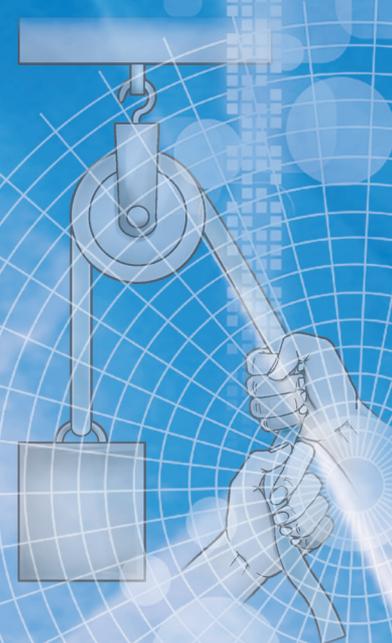




Siswanto . Sukaryadi

# KOMPETENSI FISIKA



Kelas  
**XI**

**Untuk SMA/MA**



PUSAT PERBUKUAN  
Departemen Pendidikan Nasional

Siswanto . Sukaryadi

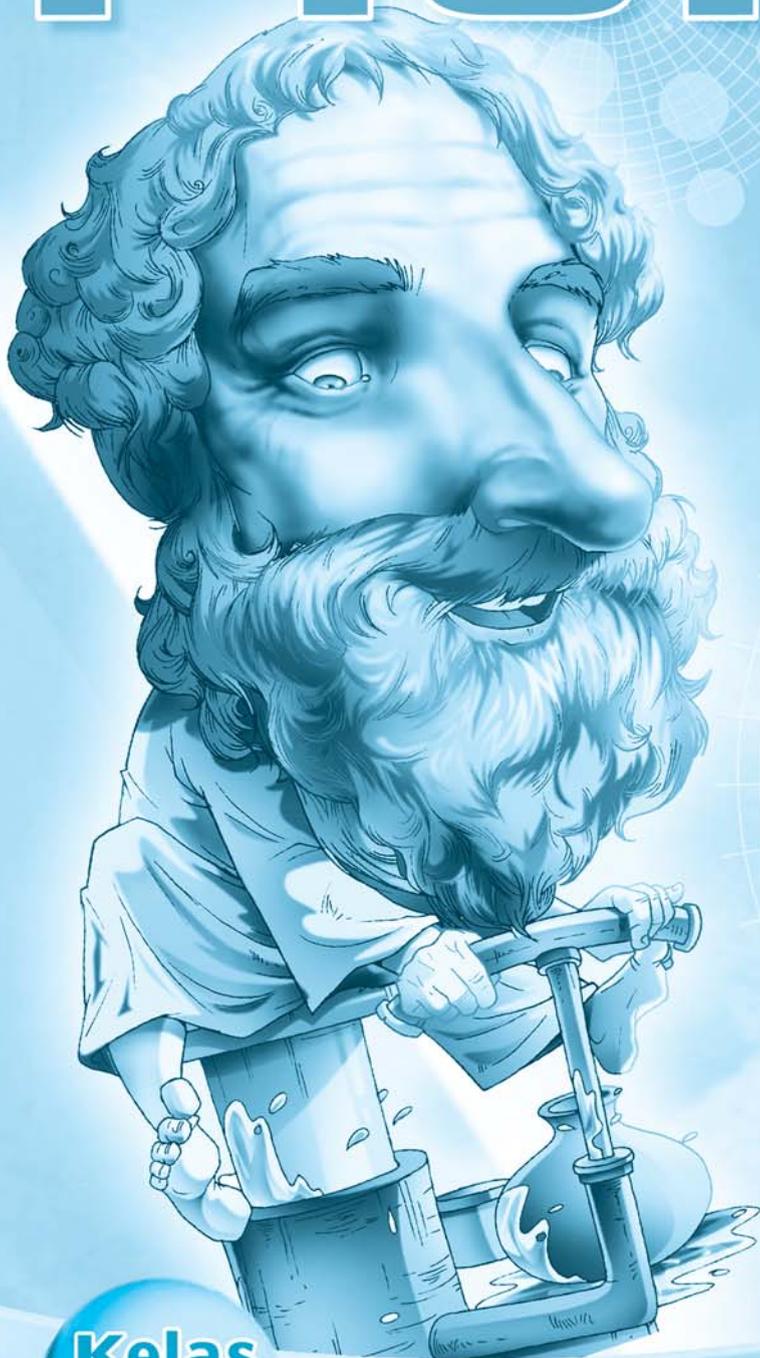
KOMPETENSI  
FISIKA

Untuk SMA/MA

Kelas XI

Siswanto . Sukaryadi

# KOMPETENSI FISIKA



Kelas  
**XI**

Untuk SMA/MA



PUSAT PERBUKUAN  
Departemen Pendidikan Nasional

**Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional  
Dilindungi oleh Undang-undang**

**Penyusun**

Siswanto · Sukaryadi

**Editor**

Intan Mahanani

**Penyelar Bahasa**

M. Taufiq · Kus Dwiyatmo B. · Farida Puji P.

**Penata Artistik**

Wahyu Hardianto · Sukendar · Inawati

**Ilustrator**

Sigit Dwi Nugroho · Sunardi · Bambang Sugiarto

**Penata Grafika**

Yuniar Adhi Anggoro · Ika Kristiyaningsih · Sri Rahayu · Ibnu Wibowo

530.07

SIS

SISWANTO

k

Kompetensi Fisika : Untuk SMA/MA Kelas XI / Penyusun Siswanto,  
Sukaryadi ;  
Editor Intan Mahanani ; Ilustrator Sigit Dwi Nugroho, Sunardi, Bambang  
Sugiarto. — Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional,  
2009.

vi, 242 hlm. : illus. : 29 cm.

Bibliografi : hlm. 242

Indeks

ISBN 978-979-068-233-7 (No.Jil.Lengkap)

ISBN 978-979-068-235-1

1.Fisika- Studi dan Pengajaran I. Judul II. Sukaryadi III. Intan Mahanani  
IV. Sigit Dwi Nugroho V. Sunardi VI. Bambang Sugiarto

Hak Cipta Buku ini telah dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional  
dari penerbit Citra Aji Parama

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan Departemen Pendidikan Nasional  
Tahun 2009

Diperbanyak oleh .....

## Kata Sambutan

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

## Fisika? Yes I Can!

Judul di atas merupakan cermin dari sikapmu yang telah memilih jurusan IPA sebagai pembuka jalan untuk merintis masa depan yang lebih cemerlang. Judul itu juga mencerminkan bahwa kamu adalah generasi yang optimistis, berani menerima tantangan, selalu tanggap terhadap keadaan, dan siap menyelesaikan masalah dengan penuh tanggung jawab. Demikian juga dengan belajar, tidak ada istilah malas dan menyerah pada permasalahan. Siap menghadapi apa pun yang ada pada pelajaran fisika. "Yes, I can!" adalah semboyan yang paling tepat.

Fisika bukanlah hal yang menakutkan tetapi sesuatu yang asyik untuk dipelajari, dipahami, dan dikembangkan. Kamu tidak percaya? Coba saja pelajari dan praktikkan apa-apa yang ada di buku ini. Dengan belajar menggunakan buku ini, kamu dapat mengetahui bagaimana fisika mengungkap fenomena kejadian alam. Melalui buku ini kamu diajak berlatih membangun pengetahuan fisika dengan teknologi untuk diterapkan dalam kehidupan sehari-hari.

Buku Fisika ini tidak hanya menyodorkan sekumpulan konsep dan rumus-rumus. Lebih dari itu, buku ini menampilkan berbagai kegiatan eksperimen guna membimbingmu menjadi seorang peneliti andal. Dengan melakukan kegiatan eksperimen, kamu diajak berlatih sebagaimana ilmuwan bekerja untuk melakukan eksplorasi terhadap fenomena-fenomena alam.

Melakukan kegiatan eksperimen fisika dengan panduan buku ini, kamu lebih terbantu dalam menggali potensi yang kamu miliki. Buku ini dirancang sedemikian rupa sehingga belajar fisika bukan sebagai beban berat, melainkan suatu aktivitas yang menyenangkan. Kegiatan eksperimen yang disajikan di dalam buku ini ibarat petualangan yang menyenangkan. Kamu akan asyik melakukannya dan tentu saja mendapatkan pengalaman yang sangat berharga dan akan berguna di masa mendatang.

Kamu tentu tidak asing lagi dengan nama **Sir Isaac Newton**. Dia adalah seorang tokoh fisika klasik dari Inggris. Dia terkenal ulet, rajin, dan pantang menyerah dalam mewujudkan ide-ide maupun penelitiannya. Banyak sumbangan pemikiran yang diberikan Newton demi kemajuan ilmu fisika, khususnya fisika klasik. Buku ini juga berupaya memunculkan Newton-Newton muda dari Indonesia yang juga memiliki pemikiran cemerlang dalam mengembangkan ilmu fisika. Dan itu adalah kalian semua.

Selamat belajar, selamat bereksperimen, selamat menggali potensi diri, dan . . . sukses!

Yogyakarta, Mei 2007

Penulis

# Petunjuk Penggunaan Buku bagi Siswa

Buku ini memuat rubrikasi seperti diuraikan secara singkat berikut. Bacalah dengan cermat!



## Judul Bab

Bagian ini berisi kompetensi dasar yang akan dibahas dalam setiap bab. Kompetensi dasar disajikan dalam bentuk dialog komik sehingga lebih familier dan menarik.

Selengkapnya dapat kamu baca yang berikut ini.



## Gerbang dan Subbab

Sebelum masuk pada materi, kamu akan menjumpai **gerbang**, sebagai pembuka wacana. Di sini diinformasikan secara singkat materi yang akan dibahas pada bab tersebut. Untuk mempermudah pemahaman, kamu juga dipandu dengan kata-kata kunci. Selanjutnya disajikan materi utama yang dijabarkan ke dalam beberapa subbab.



### Kerja Mandiri

Kerja mandiri merupakan pelatihan yang harus kamu kerjakan sendiri. Pelatihan ini untuk mengetahui pemahamanmu terhadap materi pokok.



### Sebaiknya Tahu

Rubrik ini memberikan pengetahuan tambahan yang berkaitan dengan materi.



### Kerja Berpasangan

Kegiatan ini untuk dikerjakan bersama teman sebangku atau teman pilihanmu.



### Rangkuman

Berupa materi ringkas yang ada pada akhir materi. Rangkuman sangat membantumu dalam menguasai materi.



### Kerja Kelompok

Kegiatan ini harus kamu laksanakan bersama kelompokmu. Kegiatan tersebut untuk memupuk rasa kebersamaan.



### Praktikum

Melalui kegiatan ini kamu dilatih menjadi seorang peneliti andal.



### Uji Kompetensi

Rubrik ini berupa soal-soal latihan, bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kompetensi yang kamu capai setelah mempelajari materi satu bab.



### Diskusi

Selain tersebut di atas, kamu juga dilatih menyampaikan pendapat melalui diskusi. Di sinilah kamu belajar berargumentasi dan berbicara kritis.



### Soal Akhir Semester

Di sinilah kamu diuji kompetensimu setelah mengenyam pelajaran selama satu semester. Tunjukkan kemampuanmu dengan penuh percaya diri!

# Daftar Isi

Halaman Judul .....	i
Copyright .....	ii
Kata Sambutan .....	iii
Kata Pengantar .....	iv
Petunjuk Penggunaan Buku bagi Siswa .....	v
Daftar Isi .....	vi
<b>Bab 1 Kinematika dengan Analisis Vektor</b>	
A. Gerak Lurus .....	2
B. Gerak Parabola .....	22
C. Gerak Melingkar .....	27
Soal-soal Uji Kompetensi .....	36
<b>Bab 2 Hukum Gravitasi Newton</b>	
A. Gravitasi .....	40
B. Hukum-hukum Newton tentang Gerak .....	48
C. Penerapan Hukum Gravitasi Newton pada Benda-benda Angkasa .....	51
Soal-soal Uji Kompetensi .....	55
<b>Bab 3 Getaran</b>	
A. Ayunan Bandul Sederhana .....	58
B. Gaya Pegas .....	60
C. Persamaan Gerak Harmonik Sederhana .....	63
D. Elastisitas .....	71
Soal-soal Uji Kompetensi .....	77
<b>Bab 4 Usaha, Energi, dan Daya</b>	
A. Usaha .....	80
B. Energi .....	83
C. Kaitan Antara Usaha dan Energi .....	89
D. Daya .....	92
Soal-soal Uji Kompetensi .....	97
<b>Bab 5 Impuls dan Momentum</b>	
A. Momentum .....	100
B. Impuls .....	102
C. Hukum Kekekalan Momentum .....	103
D. Macam-macam Tumbukan .....	105
E. Koefisien Restitusi Benda Jatuh .....	109
Soal-soal Uji Kompetensi .....	112



Soal-soal Akhir Semester 1 .....	115
<b>Bab 6 Momentum Sudut dan Rotasi Benda Tegar</b>	
A. Momen Gaya .....	120
B. Momen Inersia Rotasi Benda Tegar .....	122
C. Persamaan Lain Gerak Rotasi Benda Tegar .....	126
D. Energi Kinetik Rotasi .....	128
E. Menghitung Momen Inersia atau Kelembaman Benda-benda Homogen .....	131
F. Katrol Tetap .....	136
G. Merggelinding .....	139
H. Kesetimbangan Benda Tegar .....	140
Soal-soal Uji Kompetensi .....	146
<b>Bab 7 Fluida</b>	
A. Fluida Statik .....	150
B. Fluida Dinamik .....	165
Soal-soal Uji Kompetensi .....	178
<b>Bab 8 Teori Kinetik Gas</b>	
A. Teori Gas Ideal .....	182
B. Tekanan, Suhu, dan Energi Kinetik Gas .....	188
Soal-soal Uji Kompetensi .....	197
<b>Bab 9 Termodinamika</b>	
A. Usaha dan Hukum I Termodinamika .....	200
B. Siklus Termodinamika dan Hukum II Termodinamika .....	216
C. Hukum III Termodinamika .....	225
Soal-soal Uji Kompetensi .....	228
Soal-soal Akhir Semester 2 .....	230
Glosarium .....	235
Indeks .....	238
Kunci Jawaban Soal Terpilih .....	240
Daftar Pustaka .....	242



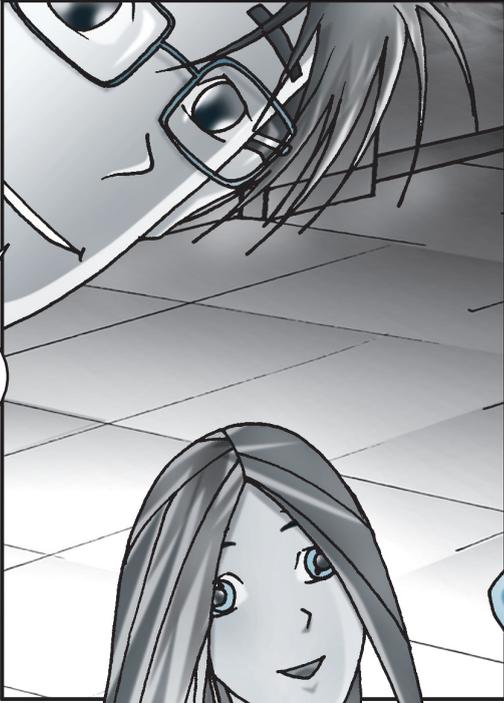
# BAB

# 1

## KINEMATIKA DENGAN ANALISIS VEKTOR



Pada bab pertama ini kita akan mempelajari kinematika dengan analisis vektor. Kita belajar tentang gerak tanpa membahas gaya penyebabnya.

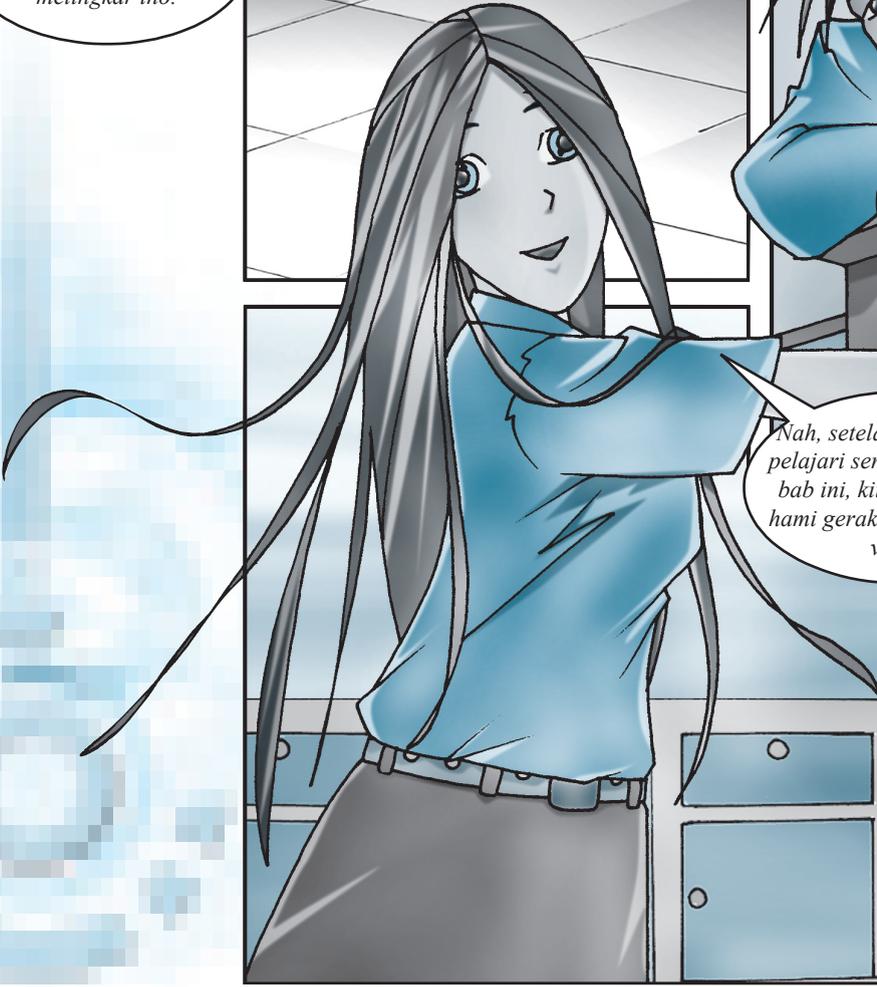


Selain gerak lurus, kita juga mempelajari gerak parabola dan gerak melingkar lho.



