atas sama dengan ....
- berat air
  - berat benda
  - massa jenis
  - tekanan air
  - volume air
16. Teori kinetik gas ideal menyatakan partikel-partikel gas selalu bergerak hingga memiliki ....
- berat
  - kecepatan
  - energi potensial
  - energi kinetik
  - volume air
17. Suatu mol gas x menempati volume  $100 \text{ dm}^3$  dan suhu gas saat itu  $127^\circ \text{C}$ . Tekanan gas tersebut adalah ....
- $1,52 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
  - $2,71 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
  - $3,32 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
  - $3,31 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
  - $4,1 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
18. Bila suhu gas makin tinggi, maka kecepatan partikel gas akan makin ....
- kecil
  - rendah
  - sedang
  - membesar
  - menyusut
19. Besarnya energi dalam satu mol gas bersuhu  $27^\circ \text{C}$  adalah ....
- 1663 J
  - 1552 J
  - 1450 J
  - 1380 J



- c. 1486 J
20. Energi yang terdapat pada gas ideal adalah energi kinetik atau disebut dengan energi ....
- utama
  - khusus
  - luar
  - dalam
  - bebas
21. Besarnya kecepatan rata-rata pada molekul gas oksigen normal bila massa jenisnya  $0,00128 \text{ g/cm}^3$  dan  $g = 10 \text{ m/s}_2$  adalah ....
- 455,9 m/s
  - 460,8 m/s
  - 475,2 m/s
  - 480,1 m/s
  - 492,2 m/s
22. Sepuluh liter gas ideal suhunya  $127^\circ \text{C}$  dan memiliki tekanan  $165,6 \text{ N/m}^2$ . Banyaknya partikel gas tersebut adalah ....
- $1 \times 10^{19}$  buah
  - $1 \times 10^{18}$  buah
  - $2 \times 10^{19}$  buah
  - $2 \times 10^{18}$  buah
  - $3 \times 10^{19}$  buah
23. Jika tetapan Boltzman  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , maka hitunglah energi kinetik sebuah atom gas Helium pada suhu  $127^\circ \text{C}$  adalah ....
- $10,1 \times 10^{-20} \text{ J}$
  - $10,35 \times 10^{-21} \text{ J}$
  - $11 \times 10^{-21} \text{ J}$
  - $11,21 \times 10^{-21} \text{ J}$
  - $12,1 \times 10^{-21} \text{ J}$
24. Suhu mula-mula dari suatu gas dalam ruang tertutup  $T$ , tiap partikelnya bergerak secara acak dengan kelajuan 100 m. Jika suhunya menjadi  $4T$ , maka kelajuan tiap partikelnya adalah ....
- 200 m/s
  - 150 m/s
  - 100 m/s
  - 50 m/s
  - 25 m/s
25. Massa sebuah molekul nitrogen sebesar 14 kali massa sebuah molekul hidrogen. Molekul-molekul nitrogen tersebut pada suhu  $294 \text{ K}$  akan memiliki laju rata-rata yang sama dengan molekul hidrogen pada suhu ....
- 100 K
  - 21 K

- b. 56 K
  - c. 34 K
  - e. 15 K
26. Banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu gas sebesar  $1^\circ\text{C}$  disebut ....
- a. energi dalam gas
  - b. energi kinetik gas
  - c. tekanan gas ideal
  - d. kecepatan partikel gas
  - e. kapasitas kalor gas
27. Energi dalam gas ideal merupakan fungsi dari ....
- a. volume
  - b. volume dan suhu
  - c. suhu
  - d. tekanan
  - e. tekanan dan suhu
28. Bila suhu ruang tertutup dinaikkan menjadi 4 kali, maka kecepatan molekul rata-rata menjadi ....
- a. tetap
  - b. 2 kali
  - c. 4 kali
  - d. 6 kali
  - e. setengah kali
29. Pada keadaan normal ( $T = 0^\circ\text{C}$  dan  $p = 1\text{ atm}$ ), 4 gram  $\text{O}_2$  (berat molekul  $M_r = 32$ ) memiliki volume sebesar ( $R = 8314\text{ J/mol K}$ ;  $1\text{ atm} = 10^5\text{ N/m}^2$ ) ....
- a.  $1,4 \times 10^{-6}\text{ m}^3$
  - b.  $2,8 \times 10^{-3}\text{ m}^3$
  - c.  $22,4 \times 10^{-3}\text{ m}^3$
  - d.  $2,8\text{ m}^3$
  - e.  $22,4\text{ m}^3$
30. Sebanyak  $5\text{ m}^3$  gas helium yang bersuhu  $27^\circ\text{C}$  dipanaskan secara isobarik sampai suhu  $87^\circ\text{C}$ . Bila tekanan gas helium  $2 \times 10^5\text{ N/m}^2$ , gas helium melakukan usaha luar sebesar ....
- a. 60 kJ
  - b. 120 kJ
  - c. 280 kJ
  - d. 480 kJ
  - e. 660 kJ
31. Sebuah tabung volumenya 1 L memiliki lubang yang memungkinkan udara keluar dari tabung. Awalnya suhu udara dalam tabung  $27^\circ\text{C}$ . Tabung dipanaskan hingga suhu  $127^\circ\text{C}$ . Perbandingan antara massa gas yang keluar dari tabung dan massa awalnya adalah ....

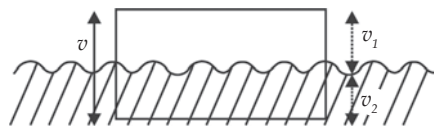
- a. 1 : 2  
b. 1 : 4  
c. 27 : 127
- d. 1 : 27  
e. 1 : 127
32. Sebuah tabung dengan volume tertentu berisi gas ideal dengan tekanan  $p$ . Akar nilai rata-rata kuadrat laju molekul gas disebut  $v$ . Bila di dalam tabung itu dipompakan gas sejenis, sehingga tekanannya menjadi  $2p$  dan suhunya dibuat tetap, maka  $v$ -nya menjadi ....
- a.  $v/2$   
b.  $v$   
c.  $\sqrt{2} v$
- d.  $2 v$   
e.  $4 v$
33. Siklus ideal yang terdiri atas 2 proses, yaitu 2 proses isotermais dan 2 proses adiabatik, adalah siklus ....
- a. Kelvin  
b. Planck  
c. Carnot
- d. Diesel  
e. Otto
34. Berdasarkan grafik di samping, diketahui  $\Delta T = 0$ ,  $\Delta U = 0$ , dan  $\Delta Q = \Delta W$ . Grafik di samping menunjukkan proses ....
- a. isotermais  
b. isokorik  
c. isobarik  
d. adiabatik  
e. isobarik-adiabatik
35. Sejenis gas bervolume 3 L pada suhu  $27^\circ \text{C}$ . Gas ini dipanaskan dengan tekanan dijaga tetap 2 atm, sampai suhunya mencapai  $227^\circ \text{C}$ . Bila diketahui  $1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ , maka kerja yang dilakukan gas sama dengan ....
- a. 402 J  
b. 405 J  
c. 407 J  
d. 409 J  
e. 500 J
36. Pada benda hitam bersuhu  $27^\circ \text{C}$  memancarkan energi sebesar RJ/s. Benda hitam tersebut dipanasi hingga suhunya menjadi  $327^\circ \text{C}$ , energi yang dipanaskan menjadi ....
- a. 16 R  
b. 12 R  
c. 6 R  
d. 4 R  
e. 2 R
37. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tingginya  $727^\circ \text{C}$  mempunyai efisien 30%, maka reservoir suhu rendahnya bersuhu ....