Di sini kita akan membahas posisi, kecepatan dan percepatan pada gerak lurus yang dianalisis secara vektor.

Ya, gerak lurus, gerak parabola, dan gerak melingkar kita analisis secara vektor dengan menggunakan diferensial dan integral.



Nah, setelah selesai mempelajari semua materi pada bab ini, kita dapat memahami gerak dengan analisis vektor.



Gambar 1.1 Mobil balap Formula 1

Melihat tayangan balap mobil atau balap motor di televisi memang sangat mengasyikkan. Apalagi jika pembalap yang kita jagokan menang, tentu hati kita turut gembira. Sebaliknya, jika pembalap yang kita jagokan kalah, kita turut bersedih dan bahkan kecewa. Sebenarnya ada yang lebih menarik lagi dari balap mobil atau motor tersebut. Jika kita kaitkan dengan fisika ternyata terdapat ilmu di balik kegiatan itu, yaitu ilmu tentang gerak.

Sebelum acara balap dimulai, semua pembalap berhenti (diam) di belakang garis start. Tetapi, begitu isyarat (lampu start) menyala, para pembalap itu memacu mobil atau motornya bergerak cepat meninggalkan tempat start. Nah, inilah di antaranya yang akan dibahas pada bab ini.

Pada bab 1 ini kamu akan diajak membahas salah satu cabang ilmu fisika, yaitu kinematika. Kinematika adalah ilmu yang mempelajari tentang gerak suatu benda tanpa memperhatikan penyebabnya. Apa saja yang akan dibahas? Perhatikanlah kata kunci berikut ini dan simak uraian di bawahnya!

**Kata Kunci:** Gerak Lurus – Perpindahan – Percepatan – Gerak Melingkar

## A. Gerak Lurus

Di kelas X semester I kamu telah belajar tentang gerak benda. Bagaimana suatu benda dikatakan bergerak? Apa saja tolok ukur bahwa benda itu dikatakan bergerak?

Suatu benda dikatakan bergerak apabila benda mengalami perubahan posisi terhadap titik acuan tertentu. Sebagai contoh adalah mobil balap dengan garis start sebagai titik acuan. Mobil balap dapat dikatakan

bergerak jika mobil itu berubah posisinya dari garis start.

Berdasarkan bentuk lintasan yang ditempuh oleh suatu benda, gerak dibedakan menjadi tiga, yaitu gerak lurus, gerak parabola, dan gerak melingkar.

**Gerak lurus** adalah gerak suatu benda yang lintasannya berupa garis lurus. Contoh benda yang melakukan gerak lurus adalah mobil balap yang melintasi *track* lurus. Seekor kuda yang dipacu pada lintasan lurus juga merupakan contoh gerak lurus.

Gerak lurus ada dua macam, yaitu gerak lurus beraturan (GLB) dan gerak lurus berubah beraturan (GLBB). Gerak lurus beraturan adalah gerak lurus suatu benda dengan kecepatan tetap. Gerak lurus berubah beraturan adalah gerak lurus suatu benda dengan percepatan tetap.

Untuk memahami gerak lurus, perhatikanlah besaran-besaran yang berkaitan dengan gerak, yaitu:

## 1. Posisi Benda pada Suatu Bidang

Pada ilustrasi di awal bab, ketika mobil balap berada di garis start, mobil balap dikatakan berada pada posisi awal. Setelah mobil bergerak, posisi mobil balap berubah terhadap garis start. Dengan demikian, untuk mengetahui posisi suatu titik diperlukan suatu titik acuan.

Contoh lain misalnya ketika pesawat terbang akan mendarat di sebuah bandara. Pilot pesawat tersebut akan memberi laporan kepada petugas penjaga menara kontrol. Pilot menginformasikan posisi pesawat terhadap bandara, kecepatan pesawat, dan berbagai hal yang berkaitan dengan persiapan pendaratan.

Berdasarkan informasi dari pilot tentang posisi dan kecepatan pesawat mendekati bandara, petugas menara akan memberi instruksi teknis tentang pendaratan pesawat. Dengan demikian, informasi tentang posisi pesawat pada suatu titik sangat diperlukan.



**Gambar 1.2** Posisi pesawat dikontrol pilot melalui sistem navigasi dalam pesawat

Pada umumnya, **posisi suatu titik** ditunjukkan dengan sebuah koordinat. Sebuah koordinat memiliki titik acuan atau kerangka acuan. Berdasarkan kerangka acuan,

dapat digambarkan posisi suatu titik pada koordinat tersebut.

Pada contoh di atas, posisi pesawat dapat ditunjukkan berdasarkan acuannya terhadap menara kontrol. Sebagai contoh, pesawat berada pada ketinggian 2.000 m dari menara kontrol dan berjarak mendarat 3.000 m. Posisi tersebut akan lebih mudah dipahami jika dinyatakan dalam sebuah grafik. Salah satu grafik yang digunakan untuk menunjukkan posisi benda adalah grafik kartesius.

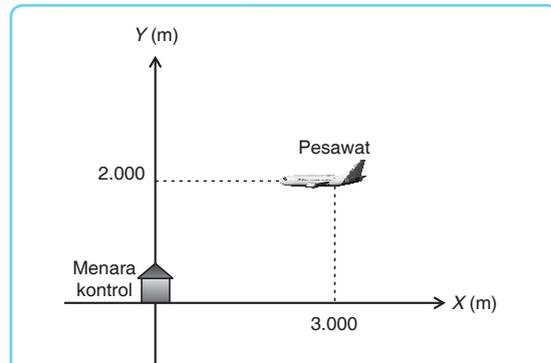
Misalnya ketika menggambarkan posisi pesawat seperti contoh di atas. Jika titik (0,0) menunjukkan kedudukan menara kontrol

## Gerak Lurus

## Posisi Suatu Titik

maka posisi pesawat pada jarak mendatar menunjukkan angka 3.000 m dan ketinggian 2.000 m. Kedudukan tersebut apabila dinyatakan dalam koordinat kartesius akan tampak seperti pada gambar 1.3 di samping.

Selain menggunakan grafik kartesius, posisi pesawat tersebut dapat pula ditunjukkan dengan menggunakan grafik koordinat polar ( $r, \theta$ ).  $r$  adalah jarak suatu titik ke pusat koordinat dan  $\theta$  adalah sudut dari sumbu X positif dalam koordinat kartesius menuju titik dengan arah berlawanan dengan arah jarum jam. Hubungan antara koordinat kartesius dengan koordinat polar adalah:



**Gambar 1.3** Grafik kartesius yang menggambarkan kedudukan pesawat

$$x = r \cdot \cos \theta \qquad y = r \cdot \sin \theta$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad \tan \theta = \frac{y}{x} \qquad \dots (1.1)$$

Untuk menunjukkan posisi pesawat dengan menggunakan koordinat polar, perlu diketahui terlebih dahulu jarak pesawat ke menara kontrol. Jarak pesawat ke menara kontrol dinyatakan:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \text{ misalnya untuk contoh di atas:}$$

$$r = \sqrt{3.000^2 + 2.000^2}$$

$$r = 3.605,5 \text{ m}$$

Adapun sudut yang dibentuk antara pesawat dengan menara kontrol adalah:

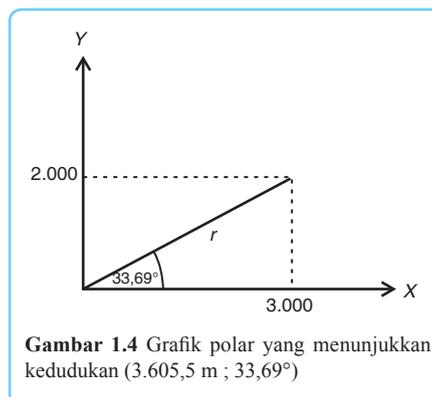
$$\tan \theta = \frac{y}{x}$$

$$\tan \theta = \frac{2.000}{3.000}$$

$$\theta = 33,69^\circ$$

Dengan demikian, posisi pesawat terbang jika dinyatakan dalam koordinat polar adalah (3.605,5 m ; 33,69°). Posisi titik tersebut dapat ditunjukkan dalam koordinat polar seperti gambar 1.4 di samping.

Posisi suatu benda selain dinyatakan dengan koordinat



**Gambar 1.4** Grafik polar yang menunjukkan kedudukan (3.605,5 m ; 33,69°)

kartesius dan koordinat polar, juga dapat dinyatakan dalam vektor satuan. Adapun persamaan umum vektor posisi dalam koordinat kartesius dua dimensi adalah:

$$\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j} \quad \dots (1.2)$$

dengan besar vektor satuan  $\mathbf{i} = 1$  dan besar vektor satuan  $\mathbf{j} = 1$ .

Penulisan vektor satuan dinyatakan dengan **huruf miring** dan huruf tebal. Misalnya vektor satuan yang searah sumbu  $X$  dinyatakan dengan  $\mathbf{i}$ . Vektor posisi suatu titik dalam dua dimensi juga dituliskan dengan cara yang sama, misalnya  $\mathbf{r}$ . Prinsip penulisan lambang tersebut tidak baku namun lazim digunakan. Penulisan vektor juga dapat dilakukan dengan memberi tanda panah di atas lambang vektor atau dengan memberikan harga mutlak pada lambang vektor untuk melambangkan besar vektor.

Agar kamu lebih memahami tentang vektor posisi, koordinat kartesius dan koordinat polar, simaklah contoh soal berikut!

### Contoh Soal

1. Kedudukan suatu titik  $D$  ditunjukkan oleh koordinat kartesius

$(3,6)$ . Nyatakan koordinat titik tersebut dalam koordinat polar!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $D(3,6)$

Ditanyakan:  $D(r, \theta) = \dots ?$

Jawab:

$$r = \sqrt{3^2 + 6^2} = 3\sqrt{5} \quad \text{dan} \quad \tan \theta = \frac{6}{3} \quad \text{maka} \quad \theta = 63,4^\circ$$

Jadi, koordinat polarnya adalah  $(3\sqrt{5}, 63,4^\circ)$ .

2. Titik  $H$  mempunyai kedudukan  $(4,30^\circ)$ . Tentukan vektor posisi titik tersebut!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $H(4,30^\circ)$

Ditanyakan:  $\mathbf{r}_H = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} x &= 4 \cdot \cos \theta & y &= r \cdot \sin \theta \\ x &= 4 \cdot \cos 30^\circ & y &= 4 \cdot \sin 30^\circ \\ x &= 4 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} & y &= 4 \cdot \frac{1}{2} \\ x &= 2\sqrt{3} & y &= 2 \end{aligned}$$

Vektor posisi titik  $H$  adalah  $\mathbf{r}_H = 2\sqrt{3} \mathbf{i} + 2 \mathbf{j}$

## 2. Perpindahan

Pada ilustrasi di awal bab, ketika pesawat mendekati menara kontrol, dikatakan bahwa posisi pesawat mengalami perubahan. Perubahan posisi suatu benda, seperti pesawat terhadap titik acuan menara kontrol menunjukkan bahwa benda telah berpindah.

Besar perpindahan dapat ditunjukkan dengan perubahan vektor posisi suatu benda. Oleh karena perpindahan diperoleh dari perubahan vektor posisi maka perpindahan merupakan besaran vektor. Sebagai besaran vektor, arah merupakan hal yang perlu diperhatikan dalam perpindahan.

Pengertian perpindahan perlu dibedakan dengan jarak. Sebagai contoh, seorang anak berjalan ke timur sejauh 10 m kemudian kembali ke arah barat 4 m. Anak tersebut dikatakan melakukan perpindahan sebesar 6 m. Sedangkan jarak yang ditempuhnya sebesar 14 m. Dengan demikian, ada perbedaan pengertian antara perpindahan dengan jarak.

Adanya perbedaan pengertian perpindahan dan jarak akan berimplikasi terhadap pengertian kecepatan (*velocity*) dan kelajuan (*speed*). Perpindahan yang ditempuh oleh suatu benda tiap satuan waktu akan menunjukkan **kecepatan**. Adapun besarnya jarak yang ditempuh oleh suatu benda tiap satuan waktu menunjukkan **kelajuan**.

Suatu benda dikatakan melakukan **perpindahan** jika posisi benda tersebut mengalami perubahan terhadap titik acuan. Untuk memahami perpindahan suatu benda atau titik, perhatikanlah contoh gerakan titik *N* berikut ini!

Jika dalam sistem koordinat kartesius, titik *N* mula-mula berada di posisi (1,1) m dan saat  $t = 4$  s titik *N* berada di titik (4,5) m maka besaran-besaran yang berkaitan dengan vektor perpindahan adalah:

Vektor posisi awal titik *N*:

$$\mathbf{r}_{N1} = 1 \mathbf{i} + 1 \mathbf{j}$$

$$\mathbf{r}_{N2} = 4 \mathbf{i} + 5 \mathbf{j}$$

Vektor perpindahan titik *N*:

$$\Delta \mathbf{r}_N = \mathbf{r}_{N2} - \mathbf{r}_{N1}$$

$$\Delta \mathbf{r}_N = (4 \mathbf{i} + 5 \mathbf{j}) - (1 \mathbf{i} + 1 \mathbf{j})$$

$$\Delta \mathbf{r}_N = 3 \mathbf{i} + 4 \mathbf{j}$$

Komponen vektor perpindahan titik *N* pada sumbu *X* adalah 3 dan pada sumbu *Y* adalah 4.

Besar vektor perpindahan titik *N* adalah:



$$|\Delta r_N| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ m}$$

Arah perpindahan titik  $N$  adalah:

$$\tan \theta = \frac{y}{x} \dots (1.3)$$

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

$$\theta = 53,1^\circ$$

Dengan demikian titik  $N$  membentuk sudut  $53,1^\circ$  terhadap sumbu  $X$  positif dengan arah perpindahan berlawanan arah jarum jam.

Untuk membantumu memahami tentang perpindahan, perhatikan

contoh soal berikut! Setelah itu kerjakan soal-soal di bawahnya!

### Contoh Soal

1. Titik  $R$  pada saat  $t = 1$  s berada pada posisi  $(2,1)$  m, dan pada saat  $t = 4$  s berada pada posisi  $(6,4)$  m.

Tentukan:

- a. vektor perpindahannya,
- b. komponen vektor perpindahan pada sumbu  $X$ ,
- c. komponen vektor perpindahan pada sumbu  $Y$ ,
- d. besar perpindahannya,
- e. arah perpindahannya.