- a.  $327^{\circ}\text{C}$
  - b.  $373^{\circ}\text{C}$
  - c.  $417^{\circ}\text{C}$
  - d.  $427^{\circ}\text{C}$
  - e.  $509^{\circ}\text{C}$
38. Bila reservoir suhu tinggi bersuhu 800 K, maka efisiensi maksimum mesin 40 %. Agar efisiensi maksimum naik menjadi 50%, suhu reservoir tingginya harus menjadi ....
- a. 960 K
  - b. 900 K
  - c. 1.000 K
  - d. 1.180 K
  - e. 1.600 K
39. Mesin kalor Carnot mengambil 1000 kkal dari reservoir  $627^{\circ}\text{C}$ , maka kalor yang dikeluarkan ke reservoir  $27^{\circ}\text{C}$  adalah ....
- a. 43,1 kkal
  - b. 333,3 kkal
  - c. 600 kkal
  - d. 667,6 kkal
  - e. 956,9 kkal
40. Pada diagram  $P$  terhadap  $V$  dapat ....
- a. digambarkan proses isobarik dan isokhorik saja
  - b. digambarkan proses macam apa pun
  - c. digambarkan proses isobarik, isokharik, isotermik, dan adiabatik saja
  - d. digambarkan proses isotermik saja
  - e. hanya dapat digambarkan proses dapat balik dan tidak dapat balik

**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!**

1. Kapal selam menyelam pada kedalaman 20 m, dengan massa jenis air laut  $1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , dan tekanan udara di atas permukaan air laut  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Hitunglah tekanan yang dialami kapal!
2. Sebuah dongkrak hidrolik memiliki pengisap dengan perbandingan 1 : 20. Jika dongkrak tersebut dipergunakan untuk mengangkat mobil yang beratnya  $6 \times 10 \text{ N}$ , berapa gaya paling kecil yang diperlukan?
3. Berat benda di udara 40 N, sedangkan berat benda di air 30 N, dan massa jenis air  $10^3 \text{ kg/m}^3$ . Hitunglah massa jenis benda tersebut!
4. Perhatikan gambar di samping! Benda yang volumenya  $4.000 \text{ cm}^3$  mengapung di dalam air ( $\rho_{\text{air}} = 10 \text{ kg/m}^3$ ). Bagian benda yang muncul di atas permukaan air volumenya  $1.000 \text{ cm}^3$ . Hitunglah massa jenis benda tersebut!
5. Pipa kapiler dimasukkan tegak lurus dalam suatu zat cair yang massa jenisnya  $1,02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Jari-jari pembuluh kapiler  $0,5 \times 10^{-3} \text{ m}$  dan sudut



kontak  $\theta = 30^\circ$ . Tegangan permukaan zat cair  $= 6 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ . Hitunglah naiknya pipa zat cair (besarnya kapilaritas) itu jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ !

6. Berapa kecepatan rata-rata molekul gas  $\text{O}_2$ , bila diketahui massa jenisnya  $0,00128 \text{ g/cm}^3$  dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ?
7. Sepuluh liter gas ideal suhunya  $127^\circ \text{C}$ , memiliki tekanan  $165,6 \text{ N/m}^2$ . Hitunglah banyak partikel gas tersebut?
8. Bila tetapan Boltzmann  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , maka hitunglah energi kinetik sebuah atom gas helium pada suhu  $227^\circ \text{C}$ ?
9. Sebuah mesin Carnot menyerap kalor  $50 \text{ kkal}$  dari reservoir yang bersuhu  $910 \text{ K}$  dan melakukan usaha  $3 \times 10^4 \text{ J}$ . Tentukan suhu  $T_2$ -nya dan efisiensi mesin Carnot!
10. Sejumlah gas ideal dipanaskan pada tekanan konstan  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ , sehingga volumenya berubah dari  $20 \text{ L}$  menjadi  $30 \text{ L}$ . Hitunglah usaha luar yang dilakukan gas selama pemanasan!



## Bab I

### A. Pilihan Ganda

2. d
4. b
6. c
8. a
10. b
12. b
14. d

### B. Essay

2.  $\Delta \mathbf{r} = 80\mathbf{i} + 20\mathbf{j}$ ,  $\Delta r = 82,46 \text{ m}$ ,  $\theta = 14^\circ$
4. a.  $a(t) = (-96t + 4,2) \text{ m/s}^2$  ;  
b.  $a(4) = -34,2 \text{ m/s}^2$ ;  
c.  $a(0) = 4,2 \text{ m/s}^2$

## Bab II

### A. Pilihan Ganda

2. e
4. c
6. a
8. b
10. a
12. c
14. d

### B. Essay

2.  $1,19 \times 10^{29} \text{ N}$
4.  $3,8 \text{ m/s}^2$
6.  $102,7 \text{ N}$
8.  $9,8 \text{ m/s}^2$
10.  $2\sqrt{145} \text{ G}$

## Bab III

### A. Pilihan Ganda

2. a
4. c

6. e

8. b

10. c

### B. Essay

2.  $11 \text{ m/s}$
4.  $2,5 \text{ N}$
6.  $0,013 \text{ J}$
8.  $1,6 \text{ Hz}$
10.  $0,2 \text{ kg}$

## Bab IV

### A. Pilihan Ganda

2. d
4. b
6. b
8. c
10. b

### B. Essay

2. 1:1
4.  $8.000 \text{ N}$
6.  $9,9 \text{ m/s}$
8.  $125 \text{ J}$
10.  $100 \text{ N}$

## Bab V

### A. Pilihan Ganda

2. e
4. d
6. b
8. c
10. e

### B. Essay

2.  $13 \text{ N}$
4. 2 : 1
6.  $200.000 \text{ N}$

8. 40 m/s
10. 25 kg

### Pelatihan Semester Gasal

#### A. Pilihan Ganda

2. e
4. e
6. b
8. b
10. d
12. b
14. e
16. e
18. c
20. b
22. d
24. c
26. e
28. d
30. e
32. d
34. e
36. c
38. d
40. a

#### B. Essay

2. 188 m
6. 30 N
8. 400 J
10. ———

### Bab VI

#### A. Pilihan Ganda

2. c
4. c
6. c
8. e
10. e

#### B. Essay

2. —
4.  $3g \sin \frac{\theta}{2L}$
6. —
8. 5 : 1
10. 0,43

### Bab VII

#### A. Pilihan Ganda

2. a
4. c
6. d
8. b
10. c

#### B. Essay

4. 160 m/s
6. 0,75 g/cm<sup>3</sup>
8. 0,74 g/cm<sup>3</sup>
10. 400 kg/m<sup>3</sup>

### Bab VIII

#### A. Pilihan Ganda

2. a
4. c
6. c
8. c
10. b

#### B. Essay

2. 750 mmHg
4. 2,5 atm
6. 3 kali semula
8. 21 K
10. 200 K

## Bab IX

### A. Pilihan Ganda

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

### B. Essay

- 2. 3.000 J
- 4.  $3 RT$
- 6. 250 K
- 8. 960 K
- 10. 750 K

## Pelatihan Semester Genap

### A. Pilihan Ganda

- 2. a
- 4. c
- 6. a
- 8. d

- 10. c
- 12. b
- 14. e
- 16. d
- 18. d
- 20. d
- 22. e
- 24. a
- 26. e
- 28. b
- 30. a
- 32. b
- 34. a
- 36. a
- 38. a
- 40. c

### B. Essay

- 2.  $3 \times 10^4 \text{ N}$
- 4.  $750 \text{ kg/m}^3$
- 6.  $492,2 \text{ m/s}$
- 8.  $10,5 \times 10^{-21} \text{ J}$
- 10.  $2 \times 10^3 \text{ J}$





- Ardley, Neil. 1996. *Cara Bekerjanya: Panas*. Semarang: Mandira Jaya Abadi.
- Arnold, Guy. 1993. *Energi Nuklir* (Terjemahan). Semarang: Mandira Jaya Abadi.
- Bender, Lionel. 2000. *Bagaimana Cara Kerjanya: Teleskop* (Terjemahan). Semarang: Mandira Jaya Abadi.
- Beiser, Arthur. 1999. *Konsep Fisika Modern* (terjemah). Jakarta: Erlangga.
- Birsyam, M. 1992. *Hukum-Hukum Kekekalan dalam Mekanika*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- Blaatt, Frank J. 1992. *Modern Physics*. McGraw-Hill, Inc.
- Bridgman, Roger. 2000. *Jendela Iptek: Teknologi*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Challoner, Jack. 2000. *Jendela Iptek: Energi*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Foster, Bob. 2006. *1001 Soal dan Pembahasan Fisika*. Jakarta: Erlangga.
- Giancoli. 2001. *Fisika jilid 1,2* (terjemahan). Jakarta: Erlangga.
- Gonick, Larry and Art Huffman. 2002. *Kartun Fisika* (Terjemahan). Jakarta: Gramedia.
- Graham, Ian. 1995. *Alam Semesta* (Terjemahan). Jakarta: Quality Press.
- . 2000. *Kamera* (Terjemahan). Jakarta: Tunggal Kharisma.
- John Gribbin, dan Mary. 2000. *Jendela Iptek: Ruang dan Waktu*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Halliday & Resnick. 1991. *Fisika 1,2* (Terjemahan). Jakarta: Erlangga.
- Hudson Tiner, John. 2005. *100 Ilmuwan* (Terjemah). Batam: karisma Publishing group.
- Isaac, Alan (editor). 1990. *Kamus Lengkap Fisika* (Terjemah). Jakarta: Erlangga
- Kane dan Sternheim. 1991. *Fisika* (Terjemah). Bandung: AIDAB
- Kawanku*. Edisi November, 1990.*Kawanku*. Edisi November, 1990.
- Ketut, Lasmi. 2004. *Bimbingan Pemantapan Fisika*. Bandung: Yrama Widya.
- Lafferty, Peter. 2000. *Jendela Iptek: Gaya dan Gerak*. Jakarta: Balai Pustaka.
- . Tanpa Tahun. *Magnet sampai Dinamo* (Terjemahan). Semarang: Mandira Jaya Abadi.
- . Tanpa Tahun. *Pembakaran dan Peleburan* (Terjemahan). Semarang: Mandira Jaya Abadi.
- Mahayana, Dimitri dan Sugema, Sony. 2006. *IPA Terpadu*. Bandung: Pustaka.
- Orbit*. Edisi Agustus, 2001.*Orbit*. Edisi Agustus, 2001.
- . Edisi September, 2001.

- . Edisi Agustus, 2002.
- . Edisi September, 2002.
- Robson, Pam. 1995. *Listrik* (Terjemahan). Jakarta: Kesaint Blanc Indah Corp.
- Sauvain, Philip. 1996. *Cara Bekerjanya: Gerakan*. Semarang: Mandira Jaya Abadi.
- . 1998. *Cara Bekerjanya: Udara*. Semarang: Mandira Jaya Abadi.
- Setyadi, D. 2001. *Aneka Percobaan Suara*. Bandung: Remaja Rosdakarya.
- Suara Merdeka*. edisi 4 April 2004. *Suara Merdeka*. edisi 4 April 2004.
- . Edisi 2 dan 9 Mei 2004.
- . Edisi 29 Agustus 2004.
- . Edisi 28 November 2004.
- . Edisi 2 dan 9 Januari 2005.
- . Edisi 27 Februari 2005.
- . Edisi 10 April 2005.
- . Edisi 1 Mei 2005.
- Surya, Yohanes. 1999. *Olimpiade Fisika 1,2,3*. Jakarta: Primatika Cipta Ilmu.
- . 2003. *Fisika itu Asyik*. Jakarta: Bina Sumber Daya MIPA.
- . 2004. *Fisika itu Asyik* (Edisi Revisi). Jakarta: Bina Sumber Daya MIPA.
- . 2004. *Fisika itu Asyik* (Edisi Revisi). Jakarta: Bina Sumber Daya MIPA.
- . 2004. *Fisika untuk Semua*. Jakarta: Bina Sumber Daya MIPA.
- Suryaningrat, Widodo. 2006. *Bank Soal Fisika Untuk SMA*. Bandung: M2S.
- Sutrisno, Eddy. Tanpa Tahun. *Buku Pintar Penemu*. Jakarta: Taramedia dan Restu Agung.
- Walpole, Brenda. 2002. *Jarak* (Terjemahan). Semarang: Manunggal Kharisma.
- . 2002. *Temperatur* (Terjemahan). Semarang: Manunggal Kharisma.
- . 2002. *Ukuran* (Terjemahan). Semarang: Manunggal Kharisma.
- . 2002. *Waktu* (Terjemahan). Semarang: Manunggal Kharisma.
- Ward, Alan. 2004. *Air dan Mengapung*. Batam: Quality Press.
- . 2004. *Cahaya dan Warna* (Terjemahan). Batam: Quality Press.
- . 2004. *Gaya dan Energi* (Terjemahan). Batam: Quality Press.
- . 2004. *Gaya Magnet dan Tenaga Listrik* (Terjemahan). Batam: Quality Press.
- . 2004. *Suara dan Musik* (Terjemahan). Batam: Quality Press.
- Zemansky, Sears. 1985. *Fisika untuk Universitas 1* (Saduran bebas). Jakarta: Binacipta.
- . *Fisika untuk Universitas 2* (Saduran bebas). Jakarta: Binacipta.
- . *Fisika untuk Universitas 3* (Saduran bebas). Jakarta: Binacipta.