### Penyelesaian:

Diketahui:  $R_1(2,1)$

$R_4(6,4)$

- Ditanyakan:
- a.  $\Delta r_R = \dots ?$
  - b.  $r_{Rx} = \dots ?$
  - c.  $r_{Ry} = \dots ?$
  - d.  $|r| = \dots ?$
  - e.  $\theta = \dots ?$

Jawab:

$$\text{a. } \Delta r_R = (6 \mathbf{i} + 4 \mathbf{j}) - (2 \mathbf{i} + 1 \mathbf{j}) = 4 \mathbf{i} + 3 \mathbf{j}$$

$$\text{b. } r_{Rx} = 4 \text{ m}$$

$$\text{c. } r_{Ry} = 3 \text{ m}$$

$$\text{d. } |r| = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ m}$$

$$\text{e. } \tan \theta = \frac{r_{Ry}}{r_{Rx}} = \frac{3}{4} \text{ maka } \theta = 37^\circ$$

2. Titik  $D$  mempunyai vektor posisi  $r = t^2 \mathbf{i} + 2 t \mathbf{j}$ . Tentukan:

- a. vektor posisi awal (saat  $t = 0$  s),

- b. vektor posisi saat  $t = 2$  s,
- c. vektor posisi saat  $t = 4$  s,
- d. vektor perpindahan dari  $t = 2$  s hingga  $t = 4$  s,
- e. besar vektor perpindahannya.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\mathbf{r} = t^2 \mathbf{i} + 2 t \mathbf{j}$

- Ditanyakan:
- a.  $\mathbf{r}_{(t=0s)} = \dots ?$
  - b.  $\mathbf{r}_{(t=2s)} = \dots ?$
  - c.  $\mathbf{r}_{(t=4s)} = \dots ?$
  - d.  $\Delta \mathbf{r}_{(t=0s)}$  = ... ?
  - e.  $|\Delta \mathbf{r}| = \dots ?$

Jawab:

- a.  $\mathbf{r}_{(t=0s)} = 0 \mathbf{i} + 0 \mathbf{j}$
- b.  $\mathbf{r}_{(t=2s)} = 2^2 \mathbf{i} + 2 \cdot 2 \mathbf{j} = 4 \mathbf{i} + 4 \mathbf{j}$
- c.  $\mathbf{r}_{(t=4s)} = 4^2 \mathbf{i} + 2 \cdot 4 \mathbf{j} = 16 \mathbf{i} + 8 \mathbf{j}$
- d.  $\Delta \mathbf{r} = (16 \mathbf{i} + 8 \mathbf{j}) - (4 \mathbf{i} + 4 \mathbf{j}) = 12 \mathbf{i} + 4 \mathbf{j}$



### Kerja Berpasangan 1

e.  $|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{12^2 + 4^2} = 4\sqrt{10} \text{ m}$

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

1. Gambarlah posisi atau kedudukan titik-titik berikut ini!
  - a.  $H(1,4)$
  - b.  $A(-3,4)$
  - c.  $Y(5,45^\circ)$
  - d.  $D(3,60^\circ)$
2. Ubahlah koordinat polar berikut menjadi koordinat kartesius!
  - a.  $W(2,37^\circ)$
  - b.  $A(6,53^\circ)$
  - c.  $T(3,30^\circ)$
  - d.  $I(4,45^\circ)$
3. Ubahlah koordinat kartesius berikut menjadi koordinat polar!
  - a.  $K(3,4)$
  - b.  $E(-6,-8)$
  - c.  $N(8,10)$
  - d.  $T(1,2)$
  - e.  $I(5,-5)$
  - f.  $K(-4,5)$
4. Titik  $N$  berpindah dari  $(-1,1)$  ke  $(2,5)$ . Tentukan:
  - a. vektor perpindahannya,
  - b. komponen vektor perpindahan pada sumbu  $X$ ,
  - c. komponen vektor perpindahan pada sumbu  $Y$ ,
  - d. besar vektor perpindahannya,
  - e. arah perpindahannya.
5. Vektor posisi dari titik  $D$  dinyatakan dalam vektor posisi yang mengandung unsur waktu, yaitu:  $\mathbf{r} = 2t \mathbf{i} + 4t^2 \mathbf{j}$ . Tentukan:
  - a. vektor posisi awal,



- b. vektor posisi saat  $t = 1$  s,
- c. vektor posisi saat  $t = 2$  s,
- d. vektor perpindahan dari  $t = 1$  s hingga  $t = 2$  s,
- e. komponen vektor perpindahan pada sumbu X,

- f. vektor perpindahan pada sumbu Y,
- g. besar vektor perpindahan.

## Kecepatan

### 3. Kecepatan

Seperti telah kita pelajari sebelumnya, **kecepatan** menunjukkan adanya perpindahan yang ditempuh oleh suatu benda tiap satuan waktu. Sebagai contoh, jika seorang anak pergi ke arah timur sejauh 8 m dalam 4 sekon maka dikatakan kecepatan anak tersebut 2 m/s. Hal ini akan memiliki makna yang berbeda jika dalam 4 sekon berikutnya, anak tersebut kembali ke arah barat 8 m. Anak tersebut dapat dikatakan tidak melakukan perpindahan karena tidak mengalami perubahan posisi terhadap titik acuan (berada di titik semula) sehingga kecepataannya adalah nol.

Gerakan mobil balap pada ilustrasi di awal, sulit ditentukan kecepataannya. Hal ini dikarenakan saat mobil memulai balapan, mobil dipacu dengan cepat. Namun, saat mobil hendak memasuki tikungan, kecepatan mobil berkurang. Oleh karena kecepatan mobil dapat berubah-ubah, dikenal istilah kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat.

## Kecepatan Rata-rata

#### a. Kecepatan rata-rata

**Kecepatan rata-rata** dinyatakan sebagai hasil bagi perpindahan terhadap selang waktu dari perpindahan itu. Perhatikan gambar 1.5 berikut!

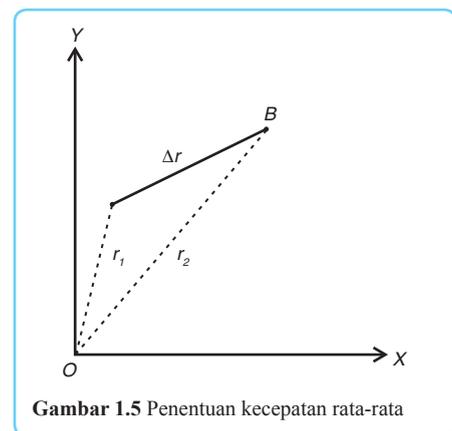
Sebuah titik bergerak dari  $A$  ke  $B$  selama selang waktu  $\Delta t$ . Perpindahan yang dialami titik tersebut  $AB = \Delta r$ . Jika vektor posisi titik tersebut ketika di  $A$  adalah  $r_1$ , dan di  $B$  adalah  $r_2$ , dengan mengguakan metode poligon yang telah kamu pelajari di kelas X, akan diperoleh kecepatan rata-rata titik tersebut adalah:

$$\underline{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1} \quad \dots (1.4)$$

#### Keterangan:

- $\underline{v}$  : kecepatan rata-rata (m/s)
- $\Delta r$  : perpindahan (m)
- $\Delta t$  : selang waktu perpindahan (s)

Apabila persamaan 1.4 dinyatakan dengan vektor kecepatan dalam koordinat kartesius, diperoleh:



Gambar 1.5 Penentuan kecepatan rata-rata

$$\vec{v} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j}}{\Delta t} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}$$

Untuk memperdalam pemahamanmu mengenai kecepatan rata-rata, simaklah contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Titik materi  $D$  pada  $t = 1$  s berada pada posisi  $(2,0)$  m dan pada  $t = 4$  s berada pada posisi  $(8,8)$  m. Tentukan:

- vektor kecepatan rata-ratanya,
- komponen vektor kecepatan rata-rata pada sumbu  $X$ ,
- komponen vektor kecepatan rata-rata pada sumbu  $Y$ ,
- besar vektor kecepatan rata-rata,
- arah kecepatan rata-ratanya.

### Penyelesaian:

Diketahui:  $D_1 = (2,0)$

$D_4 = (8,8)$

Ditanyakan: a.  $\vec{v} = \dots?$

b.  $v_x = \dots?$

c.  $v_y = \dots?$

d.  $|\vec{v}| = \dots?$

e.  $\theta = \dots?$

Jawab:

a.  $\mathbf{r}_{D1} = 2 \mathbf{i} + 0 \mathbf{j}$

$\mathbf{r}_{D2} = 8 \mathbf{i} + 8 \mathbf{j}$

$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_{D2} - \mathbf{r}_{D1} = 6 \mathbf{i} + 8 \mathbf{j}$  dan

$\Delta t = t_2 - t_1 = 4 \text{ s} - 1 \text{ s} = 3 \text{ s}$

$\vec{v} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{6 \mathbf{i} + 8 \mathbf{j}}{3} = \left( 2 \mathbf{i} + \frac{8}{3} \mathbf{j} \right) \text{ m/s}$

b.  $v_x = 2 \text{ m/s}$

c.  $v_y = \frac{8}{3} \text{ m/s}$

d.  $|\vec{v}| = \sqrt{2^2 + \left(\frac{8}{3}\right)^2} = 3,3 \text{ m/s}$

$$e. \tan \theta = \frac{v_x}{v_y} = \frac{\left(\frac{8}{3}\right)}{2} = 1,333 \text{ maka } \theta = 53,13^\circ$$

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad \dots (1.5)$$

**b. Kecepatan sesaat**

Kecepatan sesaat adalah kecepatan rata-rata untuk selang waktu  $\Delta t$  yang mendekati nol. Kecepatan sesaat dapat dirumuskan dalam persamaan limit sebagai berikut.

Apabila perpindahan suatu titik dilambangkan dalam sumbu  $X$  dan waktu dalam sumbu  $Y$  maka kecepatan sesaat pada suatu perpindahan ditunjukkan oleh kemiringan garis singgung pada titik tersebut. Perhatikan gambar 1.6a!

Misalnya dari gambar 1.6a akan ditentukan kecepatan saat  $t = 2$  s. Untuk menentukan kecepatan saat  $t = 2$  s dibuat garis singgung pada titik  $t = 2$  s. Perhatikan gambar 1.6b!

Dari persamaan 1.3, kecepatan saat  $t = 2$  s adalah sebagai berikut.

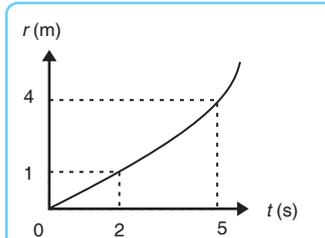
$$\mathbf{v} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$\tan \theta = \frac{3}{3} = 1 \text{ m/s}$$

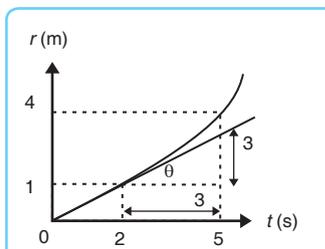
Apabila kecepatan sesaat dari suatu grafik bernilai negatif, berarti arah kecepatan tersebut berlawanan dengan arah gerakan benda atau arah perpindahan benda. Demikian pula jika kecepatan saat itu adalah nol maka benda dikatakan tidak berpindah.

Selain ditentukan dari kemiringan garis singgung di suatu titik, kecepatan sesaat juga dapat diturunkan dari sebuah persamaan perpindahan.

Penulisan kecepatan sesaat yang merupakan harga limit  $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$  untuk mendekati nol dapat dinyatakan dengan  $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ . Pernyataan tersebut menunjukkan diferensial atau turunan dari perubahan



Gambar 1.6a Grafik  $r - t$  menjelaskan hubungan antara perpindahan dengan waktu



Gambar 1.6b Menganalisis kecepatan sesaat dari kemiringan suatu grafik  $r - t$

posisi dan dirumuskan.

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

Jika perpindahan dinyatakan dengan meter dan waktu dalam sekon maka kecepatan sesaat dinyatakan dalam m/s. Penggunaan istilah kecepatan sesaat sering bermakna ganda, yaitu berarti kecepatan sesaat atau besar kecepatan sesaat atau laju. Oleh karena itu, kalian harus membedakan pengertian laju sesaat yang hanya menunjukkan besar kecepatan sesaat dan kecepatan sesaat yang menunjukkan berapa cepatnya suatu

benda dan kemana arahnya.

Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Titik Y melakukan perpindahan dengan vektor perpindahan:  $\mathbf{r} = (2 t^2 \mathbf{i} + 5 t \mathbf{j})$  m.

Tentukan:

- vektor kecepatan sesaat,
- komponen sumbu X vektor kecepatan,
- komponen sumbu Y vektor kecepatan,
- vektor kecepatan saat  $t = 2$  s,
- besar kecepatan saat  $t = 2$  s.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\mathbf{r} = (2 t^2 \mathbf{i} + 5 t \mathbf{j})$  m

- Ditanyakan:
- $\mathbf{v} = \dots ?$
  - $v_x = \dots ?$
  - $v_y = \dots ?$
  - $\mathbf{v}_{t=2} = \dots ?$
  - $|\mathbf{v}_{t=2}| = \dots ?$

Jawab:

- $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$   
 $\mathbf{v} = (4 t \mathbf{i} + 5 \mathbf{j})$  m/s
- $v_x = 4 t$  m/s
- $v_y = 5$  m
- Saat  $t = 2$  s, vektor kecepatan sesaatnya adalah:

$$\mathbf{v}_{t=2} = (4(2)\mathbf{i} + 5\mathbf{j}) \text{ m/s}$$

$$\mathbf{v}_{t=0} = (8\mathbf{i} + 5\mathbf{j}) \text{ m/s}$$

e.  $|\mathbf{v}_{t=2}| = \sqrt{8^2 + 5^2} = \sqrt{89} \text{ m/s}$

Dalam matematika, jika vektor kecepatan sesaat dari suatu titik diketahui maka vektor perpindahan dapat ditentukan dari kebalikan turunan, yaitu dengan mengintegalkannya. Melalui integral dari vektor kecepatan sesaat akan diperoleh vektor posisi dari suatu titik.

Adapun bentuk umum fungsi integral secara matematis adalah:

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

Vektor posisi suatu benda jika diketahui vektor kecepatannya dapat dinyatakan:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_o + \int \mathbf{v} dt$$

**Keterangan:**

$\mathbf{r}$  : posisi (m)

$\mathbf{r}_o$  : posisi awal (m)

$dt$  : selang waktu perpindahan (s)

Untuk membantumu memahami materi di atas, simaklah contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Titik A memiliki kecepatan yang dinyatakan dalam vektor:

$$\mathbf{v}_A = (8t\mathbf{i} - 2t^2\mathbf{j}) \text{ m/s}$$

Jika posisi awal benda  $(2\mathbf{i} + 3\mathbf{j})$  m/s, tentukanlah vektor posisi saat  $t = 2$  s!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\mathbf{v}_A = (8t\mathbf{i} - 2t^2\mathbf{j}) \text{ m/s}$

$$\mathbf{r}_o = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \text{ m/s}$$

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

Ditanyakan:  $\mathbf{r} = \dots ?$

Jawab:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_o + \int \mathbf{v}_A dt$$

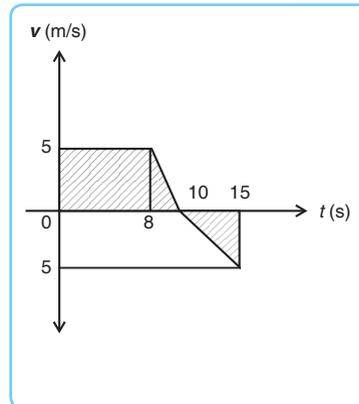
$$\mathbf{r} = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) + \int (8t\mathbf{i} - 2t^2\mathbf{j}) dt$$

$$\mathbf{r} = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) + \left( 4t^2\mathbf{i} - \frac{2}{3}t^3\mathbf{j} \right)$$

$$\text{Saat } t = 2 \text{ s maka } \mathbf{r} = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) + \left[ 4(2)^2\mathbf{i} - \frac{2}{3}(2)^3\mathbf{j} \right]$$

$$r = \left( 8i - \frac{7}{3}j \right) \text{ m/s}$$

Apabila vektor kecepatan digambarkan oleh sebuah grafik maka perpindahan dan jarak suatu gerakan benda dapat ditentukan melalui luas daerah di bawah kurva. Cara penentuan perpindahan suatu benda berbeda dengan cara penentuan jaraknya. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 1.7 di samping.



Pada grafik kecepatan  $v$  terhadap waktu  $t$ , luas daerah pada kurva dapat menunjukkan perpindahan dan jarak dari suatu benda. Secara detail, gerak benda dapat dianalisis sebagai berikut.

#### Lintasan I

Saat  $t = 0$  sampai  $t = 8$  s mobil melakukan gerak lurus.

$$\begin{aligned} \text{Lintasan yang ditempuh} &= \text{luas persegi panjang} \\ &= 8 \times 5 \\ &= 40 \text{ m} \end{aligned}$$

#### Lintasan II

Saat  $t = 8$  s sampai  $t = 10$  s mobil melakukan gerak lurus berubah beraturan diperlambat, hingga berhenti.

$$\begin{aligned} \text{Lintasan yang ditempuh} &= \text{luas segitiga} \\ &= \frac{2 \times 5}{2} \\ &= 5 \text{ m} \end{aligned}$$

#### Lintasan III

Saat  $t = 8$  s sampai  $t = 15$  s mobil melakukan gerak lurus berubah beraturan dipercepat, namun arah gerakan benda berlawanan dengan arah gerak semula.

$$\begin{aligned} \text{Lintasan yang ditempuh} &= \text{luas segitiga} \\ &= \frac{5 \times 5}{2} \\ &= 12,5 \text{ m} \end{aligned}$$

Dari ketiga lintasan tersebut, perpindahan akan bernilai positif untuk lintasan benda di atas sumbu  $X$ . Untuk lintasan benda di bawah sumbu  $X$ , perpindahan bernilai negatif. Namun untuk jarak tempuh benda, semua lintasan bernilai positif. Dengan demikian dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned} \text{perpindahan} &= \text{Lintasan I} + \text{Lintasan II} - \text{Lintasan III} \\ &= 40 + 5 - 12,5 \\ &= 32,5 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak} &= \text{Lintasan I} + \text{Lintasan II} + \text{Lintasan III} \\
 &= 40 + 5 + 12,5 \\
 &= 57,5 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Agar kamu lebih memahami materi di atas, perhatikan contoh soal berikut ini! Setelah itu, kerjakan pelatihan di bawahnya!

### Contoh Soal

1. Indah melempar benda dengan persamaan kecepatan  $v = (3t^2 - 12)$  m/s. Tentukan perpindahan dan jarak antara  $t = 0$  hingga  $t = 3$  s!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $v = (3t^2 - 12)$  m/s

Ditanyakan: perpindahan dan jarak antara  $t = 0$  s hingga  $t = 3$  s = . . . ?

Jawab:

Langkah pertama adalah menginterpretasikan persamaan  $v = (3t^2 - 12)$  m/s dalam sebuah grafik.

Perpindahan = luas bawah + luas atas

$$\text{Perpindahan} = \int_0^3 3t^2 - 12 \, dt$$

$$\text{Perpindahan} = [t^3 - 12t]_0^3$$

$$\text{Perpindahan} = [3^3 - 12 \cdot 3] - [0^3 - 12 \cdot 0]$$

$$\text{Perpindahan} = (27 - 36) - (0 - 0)$$

$$\text{Perpindahan} = -9 - 0$$

Perpindahan = -9 m (tanda (-) berarti arah perpindahan berlawanan dengan arah kecepatan)

Jarak = - luas bawah + luas atas

$$\text{Jarak} = - \int_0^2 3t^2 - 12 \, dt + \int_2^3 3t^2 - 12 \, dt$$

$$\text{Jarak} = - [t^3 - 12t]_0^2 + [t^3 - 12t]_2^3$$

$$\text{Jarak} = - \{ [2^3 - 12 \cdot 2] - [0^3 - 12 \cdot 0] \} + \{ [3^3 - 12 \cdot 3] - [2^3 - 12 \cdot 2] \}$$

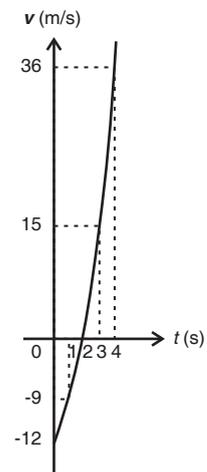
$$\text{Jarak} = - \{ [8 - 24] - [0 - 0] \} + \{ [27 - 36] - [8 - 24] \}$$

$$\text{Jarak} = - \{ -16 - 0 \} + \{ -9 - (-16) \}$$

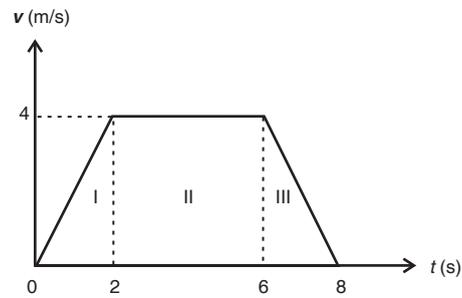
$$\text{Jarak} = 16 + \{ -9 + 16 \}$$

$$\text{Jarak} = |16| + |7|$$

$$\text{Jarak} = 23 \text{ m}$$



2. Fitri mengendarai sepeda dengan kecepatan seperti grafik berikut.



Tentukan:

- jarak yang ditempuh setelah sepeda Fitri bergerak 2 s,
- jarak total yang ditempuh Fitri selama 8 s.

**Penyelesaian:**

Diketahui: Lihat grafik

- Ditanyakan: a. Jarak saat  $t = 2$  s = ... ?  
b. Jarak saat  $t = 8$  s = ... ?

Jawab:

- a. Jarak = Luas segitiga = L I

$$\text{Jarak} = \frac{1}{2} \cdot \text{alas} \cdot \text{tinggi}$$

$$\text{Jarak} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 4 = 4 \text{ m}$$

- b. Jarak = L I + L II + L III

$$\text{Jarak} = \left( \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 4 \right) + (4 \cdot 4) + \left( \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 4 \right)$$

$$\text{Jarak} = 4 + 16 + 4 = 24 \text{ m}$$

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*



## Kerja Berpasangan 2

- Gambarlah ruang kelasmu dalam sebuah kertas milimeter blok dan tunjukkan posisi meja masing-masing temanmu! Selanjutnya, tentukan jarak dan perpindahan meja teman-temanmu dalam satu kelas terhadap meja guru!
- Titik  $N$  pada  $t = 0$  berada pada posisi (2,5) m, kemudian pada  $t = 2$  s berada pada posisi (2,8) m. Tentukan besar vektor kecepatan rata-ratanya!
- Partikel  $W$  melakukan perpindahan sesuai vektor perpindahan:

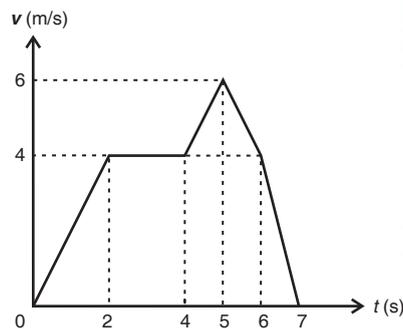
$$\mathbf{r} = (3t^2 \mathbf{i} + 4t \mathbf{j}) \text{ m.}$$

Tentukan:

- a. vektor kecepatan sebagai fungsi waktu,
  - b. besar vektor kecepatan saat  $t = 2$  s.
4. Titik A melakukan gerakan pada arah mendatar dengan vektor kecepatan  $\mathbf{v} = (4t \mathbf{i} + 2 \mathbf{j})$  m/s. Jika posisi awal titik berada di posisi 3 m, tentukan vektor posisi titik saat  $t = 2$  s.
  5. Benda T bergerak pada arah tertentu dengan persamaan kecepatan  $\mathbf{v} = (t^2 - 2)$  m/s. Tentukan perpindahan dan jarak dari  $t = 0$  s hingga  $t = 4$  s.
  6. Titik materi melakukan gerak sesuai grafik berikut.

Tentukan:

- a. jarak yang ditempuh setelah  $t = 2$  s,
- b. jarak yang ditempuh setelah  $t = 4$  s,
- c. jarak yang ditempuh setelah  $t = 5$  s,
- d. jarak yang ditempuh setelah  $t = 6$  s,
- e. jarak yang ditempuh setelah  $t = 7$  s.



## 4. Percepatan

Pada ilustrasi di awal bab, mobil balap yang semula diam, dipacu dengan cepat saat lampu start menyala hijau. Dengan demikian, kecepatan dari mobil mengalami perubahan. Demikian juga saat mobil mendekati tikungan, kecepatan mobil diperkecil hingga mencapai titik aman untuk membelok. Sehingga, kecepatan mobil sejak *start* hingga *finish* senantiasa mengalami perubahan.

Peristiwa perubahan kecepatan gerak benda juga dapat kamu rasakan saat berangkat sekolah menggunakan motor. Ketika kamu berangkat ke sekolah naik motor, motor yang kamu kendarai tentu tidak berjalan dengan kecepatan tetap. Motor yang kamu kendarai kadang berjalan cepat, pelan, atau bahkan harus berhenti sesuai kondisi lalu lintas sehingga kecepatan laju kendaraanmu berubah-ubah setiap waktu. Perubahan kecepatan tiap satuan waktu tersebut disebut dengan **percepatan**. Seperti halnya kecepatan, percepatan ada dua macam yaitu percepatan rata-rata dan percepatan sesaat.

### a. Percepatan rata-rata

**Percepatan rata-rata** adalah perubahan kecepatan dalam selang waktu tertentu. Semakin besar perubahan kecepatan maka semakin besar pula percepatannya. Jika selang waktu yang digunakan untuk melakukan perubahan kecepatan semakin kecil maka besar percepatan semakin besar. Percepatan rata-rata dirumuskan sebagai berikut.

## Percepatan

### Percepatan Rata-rata

$$\bar{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{t_2 - t_1} \quad \dots (1.6)$$

**Keterangan:**

$\bar{a}$  : percepatan rata-rata (m/s)

Penguraian besaran-besaran yang berhubungan dengan percepatan rata-rata diperoleh dengan proses yang analogi dengan kecepatan rata-rata. Agar kamu lebih paham, simaklah contoh soal berikut ini!

### Contoh Soal

Nambunan menaiki motor dengan persamaan kecepatan  $\mathbf{v} = (2t^2 \mathbf{i} + 8t \mathbf{j})$  m/s

Tentukan:

- vektor percepatan rata-rata dari  $t = 1$  s hingga  $t = 3$  s,
- komponen sumbu  $X$  percepatan rata-rata dari  $t = 1$  s hingga  $t = 3$  s,
- komponen sumbu  $Y$  percepatan rata-rata  $t = 1$  s hingga  $t = 3$  s,
- besar percepatan rata-rata dari  $t = 1$  s hingga  $t = 3$  s,
- arah percepatan rata-rata dari  $t = 1$  s hingga  $t = 3$  s.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\mathbf{v} = (2t^2 \mathbf{i} + 8t \mathbf{j})$  m/s

$t = 1$  sampai  $t = 3$

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

b.  $\bar{a}_x = \dots ?$

c.  $\bar{a}_y = \dots ?$

d.  $|\bar{\mathbf{a}}| = \dots ?$

e.  $\theta = \dots ?$

Jawab:

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

a.

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{(2 \cdot 3^2 \mathbf{i} + 8 \cdot 3 \mathbf{j}) - (2 \cdot 1^2 \mathbf{i} + 8 \cdot 1 \mathbf{j})}{3 - 1}$$

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{(18 \mathbf{i} + 24 \mathbf{j}) - (2 \mathbf{i} + 8 \mathbf{j})}{2}$$

$$\bar{\mathbf{a}} = 8 \mathbf{i} + 8 \mathbf{j} \text{ m/s}$$

b.

$$\bar{a}_x = 8 \text{ m/s}^2$$

c.

$$\bar{a}_y = 8 \text{ m/s}^2$$

d.

$$|\bar{\mathbf{a}}| = \sqrt{8^2 + 8^2} = 8\sqrt{2} \text{ m/s}^2$$

e.  $\tan \theta = \frac{5}{5}$  maka  $\theta = 45^\circ$

**b. Percepatan sesaat**

Percepatan sesaat sebagai perubahan kecepatan sesaat terhadap waktu dapat ditentukan dengan analogi seperti kecepatan sesaat. Namun secara teoritis, perce-

patan sesaat dapat didefinisikan sebagai harga limit percepatan rata-rata, dengan mengambil  $\Delta t$  yang mendekati nol. Percepatan sesaat dirumuskan:

**Percepatan Sesaat**

Dari nilai percepatan sesaat, dapat juga ditentukan nilai kecepatan sesaat. Adapun nilai kecepatan sesaat diperoleh dengan mengintegrasikan nilai percepatan dan dirumuskan:

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

Untuk memahami tentang percepatan sesaat secara sak-sama perhatikan contoh soal berikut ini:

Percepatan sesaat dapat ditentukan dengan menentukan kemiringan garis singgung pada kurva  $v - t$  atau menurunkan fungsi dari kecepatan sesaat. Perhatikan contoh soal berikut!

**Contoh Soal**

1. Berdasarkan grafik  $v - t$  di samping, tentukan percepatan saat  $t = 2$  s!

**Penyelesaian:**

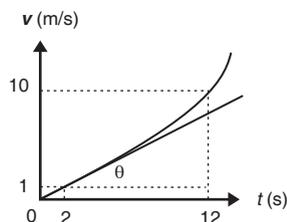
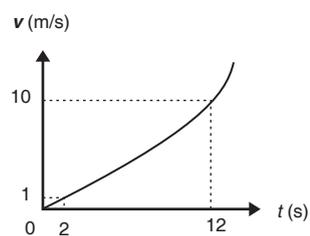
Ditanyakan:  $a_{t=2} = \dots ?$

Jawab:

Saat  $t = 2$  s, kemiringan garis singgungnya tampak seperti pada grafik berikut.

$$a_{t=2} = \tan \theta$$

$$a_{t=2} = \frac{9}{10} = 0,9 \text{ m/s}^2$$



2. Percepatan mobil Pak Mizwar adalah  $a = 2 t i + 3 t^2 j$ .  
Jika kecepatan awal

mobil Pak Mizwar adalah nol, tentukan kecepatan mobil Pak Mizwar saat  $t = 2$  s!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\mathbf{a} = 2t\mathbf{i} + 3t^2\mathbf{j}$

$$\mathbf{v}_0 = 0$$

Ditanyakan:  $\mathbf{v}_{t=2} = \dots ?$

Jawab:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \int (2t\mathbf{i} + 3t^2\mathbf{j}) dt$$

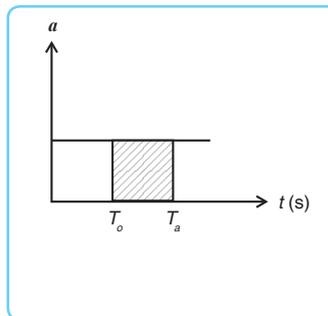
$$\mathbf{v} = 0 + t^2\mathbf{i} + t^3\mathbf{j} = t^2\mathbf{i} + t^3\mathbf{j}$$

Saat  $t = 2$  s maka:

$$\mathbf{v} = 2^2\mathbf{i} + 2^3\mathbf{j} = 4\mathbf{i} + 8\mathbf{j}$$

Kecepatan suatu titik dari grafik  $a - t$ , dapat ditentukan berdasarkan integral fungsi dari percepatan tersebut. Secara matematis, fungsi integral senilai dengan

luas daerah di bawah grafik. Dengan demikian, dalam metode grafik luas daerah di bawah kurva menunjukkan besar pertambahan kecepatan partikel. Perhatikan gambar di samping.



Sehingga kecepatan sesaat dapat dirumuskan:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \int_{t=0}^{t=a} \mathbf{a} dt$$

$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 +$  luas daerah di bawah grafik

Istilah percepatan rata-rata tidak begitu banyak digunakan. Oleh karena itu, jika ada istilah "percepatan" dalam mekanika, selalu diartikan sebagai percepatan sesaat.

Agar kamu lebih memahami materi di atas simaklah soal-soal berikut ini! Kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

### Contoh Soal

Suatu benda dari keadaan diam mengalami per-

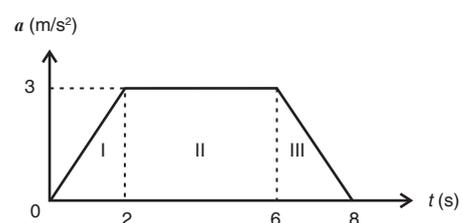
cepatan seperti grafik di samping.

Tentukan kecepatan saat:

- $t = 1$  s,
- $t = 5$  s,
- $t = 7$  s.

**Penyelesaian:**

Diketahui: Lihat grafik



Ditanyakan:  $v_{t=1} = \dots ?$

$v_{t=5} = \dots ?$

$v_{t=7} = \dots ?$

Jawab:

a.  $v = v_0 + \text{Luas segitiga dengan alas 1}$

$$v = 0 + \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 3$$
$$v = 1,5 \text{ m/s}$$

b.  $v = v_0 + \text{Luas segitiga} + \text{Luas persegi panjang}$

$$v = 0 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 3 + 3 \cdot 3$$
$$v = 12 \text{ m/s}$$

c.  $v = v_0 + \text{Luas segitiga} + \text{Luas persegi panjang} + \text{Luas trapesium}$

Mengingat saat  $t = 7$  s, nilai  $a$  belum diketahui maka langkah yang ditempuh adalah dengan menentukan persamaan garis melalui (6,3) dan (8,0), yaitu :

$$y - y_1 = m(x - x_1) \text{ sehingga } y = -1,5x + 12,$$

Dengan demikian, saat  $t = 7$  diperoleh nilai  $a = -1,5 \cdot 7 + 12 = 1,5 \text{ m/s}^2$

$$v = 0 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 3 + 4 \cdot 3 + (3 + 1,5) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1$$
$$v = 0 + 3 + 12 + 2,25 = 17,25 \text{ m/s}$$

*Kerjakan bersama kelompokmu!*

1. Dyda mengendarai motor dengan vektor kecepatan  $v = 7t^2 i - 3t j$ . Tentukan:



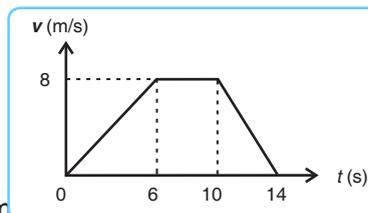
## Kerja Kelompok 1

- a. vektor percepatan rata-rata dari  $t = 1$  s hingga  $t = 3$  s,  
b. besar vektor percepatan rata-rata dari  $t = 1$  s hingga  $t = 3$  s.