# Daftar Gambar

Gambar 1.1	Posisi partikel pada bidang XOY. ....	2
Gambar 1.2	Perpindahan partikel dalam selang waktu t. ....	3
Gambar 1.3	Tampilan geometris pada kecepatan sesaat pada saat t sekon ....	6
Gambar 1.4	Tampilan geometris pada saat $t = t_1$ sama dengan kemiringan garis singgung pada $\frac{\Delta v_3}{\Delta t_3}$ ....	13
Gambar 1.5	Luas daerah di bawah grafik a (t) sama dengan nilai ....	16
Gambar 1.6	Lintasan peluru yang ditembakkan dengan kecepatan awal $v_0$ , sudut elevasi , jarak jangkauan R, dan ketinggian h. ....	19
Gambar 1.7	Kecepatan sudut ....	23
Gambar 2.1	Setiap planet bergerak dengan lintasan elips. Luas daerah yang diarsir sama ....	39
Gambar 2.2	Dua benda yang terpisah sejauh r melakukan gaya tarik gravitasi satu sama lain yang besarnya sama meskipun massanya berbeda ....	40
Gambar 2.3	Resultan dua gaya gravitasi $F_{12}$ dan $F_{13}$ akibat benda bermassa $m_2$ dan $m_3$ yang bekerja pada benda $m_1$ ....	40
Gambar 2.4	Prinsip-prinsip neraca puntir Cavendish untuk menentukan nilai G berdasarkan kalibrasi sudut defleksi ....	42
Gambar 2.5	Percepatan gravitasi pada kedalaman tertentu ....	45
Gambar 2.6	Pengaruh susut lintang terhadap gravitasi ....	46
Gambar 2.7	Percepatan gravitasi yang diakibatkan oleh dua benda ....	46
Gambar 3.1	Perubahan bentuk benda akibat pengaruh suatu gaya ....	63
Gambar 3.2	Grafik perbandingan tegangan terhadap regangan untuk baja dan aluminium ....	64
Gambar 3.3	Skema pertambahan panjang pada pegas ....	67
Gambar 3.4	Grafik pertambahan panjang kawat terhadap berat beban ....	68
Gambar 3.5	Grafik antara gaya yang bekerja sebesar F dan pertambahan panjang pegas ....	71
Gambar 3.6	Sistem pegas ....	73
Gambar 3.7	Pegas disusun seri ....	75
Gambar 3.8	Pegas disusun paralel ....	75
Gambar 3.9	Peredam getaran pada mobil ....	77
Gambar 3.10	Pengetahuan mengenai modulus Young bahan sangat penting dalam mendirikan bangunan ....	78
Gambar 3.11	Pemanfaatan bahan elastis pada olahraga ....	78
Gambar 3.12.	Gerak benda pada lantai licin dan terikat pada pegas untuk posisi normal (a), teregang (b), dan tertekan (c) ....	80
Gambar 3.13	Gaya yang bekerja pada bandul sederhana ....	82
Gambar 3.14	Groyeksi gerak melingkar beraturan terhadap sumbu Y merupakan getaran harmonik sederhana ....	83
Gambar 3.15	Kedudukan gerak harmonik sederhana pada saat $E_p$ dan $E_k$ bernilai maksimum dan minimum ....	89

Gambar 4.1	Usaha yang dilakukan oleh gaya $F$ menyebabkan perpindahan sejauh $s$ ....	101
Gambar 4.2	Gaya berat pada benda yang dilempar ke atas bernilai negatif .....	102
Gambar 4.3	Tidak ada usaha jika arah gaya tegak lurus ( $90^\circ$ ) .....	103
Gambar 4.4	Orang yang mendorong tembok tidak melakukan usaha karena tembok tidak bergerak .....	102
Gambar 4.5	Usaha yang dilakukan oleh beberapa gaya pada perpindahan yang berbeda .....	104
Gambar 4.6	Grafik $F$ terhadap $s$ .....	105
Gambar 4.7	Kurva gaya yang berubah-ubah sebagai fungsi posisi .....	105
Gambar 4.8	Air merupakan salah sumber energi yang dapat membangkitkan listrik. Listrik merupakan salah energi yang banyak digunakan manusia. ....	109
Gambar 4.9	Benda memiliki energi potensial karena kedudukannya .....	111
Gambar 4.10	Energi potensial gravitasi benda untuk berbagai bidang acuan .....	111
Gambar 4.11	Hubungan usaha dan energi potensial .....	111
Gambar 4.12	Energi potensial gravitasi pada (a) bidang melingkar dan (b) bidang miring .....	113
Gambar 4.13	Hubungan usaha dan energi kinetik .....	115
Gambar 4.14	Usaha yang dilakukan benda untuk pindah posisi ditentukan dari posisi awal dan akhirnya .....	101
Gambar 4.15	Contoh aplikasi hukum kekekalan energi mekanik .....	120
Gambar 5.1	Grafik impuls .....	132
Gambar 5.2	Hukum kekekalan momentum. ....	136
Gambar 5.3	Bukti hukum kekekalan momentum .....	138
Gambar 5.4	Sistem roket menerapkan hukum kekekalan momentum linear .....	138
Gambar 5.5	Tumbukan lenting sempurna antara dua benda .....	141
Gambar 5.6	Tumbukan tidak lenting yang terjadi antara dua benda .....	142
Gambar 5.7	(a) Ayunan balistik di laboratorium, (b) Skema ayuna balistik. ....	143
Gambar 5.8	Skema tumbukan lenting sebagian .....	143
Gambar 6.1	Pengaruh tiga gaya pada partikel .....	161
Gambar 6.2	Momen gaya yang bekerja pada benda menyebabkan benda berotasi .....	163
Gambar 6.3	Penentuan arah momen gaya dengan kaidah tangan kanan .....	164
Gambar 6.4	Momen inersia .....	165
Gambar 6.5	Momen inersia berbagai benda tegar homogen .....	166
Gambar 6.6	Titik A yang berotasi dengan sumbu O dan jari-jari R memiliki momentum $m \times v$ .....	167
Gambar 6.7	Gaya-gaya yang bekerja pada kedua kutub jarum kompas .....	168
Gambar 6.8	Benda menggelinding pada bidang datar horizontal .....	170
Gambar 6.9	Benda menggelinding pada bidang miring .....	172
Gambar 6.10	Peloncat indah .....	175
Gambar 6.11	Penari balet .....	176
Gambar 6.12	Pemain akrobat .....	176
Gambar 6.13	Sebuah benda dengan titik berat $Z$ .....	177
Gambar 6.14	Keseimbangan stabil .....	185
Gambar 6.15	Keseimbangan labil .....	185
Gambar 6.16	Keseimbangan indeferen .....	185
Gambar 7.1	Prinsip kerja dongkrak hidrolik .....	196
Gambar 7.2	Zat cair dapat dianggap tersusun atas lapisan lapisan air .....	198
Gambar 7.3	Keadaan benda di dalam zat cair .....	202
Gambar 7.4	(a) Hidrometer (b) Bagian-bagian hodrometer .....	203
Gambar 7.5	Jembatan ponton .....	204