2. Rian mengendarai motor dengan kecepatan seperti grafik di samping.

Tentukan percepatan saat:

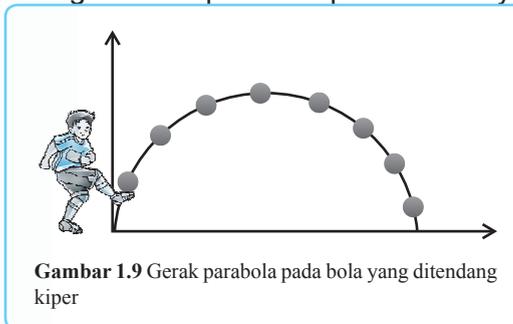
- a.  $t = 2$  s,
  - b.  $t = 8$  s,
  - c.  $t = 12$  s.
3. Mobil Andra mula-mula diam, kemudian dengan percepatan  $a = 2t i + 3t^2 j$ . Tentukan:



- vektor kecepatannya,
  - komponen sumbu  $X$  vektor kecepatannya,
  - komponen sumbu  $Y$  vektor kecepatannya,
  - besar kecepatan mobil Andra saat  $t = 2$  s.
4. Sebuah titik  $D$  melakukan perpindahan yang ditunjukkan dengan vektor perpindahan  $\mathbf{r} = (4t^2 + 6t)\mathbf{i} + (8 + 2t^3)\mathbf{j}$  m. Tentukan:
- vektor kecepatannya,
  - kecepatan saat  $t = 4$  s,
  - vektor percepatan,
  - percepatan saat  $t = 2$  s.
5. Mobil Kaka mula-mula diam dan berada di pusat koordinat. Selanjutnya mobil itu diberi percepatan selama 3 s. Tentukan besar perpindahan mobil jika vektor percepatannya  $\mathbf{a} = 3t\mathbf{i} + 2t\mathbf{j}$ !

## B. Gerak Parabola

Ketika memerhatikan pertandingan sepak bola, cobalah kamu amati gerakan bola saat ditendang oleh penjaga gawang. Bagaimana lintasan bola ketika ditendang penjaga gawang untuk dioperkan kepada temannya yang ada di posisi depan? Tampak bola tidak bergerak lurus, namun melengkung seperti tampak pada gambar 1.9. Mengapa lintasan bola berbentuk melengkung?



Gambar 1.9 Gerak parabola pada bola yang ditendang kiper

Ternyata lintasan gerak yang melengkung terjadi akibat adanya pengaruh gerak dipercepat beraturan pada sumbu vertikal. Gerakan tersebut disebut gerak parabola. Dengan demikian gerak parabola adalah gerak yang lintasannya berbentuk parabola atau melengkung. Contoh gerak parabola selain lintasan bola yang ditendang dalam permainan sepak bola, juga gerak peluru yang ditembakkan ke atas dengan sudut tertentu terhadap arah mendatar. Untuk lebih memahami gerak parabola, lakukan kegiatan berikut!

**Gerak Parabola**

### Gerak Parabola

#### A. Tujuan



## Praktikum 1

Menganalisis gerak parabola.

### B. Alat dan Bahan

1. Bola pingpong 2 buah
2. Meja 1 buah

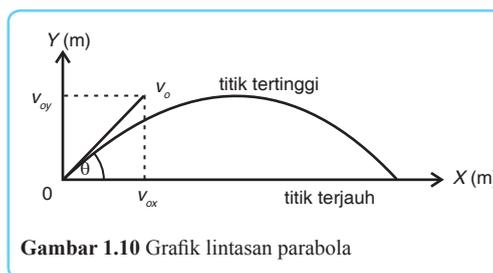
### C. Langkah Kerja

1. Ambil dua buah bola pingpong dan letakkan di tepi sebuah meja yang cukup tinggi!
2. Jatuhkan kedua bola tersebut secara bersamaan dengan ketentuan sebagai berikut!
  - a. Bola pertama jatuh bebas dari tepi meja.
  - b. Bola kedua diberi kecepatan mendatar sejajar meja.
3. Catat waktu yang diperlukan bola pertama dan kedua untuk sampai di tanah! Buatlah perbandingannya!
4. Analisislah gerakan kedua bola tersebut dan buatlah kesimpulan!
5. Diskusikan hasil pengamatanmu di depan kelas! Beri kesempatan kepada kelompok lain untuk menanggapi!
6. Kembalikan semua peralatan ke tempat semula! Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!

Gerak parabola merupakan perpaduan antara gerak lurus beraturan dan gerak lurus berubah beraturan. Perhatikan gambar 1.10 di samping! Pada sumbu X, gerak yang dialami benda merupakan gerak lurus beraturan. Gerak benda tersebut tidak dipengaruhi oleh

gaya gravitasi sehingga tidak mengalami percepatan. Pada arah vertikal (sumbu Y) gerak yang dialami benda merupakan gerak lurus berubah beraturan. Gerak benda tersebut dipengaruhi oleh gaya gravitasi sehingga mengalami perlambatan.

Oleh karena kecepatan awal dari gerak parabola membentuk sudut terhadap bidang datar maka kecepatan awal itu diuraikan dalam komponen horisontal dan vertikal. Komponen vertikal digunakan untuk mencari waktu geraknya saat di udara dan komponen horisontalnya digunakan untuk mencari jarak yang



Gambar 1.10 Grafik lintasan parabola

ditempuh. Sehingga dalam persamaan yang diperoleh akan diuraikan pada sumbu X dan sumbu Y

Beberapa persamaan yang berhubungan dengan gerak parabola adalah:

Sedangkan persamaan kecepatan dan arah gerak benda dirumuskan:

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

**Sumbu X:**

$$v_{ox} = v_o \cdot \cos \theta$$

$$v_x = v_o \cdot \cos \theta$$

$$x = v_x \cdot t = v_o \cdot \cos \theta \cdot t$$

**Sumbu Y:**

$$v_{oy} = v_o \cdot \sin \theta$$

$$v_y = v_o \cdot \sin \theta - g \cdot t \quad \dots (1.7)$$

$$y = v_o \cdot \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x}$$

... (1.8)

**Keterangan:**

$v_o$  : kecepatan awal (m/s)

$v_{ox}$  : kecepatan awal pada sumbu X (m/s)

$v_{oy}$  : kecepatan awal pada sumbu Y (m/s)

$v_x$  : kecepatan pada sumbu X (m/s)

$v_y$  : kecepatan pada sumbu Y (m/s)

$v$  : kecepatan pada suatu saat (m/s)

$x$  : kedudukan atau posisi pada sumbu X (m)

$y$  : kedudukan atau posisi pada sumbu Y (m)

$\alpha$  : arah gerakan benda

$\theta$  : sudut elevasi

$g$  : percepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ )

Beberapa hal penting yang berkaitan dengan gerak parabola:

1. Persamaan 1.7 didasarkan pada gerakan benda yang mengarah ke atas, sedangkan arah percepatan gravitasi bumi adalah ke bawah. Oleh karena itu, persamaan di atas menggunakan tanda negatif (-) untuk nilai  $g$ . Namun, jika gerakan diawali dengan gerak ke bawah, seperti gerakan bom yang dijatuhkan dari pesawat maka arah gerak benda searah dengan percepatan gravitasi. Ini berarti unsur  $g$  yang semula negatif menjadi positif.
2. Pada titik tertinggi nilai  $v_y = 0$  m/s, sehingga nilai  $v = v_{ox} = v_x$ .
3. Pada titik terjauh nilai  $y = 0$ . Saat mencari  $t$  dari  $y = 0$  diperoleh dua nilai  $t$ . Jika salah satu nilai  $t = 0$  maka nilai  $t$  yang digunakan adalah yang besar.

Untuk lebih jelasnya, pelajarilah contoh soal berikut! Kemudian lakukan diskusi dan pelatihan di bawahnya!

### Contoh Soal

1. Sebuah bola ditendang oleh Tambunan dengan sudut elevasi  $45^\circ$  dan kecepatan awal 20 m/s. Tentukan:

- posisi saat  $t = 1$  s,
- koordinat titik tertinggi,
- koordinat titik terjauh,
- kecepatan saat  $t = 1$  s,
- arah kecepatan saat  $t = 1$  s.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\theta = 45^\circ$

$$v_o = 20 \text{ m/s}$$

- Ditanyakan:
- $(x, y)_{t=1} = \dots ?$
  - $(x, y)_{\text{tertinggi}} = \dots ?$
  - $(x, y)_{\text{terjauh}} = \dots ?$
  - $v_{t=1} = \dots ?$
  - $\alpha = \dots ?$

Jawab:

a.  $x = v_o \cdot \cos \theta \cdot t = 20 \cdot \cos 45^\circ \cdot 1 = 10\sqrt{2} \text{ m/s}$   
 $y = v_o \cdot \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 = 20 \cdot \sin 45^\circ \cdot 1 - \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 1^2$   
 $y = (10\sqrt{2} - 5) \text{ m/s}$   
 Jadi, posisi bola setelah 1 s adalah  $(10\sqrt{2}, 10\sqrt{2} - 5) \text{ m/s}$ .

- b. Pada titik tertinggi  $v_y = 0$ , sehingga:

$$v_y = v_o \cdot \sin \theta - g \cdot t$$

$$0 = 20 \cdot \sin 45^\circ - 10 \cdot t$$

$$t = \sqrt{2} \text{ s}$$

Nilai  $t$  tersebut kemudian dimasukkan pada

$$x = v_o \cdot \cos \theta \cdot t = 20 \cdot \cos 45^\circ \cdot \sqrt{2} = 20 \text{ m/s}$$

$$y = v_o \cdot \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 = 20 \cdot \sin 45^\circ \cdot \sqrt{2} - \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot (\sqrt{2})^2 = 10 \text{ m/s}$$

Jadi, posisi bola pada titik tertinggi adalah  $(20, 10) \text{ m/s}$ .

- c. Pada titik terjauh  $y = 0$  sehingga:

$$y = v_o \cdot \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

$$0 = 20 \cdot \sin 45^\circ \cdot t - \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot t^2$$

$$0 = 20 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot t - 5 \cdot t^2$$

$$0 = 10\sqrt{2} \cdot t - 5 \cdot t^2$$

$$0 = t (10\sqrt{2} - 5t)$$

$$t = 0 \quad \text{atau} \quad 10\sqrt{2} - 5t = 0$$

$$5t = 10\sqrt{2}$$

$$t = 2\sqrt{2}$$

maka diperoleh nilai  $t = 0$  atau  $t = 2\sqrt{2}$  s.

Gunakan  $t = 2\sqrt{2}$  s

$$x = v_o \cdot \cos \theta \cdot t = 20 \cdot \cos 45^\circ \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 40 \text{ m}$$

Jadi, posisi bola di titik terjauh adalah (40,0) m.

$$d. \quad v_x = v_o \cdot \cos \theta = 20 \cdot \cos 45^\circ = 10\sqrt{2} \text{ m/s}$$

$$v_y = v_o \cdot \sin \theta - g \cdot t = 20 \cdot \sin 45^\circ - 10 \cdot 1$$

$$v_y = (10\sqrt{2} - 10) \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(10\sqrt{2})^2 + (10\sqrt{2} - 10)^2}$$

$$= 10\sqrt{5 - 2\sqrt{2}} \text{ m/s}$$

$$\frac{v_y}{v_x} = \frac{(10\sqrt{2} - 10)}{10\sqrt{2}}$$

$$e. \quad \tan \alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{(10\sqrt{2} - 10)}{10\sqrt{2}} = 0,293 \text{ maka } \alpha = 16,3^\circ$$

2. Dian melempar bola mendatar dengan kecepatan 10 m/s dari puncak gedung setinggi 125 m. Tentukan:

- waktu yang diperlukan bola untuk mencapai tanah,
- jarak mendatar yang ditempuh bola.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $y = 125 \text{ m}$

$v_{ok} = 10 \text{ m/s}$

Ditanyakan:  $t = \dots ?$

$x = \dots ?$

Jawab:

$$a. \quad v_{ox} = 10 \text{ m/s} \text{ dan } v_{oy} = 0 \text{ m/s}$$

$$y = v_o \cdot \sin \theta \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

$$125 = 0 + \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot t^2 \text{ maka } t = 5 \text{ s}$$

$$b. \quad x = v_{ox} \cdot t = 10 \cdot 5 = 50 \text{ m}$$

*Diskusikan bersama kelompokmu tentang beberapa jenis gerak berikut ini!*

- Gerakan pesawat terbang saat lepas landas.
- Gerak bom atom saat dijatuhkan dari pesawat pengebom di Hiroshima.
- Gerakan roket Eksoset saat diarahkan ke pesawat tempur.
- Gerak peluru yang ditembakkan polisi saat memberi tembakan peringatan ke atas.

Apakah gerakan-gerakan tersebut termasuk gerak parabola? Berikan penjelasannya!



## Diskusi

Setelah itu presentasikan hasil diskusimu di depan kelas! Beri kesempatan kepada kelompok lain untuk menanggapi!

*Kerjakan bersama kelompokmu!*

1. Dody memukul *shuttle cock* dengan kecepatan awal 20 m/s dan sudut elevasi  $60^\circ$ . Tentukan jarak terjauh yang ditempuh *shuttle cock* tersebut!
2. Sebuah bom dijatuhkan dari pesawat dengan ketinggian 2.000 m di atas permukaan tanah. Jika kecepatan mendatar bom adalah 200 m/s, tentukan jarak mendatar yang ditempuh bom!
3. Burhan melempar bola dengan vektor posisi  $\mathbf{r} = 5 t \mathbf{i} + (2 t^2 - 1) \mathbf{j}$ , tentukan vektor posisi titik tertinggi yang dicapai bola!



## Kerja Kelompok 2

### C. Gerak Melingkar

Di kelas X telah kita pelajari tentang gerak melingkar dan besaran-besaran dalam gerak melingkar. Gerak melingkar ada dua macam yaitu, gerak melingkar beraturan (GMB) dan gerak melingkar berubah beraturan (GMBB). Suatu benda dikatakan mengalami **gerak melingkar** jika lintasan gerakanya berupa lingkaran. Contoh gerak melingkar antara lain pergerakan roda kendaraan, gerak pada baling-baling kipas angin, dan gerak jarum jam.

Apabila suatu benda bergerak melingkar dengan kelajuan tetap

namun kecepatannya selalu berubah atau kecepatan sudutnya tetap maka benda tersebut dikatakan mengalami gerak melingkar beraturan. Jika benda bergerak melingkar dengan kecepatan sudut berubah dan percepatan sudutnya tetap maka benda mengalami gerak melingkar berubah beraturan.

Besaran-besaran dalam gerak melingkar antara lain adalah posisi sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut.

## Gerak Melingkar

### 1. Posisi Sudut

**Posisi sudut** menggambarkan kedudukan sudut dalam gerak melingkar beraturan. Pusat gerak melingkar dijadikan sebagai pusat titik acuan.

Posisi sudut suatu benda dapat dinyatakan dalam koordinat kartesius  $(X, Y)$  atau dalam koordinat polar  $(r, \theta)$ . Perhatikan gambar 1.11 di samping! Sudut yang ditempuh suatu benda dalam koordinat polar  $\theta$ , menunjukkan posisi sudut. Posisi tersebut menggunakan

acuan sumbu  $X$  positif, dan diukur berlawanan dengan arah gerak jarum jam.

Hubungan antara posisi sudut dalam gerak melingkar dengan perpindahan dalam gerak lurus adalah sebagai berikut.

$$\theta = \frac{s}{r} \quad \dots (1.9)$$

**Keterangan:**

$\theta$  : sudut tempuh (rad)

$s$  : perpindahan dalam gerak lurus (m)

$r$  : jari-jari lintasan lingkaran (m)

## 2. Kecepatan Sudut

Pernahkah kamu melihat seorang pemain *ice skating* bergerak di atas lantai es yang licin seperti gambar 1.12 di samping? Seorang pemain *ice skating* yang melakukan gerak melingkar di atas lantai es yang licin semula bergerak melingkar beraturan. Saat pemain *ice skating* melakukan gerak melingkar maka ia akan menempuh sudut tertentu pada suatu selang waktu. Besar sudut yang ditempuh dinyatakan dengan radian.

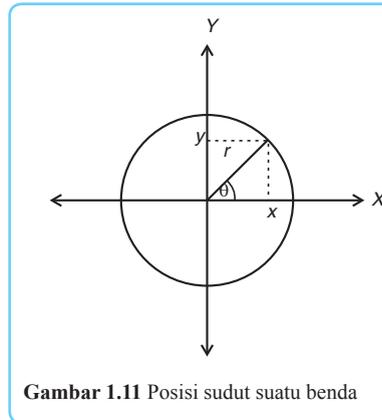
$$\left( 1 \text{ radian} = \frac{180^\circ}{\pi} = 57^\circ 17' 45'' \right)$$

Dengan demikian, **kecepatan sudut** adalah besarnya sudut yang ditempuh saat gerak melingkar tiap satuan waktu. Kecepatan sudut dilambangkan  $\omega$ . Besar sudut yang ditempuh dalam waktu satu periode  $T$  sama dengan  $2\pi$  radian. Periode adalah waktu yang diperlukan untuk melakukan satu kali putaran.

Satuan kecepatan sudut dinyatakan dalam rad/s atau putaran per menit (rpm). Satu putaran senilai dengan  $2\pi$  radian.

Dalam gerak melingkar terdapat dua jenis kecepatan sudut, yaitu kecepatan sudut rata-rata dan kecepatan sudut sesaat.