<b>Gambar 7.6</b>	(a) Galangan kapal (b) Prinsip mengapung dan tenggelam pada sebuah kapal selam .....	205
<b>Gambar 7.7</b>	(a) Seekor serangga yang mengapung di atas permukaan air (b) Penjepit kertas yang mengapung di permukaan air (c) Tegangan permukaan .....	206
<b>Gambar 7.8</b>	Bukti tegangan permukaan .....	207
<b>Gambar 7.9</b>	(a) Air membasahi dinding kaca (b) Raksa tidak membasahi dinding kaca .....	208
<b>Gambar 7.10</b>	Gaya kohesi dan adhesi pada zat cair yang membasahi dinding dan tidak membasahi dinding .....	208
<b>Gambar 7.11</b>	(a) Jika sudut kontak kurang dari $90^\circ$ , maka permukaan zat cair dalam pipa kapiler naik (b) jika sudut kontak lebih besar dari $90^\circ$ , maka permukaan zat cair dalam pipa kapiler turun .....	210
<b>Gambar 7.12</b>	Analisis gejala kapiler .....	210
<b>Gambar 7.13</b>	Gaya-gaya yang bekerja pada benda yang bergerak dalam fluida .....	212
<b>Gambar 7.14</b>	Supaya dapat melaju dengan cepat, mobil harus aerodinamis .....	216
<b>Gambar 7.15</b>	Debit fluida yang masuk sama dengan yang keluar .....	216
<b>Gambar 7.16</b>	(a) Fluida dinamik (b) Skema untuk menyelidiki tekanan pada fluida mengalir .....	218
<b>Gambar 7.17</b>	Skema persamaan Bernoulli .....	219
<b>Gambar 7.18</b>	Skema persamaan Bernoulli untuk fluida tidak bergerak .....	221
<b>Gambar 7.19</b>	Skema persamaan Bernoulli untuk fluida yang mengalir di dalam pipa horizontal .....	221
<b>Gambar 7.20</b>	Skema persamaan Bernoulli untuk fluida dalam tangki dan terdapat kebocoran dalam ketinggian tertentu .....	222
<b>Gambar 7.21</b>	Lintasan air (fluida) pada tangki berlubang .....	223
<b>Gambar 7.22</b>	Penyemprot racun serangga .....	224
<b>Gambar 7.23</b>	Diagram sebuah karburator .....	224
<b>Gambar 7.24</b>	Venturimeter tanpa sistem manometer .....	225
<b>Gambar 7.25</b>	Venturimeter dengan sistem manometer .....	226
<b>Gambar 7.26</b>	Diagram penampang sebuah pitot .....	227
<b>Gambar 7.27</b>	Garis-garis arus di sekitar sayap pesawat terbang .....	229
<b>Gambar 8.1</b>	Grafik hubungan volume dan tekanan gas pada suhu konstan (isothermal) .....	239
<b>Gambar 8.2</b>	Grafik hubungan volume dan suhu gas pada tekanan konstan (isobarik) .....	240
<b>Gambar 8.3</b>	Grafik hubungan tekanan dan suhu gas pada volume konstan (isokhorik) .....	240
<b>Gambar 8.4</b>	Diagram gerakan molekul gas dalam dinding bejana berbentuk kubus .....	245
<b>Gambar 8.5</b>	(a) Gerak translasi, (b) Gerak rotasi, (c) Gerak vibrasi .....	252
<b>Gambar 9.1</b>	Percobaan kalor dan usaha .....	261
<b>Gambar 9.2</b>	Proses Isobarik .....	262
<b>Gambar 9.3</b>	Proses Isotermal .....	262
<b>Gambar 9.4</b>	Proses Isokorik .....	263
<b>Gambar 9.5</b>	Proses Adiabatik .....	263
<b>Gambar 9.6</b>	Hukum pertama termodinamika .....	267
<b>Gambar 9.7</b>	Siklus termodinamika .....	273
<b>Gambar 9.8</b>	Siklus Carnot .....	274
<b>Gambar 9.9</b>	Siklus mesin pendingin .....	280



## Daftar Tabel



<b>Tabel 2.1</b>	Hubungan $g$ dengan Ketinggian ( $h$ ) .....	44
<b>Tabel 2.2.</b>	Percepatan gravitasi di berbagai tempat .....	46
<b>Tabel 2.3</b>	Percepatan Gravitasi Planet Dibandingkan dengan Bumi .....	53
<b>Tabel 3</b>	Modulus Young Beberapa Jenis Bahan .....	65
<b>Tabel 6.1</b>	Titik Berat Benda Homogen Berbentuk Garis .....	177
<b>Tabel 6.2</b>	Titik Berat Benda Homogen Dimensi Dua .....	178
<b>Tabel 6.3</b>	Titik Berat Benda yang Berupa Selimut Ruang .....	178
<b>Tabel 6.4</b>	Titik Berat Benda Pejal Tiga Dimensi .....	179
<b>Tabel 7.1</b>	Nilai Tegangan Permukaan Beberapa Zat Cair .....	207
<b>Tabel 7.2</b>	Viskositas Beberapa Fluida .....	213
<b>Tabel 9</b>	Proses Termodinamika .....	268



## Glosarium



<b>aliran laminar</b>	:	aliran garis arus suatu fluida yang menunjukkan gerakan fluida dalam bentuk lapisan-lapisan tanpa mengalami fluktuasi atau turbulensi sehingga partikel-partikel berturut melewati titik yang sama akan memiliki kecepatan yang sama
<b>anemometer</b>	:	alat untuk mengukur kelajuan angin atau fluida lain yang mengalir
<b>anemometer</b>	:	alat untuk mengukur kelajuan angin atau fluida lain yang bergerak
<b>atom</b>	:	partikel terkecil dari suatu unsur
<b>balistik</b>	:	ilmu yang mempelajari lintasan terbang proyektil, terutama yang mempunyai lintasan terbang parabolik dari satu tempat ke tempat lain di atas permukaan bumi
<b>daya</b>	:	kecepatan dalam melakukan kerja, diukur dalam satuan joule per detik (watt)
<b>debit</b>	:	volume air yang mengalir dari suatu saluran melalui penampang lintang tertentu dalam satuan waktu
<b>efisiensi</b>	:	ukuran kinerja sebuah mesin, motor, dan lain-lain, yang merupakan perbandingan antara energi atau daya yang dihasilkan terhadap energi atau daya yang diberikan
<b>elastis</b>	:	mudah berubah bentuknya dan mudah kembali ke bentuk awal
<b>elastisitas</b>	:	sifat beberapa bahan tertentu yang memungkinkan bahan tersebut kembali ke ukuran semula setelah tegangan yang diberikan dihilangkan
<b>energi bebas</b>	:	ukuran kemampuan sistem untuk melakukan kerja
<b>energi kinetik</b>	:	energi yang dimiliki suatu benda karena geraknya
<b>energi potensial</b>	:	energi yang tersimpan, misalnya energi pada sebuah pegas yang diregangkan atau energi pada sebuah benda yang terletak di atas tanah
<b>fisika klasik</b>	:	fisika teoritis hingga sekitar awal abad 19, sebelum gagasan teori kuantum (1900) dan relativitas (1905)
<b>gas</b>	:	tingkat wujud zat yang molekul-molekulnya bergerak bebas sehingga seluruh massa cenderung mengembang dan menempati seluruh volume wadahnya
<b>gas</b>	:	wujud materi yang menempati keseluruhan wadah, terlepas dari jumlahnya

<b>gaya angkat</b>	:	gaya yang mengangkat suatu benda seperti pesawat terbang burung ke atas langit
<b>gaya gravitasi</b>	:	gaya tarik menarik yang bekerja di antara dua benda. Gaya gravitasi biasanya cukup besar untuk dapat diperhatikan hanya jika salah satu atau kedua benda tersebut sangat besar, misalnya bumi.
<b>graviatasi</b>	:	fenomena yang dikaitkan dengan gaya gravitasi yang dialami setiap benda yang mempunyai massa dan berada di dalam medan gravitasi bumi
<b>hidrodinamika</b>	:	mempelajari gerkaan zat cair (tidak hanya air) dan aerodinamika (gerakan gas)
<b>hidrostatika</b>	:	memperhatikan perilaku zat cair yang tidak bergerak
<b>hukum dalton</b>	:	tekanan total suatu campuran gas atau uap sama dengan jumlah tekanan parsial komponen-komponennya
<b>hukum hooke</b>	:	tegangan yang diberikan pada zat padat sebanding denganregangan yang dihasilkannya dalam batas elastik zat padat
<b>impuls</b>	:	hasil kali gaya yang bekerja pada suatu benda dan lamanya gaya itu bekerja
<b>isobarik</b>	:	mempunyai tekanan sama atau tetap, baik terhadap ruang maupun waktu
<b>isokorik</b>	:	keadaan volume yang sama atau tetap, baik terhadap ruang maupun waktu
<b>joule</b>	:	satuan yang digunakan untuk mengukur jumlah energi
<b>kalori</b>	:	jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur 1 gram air sebanyak 1° C
<b>kapasitas panas</b>	:	perbandingan panas yang diberikan pada sebuah benda atau bahan uji terhadap kenaikan temperatur yang diakibatkannya
<b>kapiler</b>	:	pipa (tabung) dengan garis tengah yang sangat kecil
<b>katalisator</b>	:	substansi yang mempunyai kemampuan untuk mempercepat reaksi kimia, tetapi tetap tersisa dan tidak berubah pada akhir reaksi
<b>kelembaman</b>	:	perlawanan kepada segala perubahan dalam gerakan yang dimiliki oleh setiap benda; kelembaman melawan permulaan, penghentian, percepatan, perlambatan, dan perubahan arah
<b>medan gravitasi</b>	:	suatu daerah dalam ruang yang menyelimuti suatu benda yang memiliki sifat massa
<b>mekanika fluida</b>	:	ilmu mengenai fluida yang tidak bergerak dan yang bergerak



<b>mekanika fluida</b>	:	mempelajari tentang interaksi antara gaya-gaya dengan fluida
<b>mengelinding</b>	:	bergerak memutar dan berguling-guling
<b>meniskus</b>	:	bentuk cembung atau cekung permukaan zat cair di dalam tabung akibat tegangan permukaan
<b>molekul</b>	:	partikel kecil suatu benda yang terdiri atas sejumlah atom yang saling bergabung
<b>momentum</b>	:	besaran yang berkaitan dengan benda yang besarnya sama dengan hasil kali massa benda yang bergerak itu dengan kecepatan geraknya
<b>muatan</b>	:	sifat yang dimiliki beberapa partikel elementer yang menyebabkan interaksi antara partikel-partikel ini dan akibatnya menimbulkan fenomena bahan yang dinyatakan sebagai kelistrikan
<b>nol mutlak</b>	:	suhu terkecil yang masih memungkinkan ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ atau $0\text{ K}$ )
<b>panas laten</b>	:	sejumlah panas yang diserap oleh benda cair untuk penguapan atau benda padat untuk peleburan
<b>panas</b>	:	proses perpindahan energi dari satu benda atau sistem ke benda atau sistem lain akibat selisih temperatur
<b>pernapasan</b>	:	proses yang terjadi pada makhluk hidup untuk menghasilkan energi dari makanan, terutama karbohidrat
<b>presisi</b>	:	gerakan yang terjadi pada saat roda berputar dan berputar; gerakannya terjadi pada sudut yang tepat dengan arah putaran as
<b>proses adiabatik</b>	:	proses yang berlangsung tanpa adanya panas yang keluar atau masuk suatu sistem
<b>pusat massa</b>	:	sebuah titik yang dapat dianggap sebagai konsentrasi seluruh massa sebuah benda
<b>radiasi</b>	:	energi yang dapat merambat di ruang hampa: panas merambat di ruang hampa sebagai radiasi inframerah
<b>refrigerant</b>	:	cairan yang berputar dalam pipa-pipa lemari es dan menguap untuk menghasilkan pendinginan
<b>siklus</b>	:	sekelompok perubahan pada sebuah sistem yang berulang secara beraturan yang mengembalikan semua parameternya ke nilai awal satu kali untuk setiap kelompok perubahan
<b>sublimasi</b>	:	proses sebuah benda padat langsung berubah menjadi benda gas tanpa berubah dulu ke bentuk cair
<b>termodinamika</b>	:	ilmu yang mempelajari hukum-hukum yang mengatur perubahan energi dari satu bentuk ke bentuk yang lain, arah aliran panas, dan kemampuan energi melakukan kerja

<b>termokopel</b>	:	piranti yang terdiri atas dua kawat logam atau semikonduktor tak sejenis yang dilas menjadi satu pada ujung-ujungnya
<b>titik didih</b>	:	temperatur ketika keadaan tekanan uap jenuh suatu cairan sama dengan tekanan atmosfer luar
<b>titik lebur</b>	:	suhu sebuah benda padat akan berubah menjadi benda cair
<b>torka</b>	:	hasil kali gaya dengan jarak tegak lurus dari suatu titik yang merupakan pusat putaran atau torsi
<b>torr</b>	:	satuan tekanan, yang digunakan dalam teknologi vakum tinggi, didefinisikan sebagai 1mmHg
<b>torsi</b>	:	deformasi puntir yang dihasilkan oleh torka atau kopel
<b>tumbukan elastik</b>	:	tumbukan yang mengakibatkan jumlah keseluruhan energi kinetik benda-benda yang bertumbukan setelah tumbukan sama dengan jumlah keseluruhan energi kinetik sebelum tumbukan
<b>vibrasi</b>	:	gerakan maju mundur yang cepat; molekul-molekul substansi akan bergetar (bervibrasi) lebih cepat apabila dipanaskan
<b>viskositas</b>	:	sifat fisik zat yang bergantung pada geseran molekul komponennya, kekentalan
<b>bandul</b>	:	benda tegar yang berayun di sekitar suatu titik tetap
<b>fotoelastisitas</b>	:	efek yang menunjukkan bahwa beberapa bahan tertentu mengalami pembiasan ganda bila diberi tegangan
<b>tabung pitot</b>	:	piranti untuk mengukur laju fluida
<b>panjang planck</b>	:	ukuran panjang yang menunjukkan tidak berlakunya penjelasan klasik mengenai gravitasi, sebaliknya harus dihitung secara mekanika kuantum
<b>pompa</b>	:	piranti yang memberikan energi pada fluida dengan tujuan untuk memindahkannya dari satu tempat atau tingkat ke tempat atau tingkat lain, atau untuk menaikkan tekanannya
<b>perenggangan</b>	:	penurunan tekanan suatu fluida, yang berarti penurunan kerapatannya