**Kecepatan sudut rata-rata** adalah hasil bagi perpindahan sudut dengan selang waktu yang ditempuh. Kecepatan sudut rata-rata dirumuskan:



Gambar 1.11 Posisi sudut suatu benda



Gambar 1.12 Pemain *ice skating* sedang membuat gerak melingkar beraturan

... (1.10)

**Keterangan:**

- $\omega$  : kecepatan sudut rata-rata (rad/s atau rpm)
- $\Delta\theta$  : perpindahan sudut (rad)
- $\Delta t$  : selang waktu yang ditempuh (s)
- $\theta_1$  : sudut awal (rad)
- $\theta_2$  : sudut akhir (rad)
- $t_1$  : waktu awal (s)
- $t_2$  : waktu akhir (s)

Sedangkan **kecepatan sudut sesaat** adalah turunan pertama dari posisi sudut, atau dapat pula ditentukan dari kemiringan garis singgung grafik posisi sudut terhadap waktu. Kecepatan sudut sesaat dirumuskan

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

... (1.11)

**Keterangan:**

- $\omega$  : kecepatan sudut sesaat (rad/s atau rpm)

Pada gerak lurus dan gerak melingkar, kecepatan sudutnya dapat ditentukan dari percepatan sudut dengan cara mengintegalkannya. Jadi, jika kecepatan sudut awal diketahui  $\omega_0$  dan percepatan sudut suatu gerak melingkar berubah beraturan  $\alpha$  diketahui maka kecepatan sudut sesaatnya dinyatakan:

$$\omega = \omega_0 + \int \alpha dt$$

Secara matematis, nilai integral suatu fungsi juga menunjukkan luas daerah di bawah kurva maka kecepatan sudut pun dapat ditentukan dengan menghitung luas grafik antara percepatan terhadap waktu. Dengan demikian, metode grafik dapat digunakan sebagai suatu alternatif penentuan kecepatan sudut.

Untuk lebih jelasnya, simaklah contoh soal berikut. Kemudian kerjakan kegiatan dan pelatihan di bawahnya!

**Contoh Soal**

Posisi sebuah sudut ditentukan oleh persamaan:  $\theta = (2t^2 + 5)$  rad. Tentukan:

- a. posisi sudut saat  $t = 0$  s,
- b. posisi sudut saat  $t = 3$  s,
- c. kecepatan sudut rata-rata dari  $t = 0$  s hingga  $t = 3$  s,
- d. kecepatan sudut saat  $t = 3$  s.

**Penyelesaian:**

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

- Ditanyakan:
- a.  $\theta_{t=0} = \dots ?$
  - b.  $\theta_{t=3} = \dots ?$
  - c.  $\omega = \dots ?$
  - d.  $\omega = \dots ?$

Jawab:

$$a. \theta = (2(0)^2 + 5) = 5 \text{ rad}$$

$$c. \omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{5 - 0}{1 - 0} = 5 \text{ rad/s}$$

$$b. \theta = (2(3)^2 + 5) = 23 \text{ rad}$$

$$d. \omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{23 - 0}{3 - 0} = 7,7 \text{ rad/s}$$

### Gerak Melingkar

#### A. Tujuan

Menganalisis berbagai gerak melingkar dalam kehidupan sehari-hari.

#### B. Alat dan Bahan

1. Roda sepeda 1 buah
2. Kipas angin 1 buah

#### C. Langkah Kerja

1. Lakukan pengamatan terhadap beberapa gerak melingkar berikut ini!
  - a. Gerakan roda sepeda yang berjalan mengelilingi lapangan sekolah.
  - b. Gerak kipas angin di dalam ruang kelas.
2. Carilah tiga gerak melingkar lainnya yang ada di sekitarmu, kemudian amatilah!



## Praktikum 2

3. Buatlah analisis dan kesimpulan dari semua gerakan yang telah kamu amati! Apakah kelima gerakan tersebut memiliki karakter gerakan yang sama?
4. Presentasikan hasil pengamatanmu di depan kelas! Beri kesempatan kepada kelompok lain untuk menanggapi!
5. Jangan lupa untuk mengembalikan peralatan yang telah kamu gunakan ke tempat semula! Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!

Buatlah mainan yang bekerja dengan prinsip gerak melingkar. Salah satu contoh mainan yang bekerja dengan prinsip gerak melingkar adalah gasingan. Bagaimana dengan mainanmu? Tunjukkanlah mainan buatanmu pada pertemuan yang akan datang, serta jelaskan di depan teman-temanmu prinsip kerja mainanmu!

### 3. Percepatan Sudut

Coba kamu amati gerak roda motor yang bergerak dari rumah ke sekolah! Selama perjalanan, roda tersebut tidak mungkin memiliki kecepatan sudut yang tetap. Roda kadang berputar pelan karena harus menghindari rintangan atau kadang berputar lebih cepat karena melewati jalan lurus tanpa hambatan. Bahkan, roda kadang harus berhenti karena lampu merah pengatur jalan raya menyala. Perubahan kecepatan sudut pada roda tersebut menunjukkan besarnya percepatan sudut yang terjadi pada roda.

Oleh karena kecepatan sudut dari suatu gerak melingkar tidak selalu tetap, dikenal istilah percepatan sudut. Percepatan sudut menunjukkan adanya perubahan kecepatan sudut dalam suatu selang waktu tertentu.

Dengan demikian **percepatan sudut** adalah laju perubahan kecepatan sudut yang terjadi tiap satuan waktu. Semakin besar perubahan kecepatan sudut pada gerak melingkar maka semakin besar pula percepatan sudutnya. Demikian juga, semakin besar

pengurangan kecepatan sudut pada gerak melingkar maka semakin besar nilai perlambatan sudut dari gerak melingkar itu.

**Percepatan sudut rata-rata** adalah hasil bagi perubahan kecepatan sudut dengan selang waktu yang ditempuh. Secara matematis dapat dirumuskan:

$$\dots (1.12)$$

**Keterangan:**

$\alpha$  : percepatan sudut rata-rata (rad/s<sup>2</sup>)

$\Delta\omega$  : perubahan kecepatan sudut (s)

$\Delta t$  : perubahan waktu (rad/s)

$\omega_1$  : kecepatan sudut awal (rad/s)

$\omega_2$  : kecepatan sudut akhir (rad/s)

$t_1$  : waktu awal (s)

$t_2$  : waktu akhir (s)

**Percepatan Sudut**

**Percepatan sudut sesaat** adalah percepatan rata-rata dengan nilai  $dt$  sangat kecil sekali. Percepatan sudut sesaat dapat pula ditentukan dari kemiringan garis singgung grafik kecepatan sudut terhadap waktu. Percepatan sudut sesaat dirumuskan sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \dots (1.13)$$

**Ket:**  $\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} \text{ (rad/s}^2\text{)}$

Jika digambarkan dalam suatu grafik, percepatan sudut sesaat (atau percepatan sudut) memiliki arah yang sama dengan arah gradien garis singgung kurva. Perhatikan gambar 1.13 di samping!

Satuan percepatan sudut adalah rad/s<sup>2</sup>, dan senilai dengan tangen garis singgung pada grafik.

$$\alpha = \tan \delta$$

**Keterangan:**

$\alpha$  : percepatan sudut (rad/s<sup>2</sup>)

$\delta$  : sudut yang dibentuk garis singgung dengan sumbu mendatar (°)

Untuk lebih jelasnya perhatikan, contoh soal berikut!

**Contoh Soal**

1. Kecepatan sudut sebuah roda dinyatakan dalam sebuah persamaan:  $\omega = (3t^2 + t) \text{ rad/s}$ .

Tentukan:

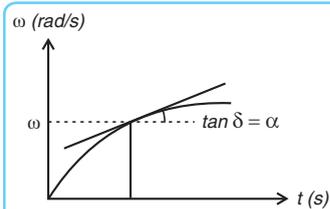
- kecepatan sudut saat  $t = 1 \text{ s}$ ,
- kecepatan sudut saat  $t = 4 \text{ s}$ ,
- percepatan sudut rata-rata dari  $t = 1 \text{ s}$  hingga  $t = 4$

- s,
- percepatan sudut saat  $t = 5$  s,
  - posisi sudut saat  $t = 2$  s, jika posisi sudut awal 2 rad.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\omega = (3t^2 + t)$  rad/s

- Ditanyakan:
- $\omega_{t=1} = \dots ?$
  - $\omega_{t=4} = \dots ?$
  - $\alpha = \dots ?$
  - $\alpha = \dots ?$



**Gambar 1.13** Grafik Kecepatan sudut terhadap waktu

- $\theta_{t=2} = \dots ?$

Jawab:

- $\omega = (3(1)^2 + 1) = 4$  rad/s
- $\omega = (3(4)^2 + 4) = 52$  rad/s
- $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(3t^2 + t)}{dt} = 6t + 1 = 16$  rad/s<sup>2</sup>
- $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = (6t + 1)$  maka saat  $t = 5$  s

$$\alpha = (6(5) + 1) = 31 \text{ rad/s}^2$$

$$e. \theta = \theta_0 + \int (3t^2 + t) dt$$

$$\theta = 2 + t^3 + \frac{1}{2}t^2, \text{ saat } t = 2 \text{ s maka diperoleh}$$

$$\theta = 12 \text{ rad}$$

- Posisi sudut sebuah titik yang bergerak melingkar pada tepi sebuah roda adalah:  $\theta = (4t^3 + 5t^2 + 2t + 6)$  rad.

Tentukan:

- kecepatan sudut rata-rata dari  $t = 0$  hingga  $t = 4$  s,
- percepatan sudut rata-rata dari  $t = 0$  hingga  $t = 4$  s,
- kecepatan sudut saat  $t = 2$  s,
- percepatan sudut saat  $t = 2$  s.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\theta = (4t^3 + 5t^2 + 2t + 6)$  rad

$$\omega = (12t^2 + 10t + 2) \text{ rad/s}$$

$$\alpha = (24t + 10) \text{ rad/s}^2$$

- Ditanyakan:
- $\omega = \dots ?$
  - $\alpha = \dots ?$
  - $\omega_{t=2} = \dots ?$

$$d. \alpha_{t=2} = \dots ?$$

Jawab:

$$a. \theta = (4t^3 + 5t^2 + 2t + 6) \text{ rad}$$

$$\theta_1 = (4 \cdot 0^3 + 5 \cdot 0^2 + 2 \cdot 0 + 6) \text{ rad} = 6 \text{ rad}$$

$$\theta_2 = (4 \cdot 4^3 + 5 \cdot 4^2 + 2 \cdot 4 + 6) \text{ rad} = 350 \text{ rad}$$

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{350 - 6}{4} = 86 \text{ rad/s}$$

$$b. \omega = (12t^2 + 10t + 2) \text{ rad/s}$$

$$\omega_1 = (12 \cdot 0^2 + 10 \cdot 0 + 2) \text{ rad/s} = 2 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = (12 \cdot 4^2 + 10 \cdot 4 + 2) \text{ rad/s} = 234 \text{ rad/s}$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{234 - 2}{4} = 58 \text{ rad/s}^2$$

$$c. \omega_{t=2} = (12 \cdot 2^2 + 10 \cdot 2 + 2) = 70 \text{ rad/s}$$

$$d. \alpha_{t=2} = (24 \cdot 2 + 10) = 58 \text{ rad/s}^2$$

**A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!**

1. Togar mengendarai sepeda sejauh 3 km dengan arah  $30^\circ$  timur laut terhadap sumbu X positif. Jika arah timur dijadikan sumbu X positif maka notasi vektor perpindahannya adalah . . . .

$$a. \Delta r = (1,5i\sqrt{3} + 1,5j) \quad (\Delta\theta = (350 - 6))$$

$$b. \Delta r = (1,5i\sqrt{3} + 1,5j) \quad (\Delta t = (4 - 0))$$

$$c. \Delta r = (3\sqrt{3}i + 1,5j)$$

$$d. \Delta r = (3\sqrt{3}i + 1,5\sqrt{3}j)$$

$$e. \Delta r = (3\sqrt{3}i + 1,5j) \quad (\Delta\omega = (234 - 2))$$

2. Posisi suatu partikel memenuhi persamaan  $r = 2t + t^2$  dengan  $r$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Kecepatan partikel saat  $t = 5$  sekon adalah . . . .

$$a. 3 \text{ m/s}$$

$$b. 5 \text{ m/s}$$



## Rangkuman

### 1. Gerak Lurus

Perpindahan  $\rightarrow \mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$

$\rightarrow$  besar perpindahan  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

kecepatan  $\rightarrow \mathbf{v} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k}$

$\rightarrow$  kelajuan  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$

percepatan  $\rightarrow \mathbf{a} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}$

$\rightarrow$  perlajuan  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$

turunan

integral

Kecepatan rata-rata :  $\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{t_2 - t_1}$  (tidak memerlukan turunan)

Percepatan rata-rata :  $\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{t_2 - t_1}$  (tidak memerlukan turunan)

Kecepatan sesaat :  $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \rightarrow \mathbf{r} = \int \mathbf{v} dt$

Percepatan sesaat :  $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \rightarrow \mathbf{v} = \int \mathbf{a} dt$

### 2. Gerak Parabola

Persamaan posisi dan komponen kecepatan

**Sumbu X:**

$$v_{ox} = v_o \cdot \cos \theta$$

$$v_x = v_o \cdot \cos \theta$$

$$x = v_x \cdot t = v_o \cdot \cos \theta \cdot t$$

**Sumbu Y:**

$$v_{oy} = v_o \cdot \sin \theta$$

$$v_y = v_o \cdot \sin \theta - g \cdot t$$

$$y = v_o \cdot \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Persamaan kecepatan dan arah gerakan partikel:

$$v = \sqrt{3v_x^2 + v_y^2}$$

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x}$$

### 3. Gerak Melingkar

Posisi sudut  $\rightarrow \theta$  fungsi  $t$   
Kecepatan  $\rightarrow \omega$  fungsi  $t$   
Percepatan  $\rightarrow \alpha$  fungsi  $t$



turunan integral

Kecepatan sudut rata-rata :  $\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$  (tidak memerlukan turunan)

Percepatan sudut rata-rata :  $\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$  (tidak memerlukan turunan)

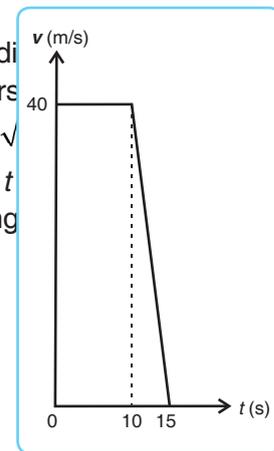
Kecepatan sudut sesaat :  $\omega = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \theta = \theta_o + \int \omega dt$

Percepatan sudut sesaat :  $\alpha = \frac{d\omega}{dt} \rightarrow \omega = \omega_o + \int \alpha dt$



## Soal-soal Uji Kompetensi

- c. 8 m/s  
d. 12 m/s  
e. 15 m/s
3. Motor Agus bergerak dengan kecepatan 20 m/s dalam arah  $210^\circ$  berlawanan dengan arah jarum jam terhadap sumbu X positif. Komponen vektor kecepatan terhadap sumbu X dan sumbu Y adalah . . . .
- a.  $v_x = -10$  m/s ;  $v_y = -5$  m/s  
b.  $v_x = -10\sqrt{3}$  m/s ;  $v_y = -5$  m/s  
c.  $v_x = -12\sqrt{3}$  m/s ;  $v_y = -6$  m/s  
d.  $v_x = -10\sqrt{3}$  m/s ;  $v_y = -8$  m/s  
e.  $v_x = -10\sqrt{3}$  m/s ;  $v_y = -10$  m/s
4. Posisi ketinggian sebuah balon udara dinyatakan dalam persamaan:  $y = 20t - 5t^2$ , dengan  $y$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Kecepatan awal balon adalah . . . .
- a. 2 m/s  
b. 5 m/s  
c. 10 m/s  
d. 20 m/s  
e. 50 m/s
5. Sebuah sepeda motor bergerak dengan kecepatan seperti gambar di bawah. Besar percepatan saat  $t = 12$  sekon adalah . . . .
- a.  $-2$  m/s<sup>2</sup>  
b.  $-5$  m/s<sup>2</sup>  
c.  $-8$  m/s<sup>2</sup>  
d.  $-10$  m/s<sup>2</sup>  
e.  $-12$  m/s<sup>2</sup>
6. Seekor burung terbang dengan persamaan lintasan  $y = 27t - t^3$ ,  $y$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Tinggi maksimum burung adalah . . . .
- a. 108 m  
b. 81 m  
c. 54 m  
d. 27 m  
e. 3 m
7. Sebuah peluru diempunyai persamaan lintasan  $r = 30ti + (30\sqrt{3} - 5t^2)j$  dalam meter,  $t$  dalam sekon. Jarak maksimum yang ditempuh peluru adalah . . . .
- a. 135 m  
b.  $135\sqrt{3}$  m  
c. 180 m  
d.  $180\sqrt{3}$  m  
e. 270 m
8. Roda mobil berputar dengan persamaan posisi sudut  $\theta = 2t + 2t^2$ .  $\theta$  dalam radian dan  $t$  dalam sekon. Kecepatan sudut roda mobil saat  $t = 2$  sekon adalah . . . .
- a. 4 rad/s  
b. 7 rad/s  
c. 10 rad/s



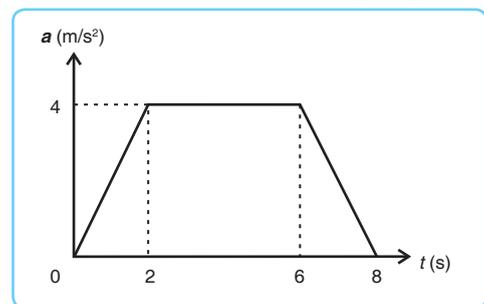
- d. 12 rad/s  
e. 15 rad/s
9. Persamaan kecepatan sudut suatu gerak melingkar dinyatakan dalam  $\omega = 3t^2 + 2t + 2$ , dengan  $\omega$  dalam rad/s dan  $t$  dalam sekon. Jika posisi sudut awal gerak melingkar 2 rad maka posisi sudut gerak melingkar saat  $t = 1$  s adalah . . . .
- a. 6 rad  
b. 5 rad  
c. 4 rad  
d. 3 rad  
e. 2 rad
10. Jika koordinat  $X$  horizontal dan  $Y$  vertikal maka sebuah benda yang bergerak mengikuti gerak peluru mempunyai komponen-komponen kecepatan yang . . . .
- a. besarnya tetap pada arah  $X$  dan berubah-ubah pada sumbu  $Y$   
b. besarnya tetap pada arah  $Y$  dan berubah-ubah pada arah  $X$   
c. besarnya tetap, baik pada arah  $X$  maupun pada arah  $Y$   
d. besarnya berubah-ubah, baik pada arah  $X$  maupun pada arah  $Y$   
e. besar dan arah terus-menerus berubah terhadap waktu.