# Indeks Subjek dan Pengarang



## A

Aturan sinus segitiga 159  
Ayunan balistik 129, 142, 143

## B

Benda tegar 159, 160, 161, 166, 174, 188, 190, 191  
Blaise Pascal 196, 215

## C

Christiaan Huygens 135

## D

Derajat kebebasan 237, 239, 251, 252, 254, 255

## E

Efisiensi mesin Carnot 259, 275, 276, 285  
Ekipartisi 237, 239, 251, 254  
Elastisitas 61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 94, 97  
Energi 99, 100, 101, 102, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 124, 125, 126, 127  
Energi dalam 238, 252, 253, 254, 257, 259, 264, 267, 268, 270, 273, 274, 282, 284  
Energi getaran harmonik 61, 88  
Energi kinetik 99, 100, 101, 113, 114, 115, 116, 117, 120, 122, 124, 125, 126, 127  
Energi mekanik 99, 100, 109, 117, 118, 120, 122, 124  
Energi potensial 99, 100, 101, 110, 111, 112, 113, 117, 119, 120, 122, 127  
Energi potensial pegas 61, 63, 74, 75  
Entropi 259, 260, 277, 278, 279, 281, 282, 284

## F

Fluida 193, 195, 196, 198, 205, 212, 213, 214, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 226, 228, 230, 233, 235  
Fluida ideal 193, 195, 212, 216  
Fluida sejati 193, 195, 212  
Frekuensi 99, 129, 159, 193, 237, 259

## G

Galileo Galilei 18  
Garis alir 193, 216  
Garis-garis medan gravitasi 37  
Gas ideal 237, 238, 239, 242, 243, 245, 247, 249, 251, 252, 254, 255, 256, 257, 258  
Gaya dalam 129  
Gaya gravitasi 37, 38, 40  
gaya gravitasi 38, 40, 41, 42, 44, 47, 49, 50, 52, 55, 56, 59, 60  
Gaya impulsif 129, 146  
Gaya luar 129, 137  
Gejala kapilaritas 193, 210, 211, 233  
Gejala miniskus 193  
Gerak 99, 102, 114, 116, 118, 124, 159, 160, 161, 163, 166, 169, 170, 171, 174, 175, 176, 184, 190  
Gerak parabola 1, 2, 19, 31, 32  
Gerak rotasi 159, 161, 163, 171  
gerak rotasi 160, 163, 166, 170, 174, 184, 190  
Getaran harmonik 61, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 89, 93, 96

## H

Hidrometer 193, 195, 203  
Hukum 129, 131, 132, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 143, 145, 146  
Hukum Boyle 237, 238, 239, 240, 241, 243, 254, 258  
Hukum Charles 237, 238, 239, 240  
Hukum Gay Lussac 237  
hukum gravitasi Newton 37, 39, 40, 43, 44, 48, 55  
Hukum Hooke 61, 62, 68, 69, 70, 76, 79  
Hukum I Termodinamika 259, 260, 267, 268, 270, 275, 276  
Hukum II Termodinamika 259, 260, 276, 277  
Hukum kekebalan momentum sudut 159  
Hukum kekekalan energi mekanik 99, 100, 117, 118, 120, 122  
Hukum Kepler 37, 39, 53, 54

## I

Impuls 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 140, 145, 146, 149

## J

James Prescott Joule 108

Jarak 1, 2, 10, 19, 20, 21, 22, 23, 34, 38, 39, 40, 41, 43, 50, 51, 52, 54, 57, 59, 60, 63, 101, 110, 114, 115, 117, 124, 125, 127

Jembatan Ponton 193, 195, 203, 204, 205

Johannes Kepler 53, 54

Joseph Louis Gay Lussac 241

## K

Kapasitas kalor 259, 269, 272, 282

Karburator 193, 195, 222, 224, 233

Keadaan standar 237, 254

Kecepatan 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 49, 50, 51, 52, 55, 60, 61, 62, 73, 74, 75, 83, 84, 86, 87, 88, 92, 96, 97, 98, 102, 113, 114, 117, 118, 121, 123, 124, 125, 126, 127

Kecepatan getaran harmonik 61, 86

Kecepatan relatif 1

Kekekalan momentum 129, 131, 136, 137, 138, 139, 141, 145

Koefisien restitusi 129, 143, 144, 149

Kontinuitas 193, 195, 216, 217, 219, 225

Kuat medan gravitasi 37, 38, 44, 55, 56, 59

## L

Lengan gaya 159, 163, 164

Lenting sebagian 129, 140, 142, 143, 145

Lenting sempurna 129, 130, 140, 141, 142, 143, 145

Lord William Thomson Kelvin 266

## M

Makroskopik 237

Medan 37, 38, 44, 55, 56, 58, 59

Medan gravitasi 37, 38, 44, 55, 56, 58, 59

Mesin pendingin 259, 260, 280, 281

Mikroskopik 237, 238, 239

Modulus Young 61, 66, 67, 69

Momen gaya 159, 160, 162, 163, 164, 165, 174, 175, 183, 184, 188, 192

Momen inersia 159, 163, 165, 166, 167,

168, 171, 173, 176, 187, 188, 191

Momen kopel 159, 168, 169, 183, 188

Momen sudut 159

Momentum 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 144, 145, 147, 150

## N

Neraca Cavendish 37

Nicolas Leonardi Sadi Carnot 274

## P

Percepatan 1, 2, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 80, 81, 83, 87, 93, 95, 97, 102, 110, 114, 125, 127

Percepatan getaran harmonik 61, 86

Percepatan gravitasi 37, 44, 45, 46, 47, 48, 53, 56, 57

Perpindahan 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 30, 32, 35, 72, 96, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 112, 122

Persamaan Bernoulli 193, 195, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 228

Perubahan energi 99, 100, 109, 112, 116, 117

Posisi sudut 1, 2, 24, 25, 26, 27, 28, 35, 85

Proses adiabatik 259, 262, 263, 264, 265, 274, 282, 284

Proses ekspansi 259, 262

Proses isobarik 259, 262, 263, 266, 269, 270, 272, 273, 274, 281, 282, 284

Proses isothermal 259, 262, 263, 266, 268, 273, 274, 281

## R

Regangan 61, 64, 65, 66, 67

Resultan gaya 159, 174, 177

Robert Hooke 69, 71, 81

Rumus Poisson 259

## S

Siklus Carnot 259, 273, 274, 275

Simpangan getaran harmonik 61, 84

Sumber-sumber energi 99

Susunan paralel pegas 61

## T

Tabung pitot 193, 222, 227, 233  
Tegangan 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68  
Tegangan permukaan 193, 195, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 214, 215, 233  
Tekanan 193, 195, 196, 198, 199, 204, 205, 215, 216, 218, 219, 221, 222, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 231, 233, 234, 235  
Tekanan hidrostatistik 193  
Tetapan Boltzmann 237  
Tetapan Laplace 259, 264, 265, 271, 272  
Tidak lenting sama sekali 129  
Titik berat benda 159, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 185  
Translasi 159, 161, 169, 170, 171, 174, 184, 189  
Tumbukan 129, 130, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 147, 149, 150

## U

Usaha 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 111, 112, 115, 116, 117, 119, 120, 122, 127, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 273, 274, 275, 277, 280, 281, 282, 284, 286

## V

Vektor 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 17, 18, 30, 31, 33, 35, 38, 41, 47, 127  
Vektor kecepatan 1, 2, 8, 18, 31  
Vektor percepatan 1, 2, 31, 47  
Vektor posisi 1, 2, 5, 9, 10, 11, 18, 30, 31, 33, 35  
Vektor satuan 1, 2, 3, 127  
Venturimeter 193, 195, 222, 224, 225, 226, 227  
Viskositas 193, 212, 213, 214, 233

## Y

Yohanes surya 29, 30



## Alfabet Yunani

Nama	Huruf Besar	Huruf Kecil	Nama	Huruf Besar	Huruf Kecil
Alpha			Nu		
Beta			Xi		
Gamma			Omcron		
Delta			Pi		
Epsilon			Rho		
Zeta			Sigma		
Eta			Tau		
Theta			Upsilon		
Iota			Phi		
Kappa			Chi		
Lambda			Psi		
Mu			Omega		

## Bilangan-Bilangan Konstanta

Nama Besaran	Simbol	Harga
Kecepatan cahaya dalam vakum	$c$	2,9979 $10^8$ ms <sup>-1</sup>
Muatan elektron	$q_e$	-1,602 $10^{-19}$ C = -4,803 $10^{-10}$ stC
Massa diam elektron	$m_e$	9,108 $10^{-31}$ kg
Perbandingan muatan elektron terhadap massanya	$q_e/m_e$	1,759 $10^{11}$ C kg <sup>-1</sup> = 5,273 $10^{17}$ stC g <sup>-1</sup>
Konstanta Planck	$h$	6,625 $10^{-34}$ Js
Konstanta Boltzmann	$k$	1,380 $10^{-23}$ JK <sup>-1</sup>
Bilangan Avogadro (skala kimia)	$N_o$	6,023 $10^{23}$ molekul mol <sup>-1</sup>
Konstanta universal gas (skala kimia)	$R$	8,314 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Kesetaraan mekanikal dari panas	$y$	4,185 $10^3$ J kal <sup>-1</sup>
Standar tekanan atmosfer	1 atm	1,013 $10^5$ N m <sup>-2</sup>
Volume gas sempurna pada 0° C dan 1 atm (skala kimia)	–	22,415 lliter mol <sup>-1</sup>
Suhu nol mutlak	0 K	-273,16° C
Percepatan akibat gaya berat (pada muka laut di khatulistiwa)	$g$	9,78049 ms <sup>-2</sup>
Konstanta universal gravitasi	$G$	6,673 $10^{-11}$ Nm <sup>2</sup> kg <sup>-2</sup>
Massa bumi	$m_E$	5,975 $10^{24}$ kg
Radius bumi rata-rata	–	6,371 $10^6$ m = 3.959 mil
Radius khatulistiwa bumi	–	6,378 $10^6$ m = 3.963 mil
Jarak rata-rata dari bumi ke matahari	1 AU	1,49 $10^{11}$ m = 9,29 $10^7$ mil
Eksentrik orbit bumi	–	0,0167
Jarak pukul-rata dari bumi ke bulan	–	3,84 $10^8$ = 60 radius bumi
Diameter matahari	–	1,39 $10^9$ = 8,64 $10^5$ mil
Massa matahari	$m_s$	1,99 $10^{30}$ kg = 333.000 massa bumi
Konstanta hukum Coulomb	$C$	8,98 $10^9$ Nm <sup>2</sup> C <sup>-2</sup>
Konstanta Faraday (1 faraday)	$F$	96.500 C mol <sup>-1</sup>
Massa atom hidrogen netral	$m_H^1$	1,008142 amu
Massa proton	$m_p$	1,007593 amu
Massa neutron	$m_n$	1,008982 amu
Massa elektron	$m_e$	5,488 $10^{-4}$ amu
Perbandingan massa proton terhadap massa elektron	$m_p/m_e$	1836,12
Konstanta Rydberg untuk inti partikel yang kecil sekali		109.737 cm <sup>-1</sup>
Konstanta Rydberg untuk hidrogen	$R_H$	109.678 cm <sup>-1</sup>
Konstanta hukum pergeseran Wien	–	0,2898 cmK <sup>-1</sup>
Konstanta bilangan	–	=3,142; e = 2,718; = 1,414





Blank lined paper for writing.







# FISIKA 2

Untuk SMA/MA Kelas XI

**M**akin Anda mengenal alam, makin sayang Anda kepadanya. Fisika merupakan salah satu pintu mengungkap rahasia alam semesta yang menyembunyikan berjuta keajaiban. Buku ini mencoba mengungkap alam semesta dengan bahasa fisika yang sederhana, mudah dipahami, dan enak untuk dibaca.

Materi dalam buku ini disajikan secara sistematis, dilengkapi dengan contoh soal, gambar ilustrasi, dan diakhiri dengan peta konsep yang memudahkan Anda untuk memahami materi secara keseluruhan. Soal kompetensi dalam buku ini merupakan barometer tingkat pemahaman Anda terhadap materi yang telah dipelajari. Untuk memacu kreativitas dalam bereksperimen, mengasah kemampuan menulis, dan menyampaikan pendapat, buku ini menyediakan kolom kegiatan, diskusi, dan ilmuwan yang disusun sesuai materi, pemahaman, dan tingkat perkembangan Anda.

Untuk memudahkan dalam memahami isi buku, disediakan kata kunci, rangkuman, indeks, dan glosarium. Penyegaran ingatan dan penambahan khazanah keilmuan di sajikan buku ini melalui kolom tokoh dan info kita. Anda bisa memahami perjuangan tokoh sains sepanjang sejarah dan mengetahui betapa banyak keasyikan serta manfaat fisika dalam kehidupan manusia yang dapat membuat Anda bangga mempelajari fisika.

ISBN 978-979-068-166-8 (no jld lengkap)  
ISBN 978-979-068-174-3

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Republik Indonesia 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) Rp19.386,-