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

1. Titik  $H$  mempunyai kedudukan (10,  $60^\circ$ ). Tentukan vektor posisi titik tersebut!
2. Fajar mengendarai sepeda dengan kecepatan seperti grafik berikut.

Tentukan:

- a. jarak yang ditempuh setelah sepeda Fajar bergerak 7 s,  
b. jarak total yang ditempuh Fajar selama 8 s.
3. Sebuah titik  $D$  mengalami perpindahan yang ditunjukkan dengan vektor perpindahan berikut.  
 $\mathbf{r} = (2t^2 + 3t)\mathbf{i} + (1 + 2t^3)\mathbf{j}$  m  
Tentukan:  
a. vektor kecepatan saat  $t = 4$  s,  
b. vektor percepatan saat  $t = 2$  s.
4. Sebuah bola ditendang Nicky dengan sudut elevasi  $45^\circ$  dan kecepatan awal 40 m/s. Tentukan:  
a. koordinat titik tertinggi,  
b. koordinat titik terjauh.
5. Posisi sudut sebuah titik yang ber-



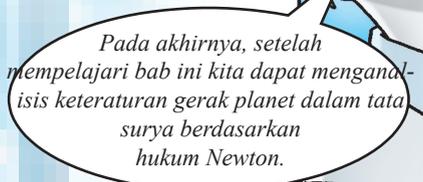
gerak melingkar dinyatakan:

$$\theta = (2t^3 + 3t^2 + 2t + 2) \text{ rad}$$

Tentukan:

- a. kecepatan sudut rata-rata dari  $t = 0$  hingga  $t = 4$  s,  
b. percepatan sudut rata-rata dari  $t = 0$  hingga  $t = 4$  s,  
c. kecepatan sudut saat  $t = 2$  s,  
d. percepatan sudut saat  $t = 2$  s.







Gambar 2.1 Bulan dilihat dari Bumi

Jika malam telah tiba, perhatikanlah bulan di langit! Apakah bulan dalam keadaan diam? Mengapa bulan tidak jatuh ke bumi? Perhatikan pula sebuah pohon di sekitarmu! Apakah ada daun yang jatuh di bawah pohon? Mengapa daun yang massanya ringan dapat jatuh ke permukaan bumi, sedangkan bulan yang massanya jauh lebih besar dibanding selembar daun tidak jatuh ke bumi? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut akan kita bahas pada bab ini.

**Kata Kunci:** Gaya Gravitasi – Medan Gravitasi – Hukum Kepler – Hukum Newton – Penerapan Hukum Gravitasi Newton

### A. Gravitasi

Pada abad XVI Masehi, Newton mengemukakan bahwa ada suatu "gaya pada suatu jarak" yang memungkinkan dua benda atau lebih saling berinteraksi. Istilah tersebut oleh Michael Faraday, pada abad XVIII diubah menjadi istilah **medan**. Medan adalah **tempat di sekitar suatu besaran fisik yang masih dipengaruhi oleh besaran tersebut dalam suatu satuan tertentu**. Sebagai contoh, gaya gravitasi akan bekerja pada massa suatu benda yang masih berada dalam medan gravitasi suatu benda atau planet. Jika medan gravitasi sudah dapat diabaikan maka sebuah massa yang berada di sekitar besaran benda tersebut tidak dapat dipengaruhi. Dengan demikian, dapat diketahui, mengapa daun yang massanya lebih kecil dibanding bulan yang massanya jauh lebih besar dapat ditarik oleh bumi. Berikut ini akan kita pelajari lebih jauh tentang gaya gravitasi.

Medan

## 1. Gaya Gravitasi

Dalam penelitiannya, Newton menyimpulkan bahwa gaya gravitasi atau gaya tarik-menarik antara dua benda dipengaruhi jarak kedua benda tersebut, sehingga gaya gravitasi bumi berkurang sebanding dengan kuadrat jaraknya. Bunyi hukum gravitasi Newton adalah **setiap partikel di alam semesta ini akan mengalami gaya tarik satu dengan yang lain. Besar gaya tarik-menarik ini berbanding lurus dengan massa masing-masing benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya.**

Secara matematis, hukum gravitasi Newton dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad \dots (2.1)$$

**Keterangan:**

$F$  : gaya tarik-menarik antara kedua benda (N)

$m_1$  : massa benda 1 (kg)

$m_2$  : massa benda 2 (kg)

$r$  : jarak kedua benda (m)

$G$  : tetapan gravitasi

Pada persamaan 2.1 muncul konstanta  $G$ . Konstanta ini menunjukkan nilai tetapan gravitasi bumi. Penentuan nilai  $G$  pertama kali dilakukan oleh Henry Cavendish dengan menggunakan neraca torsi. Neraca tersebut kemudian dikenal dengan neraca Cavendish. Pada neraca Cavendish terdapat dua buah bola dengan massa berbeda, yaitu  $m$  dan  $M$ .

Perhatikan gambar 2.2 di samping! Kedua bola pada gambar 2.2 dapat bergerak bebas pada poros dan tarik-menarik, sehingga akan memuntir serat kuarsa. Hal ini menyebabkan cahaya yang memantul pada cermin akan bergeser pada skala. Setelah mengkonversi skala dan memerhatikan jarak  $m$  dan  $M$  serta massa  $m$  dan  $M$ , Cavendish menetapkan nilai  $G$  sebesar  $6,754 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ . Nilai tersebut kemudian disempurnakan menjadi:

$$G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

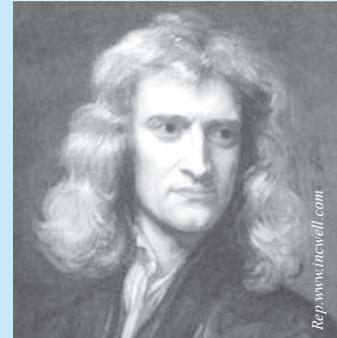
Gaya gravitasi merupakan besaran vektor. Apabila suatu benda mengalami gaya gravitasi dari dua atau lebih benda sumber gravitasi maka teknik mencari resultannya menggunakan teknik pencarian resultan vektor.

Dalam bentuk vektor gaya gravitasi dirumuskan:

### Hukum Gravitasi Newton

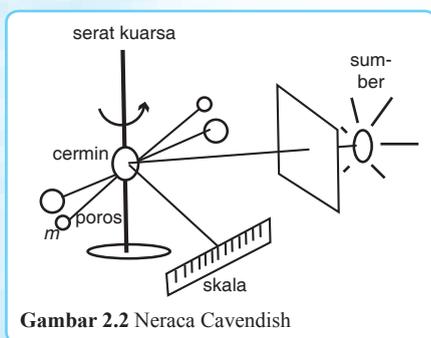


### Sebaiknya Tahu



**Gambar 2.3** Sir Isaac Newton

**Isaac Newton** dilahirkan di Inggris pada tahun 1642. Newton berhasil menemukan kalkulus dan teori gravitasi. Konon, teori gravitasi yang ditemukan Newton diilhami dari peristiwa jatuhnya buah apel yang dilihatnya. Ia heran mengapa buah apel jatuh ke bawah dan bukan ke atas. Newton meninggal pada usia 85 tahun (tahun 1727).



**Gambar 2.2** Neraca Cavendish

$$F = -G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} (\hat{r}) \quad \dots (2.2)$$

**Keterangan:**

$\hat{r}$  : vektor satuan arah jarak kedua benda ditinjau dari benda penyebab gaya, atau vektor satuan arah radial (m)

## 2. Medan Gravitasi

Sebagaimana telah kita singgung pada awal bab ini bahwa benda akan tertarik oleh gaya gravitasi benda lain atau planet jika benda tersebut berada dalam pengaruh medan gravitasi. Medan gravitasi ini akan menunjukkan besarnya percepatan gravitasi dari suatu benda di sekitar benda lain atau planet. Besar medan gravitasi atau percepatan gravitasi dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad \dots (2.3)$$

**Keterangan:**

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

$G$  : tetapan gravitasi ( $6,672 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ )

$M$  : massa dari suatu planet atau benda (kg)

$r$  : jarak suatu titik ke pusat planet atau pusat benda (m)

Hal yang perlu diperhatikan dalam membahas medan gravitasi atau percepatan gravitasi adalah konsep bahwa massa benda dan berat benda tidaklah sama. Massa benda di mana pun tetap, namun berat benda di berbagai tempat belum tentu sama atau tetap.

Besar percepatan gravitasi yang dialami semua benda di permukaan planet adalah sama. Jika selembar kertas jatuh ke tanah lebih lambat dari sebuah kelereng, bukan disebabkan karena percepatan gravitasi di tempat tersebut berbeda untuk benda yang berbeda. Hal ini disebabkan oleh adanya hambatan udara yang menahan laju kertas tersebut. Untuk lebih jelasnya, lakukanlah praktikum berikut ini!

## Praktikum



Lakukan-  
lah bersa-

ma kelompokmu!

### Percepatan Gravitasi

#### A. Tujuan

Menunjukkan bahwa percepatan gravitasi di suatu tempat adalah sama untuk semua benda.

#### B. Alat dan Bahan

1. *Stopwatch*            1 buah
2. Kertas                    1 buah
3. Kelereng                1 buah

### C. Langkah Kerja

1. Jatuhkan selembar kertas dan sebuah kelereng ke permukaan tanah dari ketinggian yang sama!
2. Hitunglah waktu yang diperlukan kertas dan kelereng tersebut untuk sampai ke permukaan tanah menggunakan *stopwatch*!
3. Ulangi percobaan itu berulang-ulang dengan bentuk kertas yang bervariasi! Caranya dengan meremas kertas dari ukuran besar hingga ukuran yang sangat mampat atau kecil.
4. Perhatikan dan bandingkan waktu yang diperlukan oleh kelereng dan kertas untuk sampai ke permukaan tanah!
5. Presentasikan hasilnya di depan kelompok lain!
6. Buatlah laporan hasil percobaan tersebut setelah dipresentasikan kemudian serahkan kepada guru untuk dinilai!

Agar kamu lebih paham tentang gravitasi, simaklah contoh soal berikut ini! Di situ kamu akan tahu bagaimana cara menyelesaikan soal gravitasi.

#### Contoh Soal

1.

jarak kedua benda dijadikan  $\frac{1}{2}$  kali semula!

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$F_1 = 400 \text{ N}$$

$$r_2 = \frac{1}{2} r_1$$

Ditanyakan:  $F_2 = \dots ?$

Jawab:

$$G \frac{m_1 \cdot m_2}{r_1^2}$$

$$\frac{F_2}{F_1} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r_2^2} \quad \text{semua nilai tetap, kecuali besarnya jarak yang}$$

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$\frac{F_2}{400} = \frac{r_1^2}{\left(\frac{1}{2} r_1\right)^2}$$

$$F_2 = 4 \times 400$$

$$F_2 = 1.600 \text{ N}$$

2. Dua benda masing-masing bermassa 2.500 kg dan 900 kg berada pada jarak 10 m. Tentukan letak benda ketiga di antara benda pertama dan kedua, jika benda ketiga yang bermassa 4.500 kg mengalami gaya gravi-

tasi nol!

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$m_1 = 2.500 \text{ kg}$$

$$m_2 = 900 \text{ kg}$$

$$m_3 = 4.500 \text{ kg}$$

$$r = 10 \text{ m}$$

Ditanyakan:  $x = \dots ?$

Jawab:

Langkah 1:

Menggambarkan posisi atau uraian gayanya.

$F_{13}$  = gaya tarik menarik antara benda 1 dan 3

$F_{23}$  = gaya tarik menarik antara benda 2 dan 3

Jika gaya yang dialami benda ketiga = nol maka besar  $F_{13} = F_{23}$

Langkah 2:

Analisis perhitungan

$$F_{13} = F_{23}$$
$$G \frac{m_1 \cdot m_3}{r_{13}^2} = G \frac{m_1 \cdot m_3}{r_{23}^2}$$

$$\frac{m_1}{r_{13}^2} = \frac{m_2}{r_{23}^2}$$

$$\frac{2.500}{(10-x)^2} = \frac{900}{x^2}$$

$$\sqrt{\frac{2.500}{(10-x)^2}} = \sqrt{\frac{900}{x^2}}$$

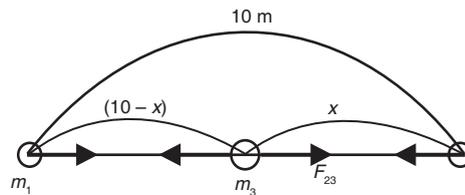
jika kedua ruas diakar maka akan diperoleh:

$$\frac{50}{(10-x)} = \frac{30}{x}$$

$$50x = 300 - 30x$$

$$80x = 300$$

$$x = 3,75 \text{ m}$$



### 3. Hukum-hukum Kepler

Di depan telah disinggung tentang hukum Newton yang mengatakan bahwa hukum gravitasi Newton berlaku untuk semua benda di jagat raya ini.

Hukum Newton juga menunjukkan bahwa pada umumnya jika sebuah benda (misalnya planet) bergerak mengelilingi pusat gaya (misalnya matahari), benda akan ditarik oleh gaya yang berubah sebanding

dengan  $\frac{1}{r^2}$ . Lintasan benda tersebut dapat berupa elips, parabola, atau hiperbola.

Hukum gravitasi Newton juga dapat diterapkan pada gerak benda-benda angkasa. Sebelum masuk ke penerapan tersebut, kita pelajari terlebih dahulu tentang pergerakan benda-benda angkasa. Pergerakan benda-benda angkasa telah dipelajari oleh Johannes Kepler dan dinyatakan dalam hukum-hukum Kepler berikut.

### a. Hukum I Kepler

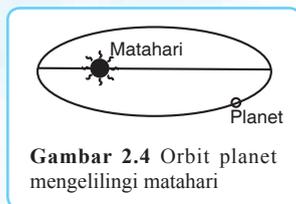
Hukum I Kepler menyatakan sebagai berikut.

Setiap planet bergerak pada lintasan berbentuk elips dengan matahari berada di salah satu fokus elips.

Hukum ini dapat menjelaskan lintasan planet yang berbentuk elips, namun belum dapat menjelaskan kedudukan planet terhadap matahari. Oleh karena itu, muncullah hukum II Kepler.

### Hukum I Kepler

b.



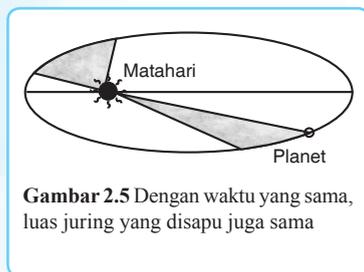
### Hukum II Kepler

Hukum II Kepler menyatakan sebagai berikut.

Suatu garis khayal yang menghubungkan matahari dengan planet menyapu luas juring yang sama dalam selang waktu yang sama.

Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 2.5 di samping! Anggaplah pada selang waktu  $\Delta t_1$ , planet menempuh lintasan dari A ke A', dan pada selang waktu  $\Delta t_2$  planet menempuh lintasan BB'.

### Hukum II Kepler



Jika  $\Delta t_1 = \Delta t_2$  maka luas AMA' sama dengan luas BMB'.

Apa konsekuensinya?

Konsekuensinya adalah ketika planet dekat dengan matahari, planet itu akan bergerak relatif cepat daripada ketika planet tersebut

berada jauh dari matahari. Coba kamu bayangkan apa yang terjadi jika ketika planet dekat dengan matahari kecepatannya lebih rendah dari yang semestinya!

### c. Hukum III Kepler

Hukum III Kepler menyatakan sebagai berikut.

Perbandingan antara kuadrat waktu revolusi dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet ke matahari adalah sama untuk semua planet.

Hukum III Kepler dapat dirumuskan seperti di bawah ini.

### Hukum III Kepler

$$\frac{T^2}{R^3} = k \quad \text{atau} \quad \frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3} \quad \dots (2.4)$$

**Keterangan:**

$T$  : waktu revolusi suatu planet (s atau tahun), kala revolusi bumi = 1 tahun

$R$  : jarak suatu planet ke matahari ( $m$  atau sa), jarak bumi ke matahari = 1 sa (satuan astronomis) = 150 juta km

Bagaimana kesesuaian hukum-hukum Kepler dengan hukum Newton? Untuk menjelaskan hal ini kita dapat melakukan pendekatan bahwa orbit planet adalah lingkaran dan matahari terletak pada pusatnya. Perhatikan gambar 2.6 di samping!

Sebagaimana telah kita bahas di depan bahwa gaya tarik-menarik antara planet dengan matahari dapat kita tuliskan sebagai:

$$F_g = G \frac{M \cdot m}{R^2} \quad \dots (2.5)$$

**Keterangan:**

$M$  : massa matahari (kg)

$m$  : massa planet (kg)

$R$  : jari-jari matahari (km)

Karena planet bergerak dalam lintasan lingkaran maka planet akan mengalami gaya sentripetal yang besarnya adalah:

$$F_s = m \frac{v^2}{R} \quad \dots (2.6)$$

Dalam hal ini  $F_s = F_g$  maka:

$$m \frac{v^2}{R} = G \frac{M \cdot m}{R^2}$$
$$v^2 = G \frac{M}{R} \quad \dots (2.7)$$

Sedangkan pada gerak melingkar berlaku:

$$v = \omega \cdot R \quad \dots (2.8)$$

dan

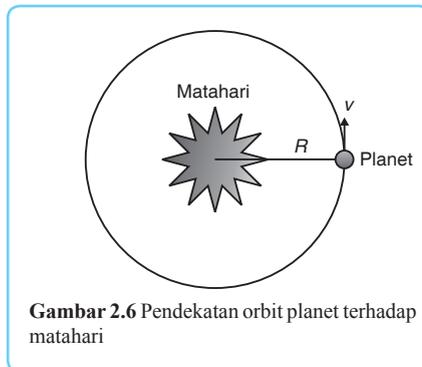
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \dots (2.9)$$

Jika persamaan 2.8 dan 2.9 kita substitusikan ke persamaan 2.7 akan kita peroleh:

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

atau

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



**Gambar 2.6** Pendekatan orbit planet terhadap matahari

$$4\pi^2$$

dalam hal ini  $k = \frac{GM}{R^3}$ .

Berdasarkan uraian di atas, dapat kita ketahui bahwa ternyata hukum gravitasi Newton memiliki kesesuaian dengan tata edar planet seperti yang dirumuskan oleh hukum Kepler.

Agar kamu lebih memahami hubungan antara hukum Kepler dan hukum Newton, perhatikan contoh soal berikut ini, kemudian kerjakan soal-soal di bawahnya!

### Contoh Soal

Kala revolusi suatu planet terhadap matahari adalah 4 tahun. Tentukan jarak planet tersebut terhadap matahari!

#### Penyelesaian:

Diketahui:

$$T = 4 \text{ tahun}$$

Ditanyakan:  $R = \dots?$

Jawab:

Jika nilai pembanding dari planet lain tidak diketahui, gunakan nilai

yang dimiliki bumi.

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3}$$

$$\frac{1^2}{R^3} = \frac{4^2}{R_2^3}$$

$$R_2 = \sqrt[3]{16}$$

$$R_2 = 2,5 \text{ sa}$$

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Dua planet masing-masing bermassa  $10^{20}$  kg dan  $4 \times 10^{20}$  kg. Jarak antara kedua pusat planet tersebut adalah  $2 \times 10^5$  km. Tentukan besar gaya tarik-menarik antara kedua planet tersebut!
2. Sebuah planet bermassa  $6 \times 10^{24}$  kg dan berjari-jari  $4 \times 10^6$  km. Tentukan percepatan gravitasi di permukaan planet tersebut!
3. Suatu benda di permukaan planet bumi memiliki berat 2.500 N.



### Kerja Mandiri 1

dihitung dari permukaan bumi!

## B. Hukum-hukum Newton tentang Gerak

Selain hukum gravitasi, Newton juga mengembangkan tiga hukum tentang gerak yang menjelaskan bagaimana gaya menyebabkan benda bergerak. Semua hukum Newton ini sering disebut fisika klasik. Berikut ini akan kita pelajari ketiga hukum Newton tersebut.

## 1. Hukum I Newton

Sebuah benda akan tetap diam jika tidak ada gaya yang bekerja padanya. Demikian pula sebuah benda akan tetap bergerak lurus beraturan (kecepatan benda tetap) jika gaya atau resultan gaya pada benda adalah nol. Pernyataan ini dirumuskan menjadi hukum I Newton yang berbunyi sebagai berikut.

**Sebuah benda akan tetap diam atau tetap bergerak lurus beraturan jika tidak ada resultan gaya yang bekerja pada benda itu.**

Coba perhatikan gambar 2.7 di samping! Pada gambar 2.7 benda dalam keadaan diam karena gaya dorong, gaya gesek, gaya berat, gaya normal pada benda setimbang. Dengan kata lain, benda tersebut diam karena resultan gaya pada benda = 0.

Sebagai contoh, sebuah batu besar di lereng gunung akan tetap diam di tempatnya sampai ada gaya luar lain yang memindahkannya. Misalnya ada gaya tektonis/gempa atau gaya mesin dari bulldoser. Demikian pula, bongkahan batu meteor di ruang angkasa akan terus bergerak selamanya dengan kecepatan tetap sampai ada gaya yang mengubah kecepatannya. Misalnya batu meteor itu bertumbukan dengan meteor lain.

Jadi, jika resultan dari gaya-gaya yang bekerja pada sebuah benda sama dengan nol ( $\Sigma F = 0$ ) maka percepatan benda juga sama dengan nol ( $a = 0$ ). Dengan demikian:

- jika benda dalam keadaan diam maka benda akan tetap diam, atau
- jika benda dalam keadaan bergerak lurus beraturan maka benda akan tetap bergerak lurus beraturan.

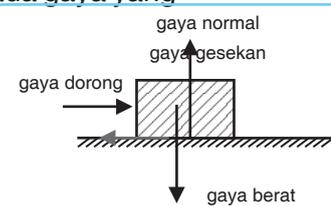
Benda akan selalu berusaha mempertahankan keadaan awal jika benda tidak dikenai gaya atau resultan gaya. Hal ini yang menyebabkan hukum I Newton disebut sebagai hukum kelembaman/inersia (malas/inert untuk berubah dari keadaan awal). Dalam persamaan matematis, hukum I Newton adalah sebagai berikut.

$$\Sigma F = 0 \quad \dots (2.10)$$

**Keterangan:**

$\Sigma F$  : resultan gaya yang bekerja pada benda (N)

Jika benda bergerak lurus beraturan atau diam pada sistem koordinat kartesius, persamaan 2.10 menjadi:



**Gambar 2.7** Arah gaya dorong, gaya gesekan, dan gaya normal yang seimbang menyebabkan benda tetap diam

**Hukum I  
Newton**

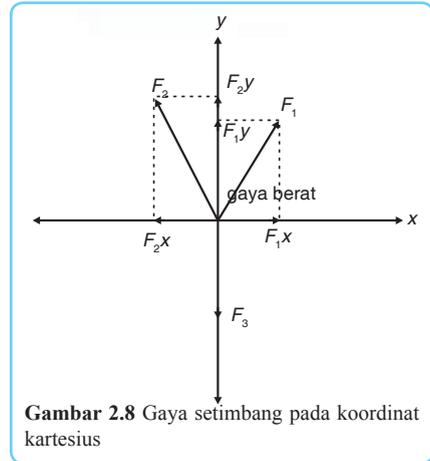
$$\Sigma F_x = 0 \text{ dan } \Sigma F_y = 0 \quad \dots (2.11)$$

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa jika  $\Sigma F = 0$  maka benda tidak mengalami percepatan ( $a = 0$ ). Jika digambarkan dalam koordinat kartesius, gaya-gaya yang bekerja pada benda diam atau bergerak lurus beraturan dapat kita lihat pada gambar 2.8.

Setelah kamu mempelajari materi-materi di atas, kerjakan latihan di bawah ini bersama temanmu!

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

1. Pada saat kamu duduk di dalam mobil yang melaju dengan kecepatan tetap, tiba-tiba mobil direm mendadak. Apa yang terjadi? Mengapa tubuhmu bergerak maju ke depan?
2. Menara Pisa (lihat gambar di samping!) termasuk salah satu keajaiban dunia yang terkenal sebagai menara miring. Kemiringan itu selalu bertambah setiap waktu. Mengapa demikian? Dapatkah laju kemiringan itu dihentikan?
3. Kumpulkan hasil kerjamu kepada guru untuk dinilai!



Gambar 2.8 Gaya setimbang pada koordinat kartesius



## Kerja Berpasangan

### 2. Hukum II Newton

Apabila resultan gaya yang timbul pada sebuah benda tidak sama dengan nol maka benda tersebut akan bergerak dengan percepatan tertentu. Perhatikan gambar 2.9 di samping! Sebuah benda bermassa  $m$  mendapat gaya  $F$  akan bergerak dengan percepatan  $a$ . Jika benda semula dalam keadaan diam maka benda itu akan bergerak dipercepat dengan percepatan tertentu. Adapun jika benda semula bergerak dengan kecepatan tetap maka benda akan berubah menjadi gerak dipercepat atau diperlambat.



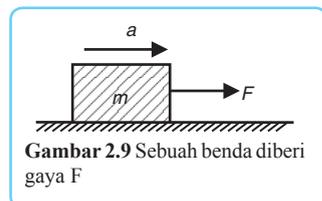
Resultan gaya yang bekerja pada benda bermassa konstan setara dengan hasil kali massa benda dengan percepatannya. Pernyataan ini dikenal sebagai hukum II Newton dan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Sigma F = m \cdot a \quad \dots (2.12)$$

**Keterangan:**

$m$  : massa benda (kg)

$a$  : percepatan benda ( $m/s^2$ )



Gambar 2.9 Sebuah benda diberi gaya  $F$

Guna menguji pemahamanmu, cobalah kerjakan kegiatan berikut

**Hukum II  
Newton**

ini!

*Kerjakan soal berikut dengan tepat!*

Seorang pembalap mengayuh sepeda dengan kelajuan 36 km/jam. Selama 10 detik mendapat tambahan dari gaya otot sehingga kelajuannya berubah menjadi 72 km/jam. Jika gaya yang bekerja pada sepeda adalah 60 N, berapakah massa sepeda tersebut?

### 3. Hukum III Newton

Ketika kamu mendorong dinding, sesungguhnya pada saat yang sama dinding tersebut memberikan gaya yang sama ke arahmu.



#### Kerja Mandiri 2

Bagaimana hal ini terjadi?

Kenyataan ini dikemukakan oleh Newton dalam hukumnya yang ketiga sebagai berikut.

Jika benda pertama mengerjakan gaya pada benda kedua maka benda kedua juga akan mengerjakan gaya pada benda

pertama yang besarnya sama, tetapi berlawanan arah. **Hukum III Newton** juga dikenal sebagai hukum aksi-reaksi. Secara matematis hukum III Newton dapat dituliskan sebagai berikut.



**Gambar 2.10** Dinding memberikan gaya yang sama ke arah orang yang mendorong

$$F_{\text{aksi}} = -F_{\text{reaksi}} \quad \dots (2.13)$$

Gaya aksi-reaksi terjadi pada dua benda yang berbeda, bukan pada satu benda yang sama. Sebagai contoh, gaya berat dan gaya normal pada sebuah buku yang tergeletak di meja bukan merupakan pasangan gaya aksi-

reaksi.

*Kerjakan soal berikut bersama kelompokmu!*

1. Gambarkan gaya aksi-reaksi pada seorang siswa yang sedang menarik gerobak!
2. Diskusikan dengan teman kelompokmu dan buatlah kesimpulannya!
3. Setelah selesai, presentasikanlah di depan kelas!

**Hukum III  
Newton**



## Kerja Kelompok

### C. Penerapan Hukum Gravitasi Newton pada Benda-benda Angkasa

Hukum gravitasi Newton berlaku untuk semua benda, termasuk benda-benda angkasa. Jika ada dua buah benda angkasa atau lebih berinteraksi maka benda-benda tersebut akan tarik-menarik (bekerja gaya gravitasi). Gaya gravitasi menyebabkan

bumi dan planet-planet dalam tata surya kita tetap mengorbit pada matahari. Gaya gravitasi antara bulan dan bumi menyebabkan terjadinya pasang surut air laut dan berbagai macam fenomena alam. Berikut ini merupakan contoh penerapan hukum gravitasi Newton pada benda-benda angkasa.

#### 1. Gaya antara Matahari dan Planet

Gaya yang muncul akibat interaksi antara matahari dengan planet bukan hanya gaya gravitasi. Pada sistem tersebut juga bekerja gaya sentripetal ( $F_s$ ) yang arahnya menuju pusat orbit planet. Gaya sentripetal dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_s = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad \dots (2.14)$$

**Keterangan:**

$F_s$  : gaya sentripetal (N)

$m$  : massa planet (kg)

$v$  : kelajuan planet mengorbit matahari (m/s)

$R$  : jarak matahari ke planet (km)

Dengan menggunakan persamaan 2.1 dan 2.14, massa matahari dapat ditentukan dengan rumus:

$$\begin{aligned} F_c &= F_s \\ m \cdot \frac{v^2}{R} &= G \cdot \frac{m \cdot M}{R^2} \\ v^2 &= \frac{G \cdot M}{R} \end{aligned}$$



Gambar. 2.11 Orbit planet-planet dalam tata surya

Rep. www.planets.asu

$$M = \frac{v^2 \cdot R}{G} \quad \dots (2.15)$$

**Keterangan:**

$M$ : massa matahari (kg)

Jika kita asumsikan bahwa lintasan planet mengelilingi matahari berbentuk lingkaran, kelajuan planet mengitari matahari adalah:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T} \quad \dots (2.16)$$

**Keterangan:**

$T$ : waktu revolusi planet (tahun)

Dari persamaan 2.15 dan 2.16 diperoleh:

$$M = \frac{v^2 \cdot R}{G} = \frac{\left(\frac{2\pi \cdot R}{T}\right)^2 \cdot R}{G} = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{G \cdot T^2} \quad \dots (2.17)$$

## 2. Gaya pada Satelit

Sebelumnya telah dijelaskan bahwa interaksi antara matahari dan planet akan menimbulkan gaya gravitasi dan gaya sentripetal. Prinsip yang sama juga berlaku untuk satelit yang mengorbit pada planet. Misalnya sebuah satelit mengitari planet dengan orbit berbentuk lingkaran. Gaya sentripetal yang dialami satelit berasal dari gaya gravitasi planet yang bekerja pada satelit tersebut. Besarnya kelajuan satelit mengitari planet dapat diketahui dengan rumus berikut.

$$\begin{aligned} F_s &= F \\ m \cdot \frac{v_s^2}{R} &= G \cdot \frac{m_s \cdot m}{r^2} \\ v_s^2 &= \frac{r}{G \cdot m} \\ v_s &= \sqrt{\frac{G \cdot m}{r}} \quad \dots (2.18) \end{aligned}$$

**Keterangan:**

$m_s$ : massa satelit (kg)

$r$ : jarak antara pusat planet dengan satelit (km)

$v_s$ : kelajuan satelit (m/s)

Agar lebih jelas tentang rumus tersebut, perhatikanlah contoh soal dan pembahasannya berikut ini!

### Contoh Soal

Kala revolusi planet merkurius adalah  $7,6 \cdot 10^6$  sekon. Jika massa matahari adalah  $2,01 \cdot 10^{30}$  kg, tentukan jarak merkurius ke matahari!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $T = 7,6 \cdot 10^6$

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

$G = 6,672 \cdot 10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>

Ditanyakan:  $R = \dots?$

Jawab:

$$M = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{G \cdot T^2}$$
$$R^3 = \frac{M \cdot G \cdot T^2}{4\pi^2}$$
$$R^3 = \frac{2,01 \cdot 10^{30} \cdot 6,672 \cdot 10^{-11} \cdot (7,6 \cdot 10^6)^2}{4 \cdot \left(\frac{22}{7}\right)^2}$$
$$R^3 = \frac{1,341072 \cdot 10^{20} \cdot 5,776 \cdot 10^{13}}{4 \cdot (9,8696)}$$
$$R^3 = \frac{7,7460 \cdot 10^{33}}{39,4784}$$
$$R^3 = 1,9621 \cdot 10^{32}$$
$$R^3 = \sqrt[3]{1,9621 \cdot 10^{32}}$$
$$R = 5,8109 \cdot 10^{10} \text{ m}$$

Cukup jelas, bukan? Coba sekarang kerjakan pelatihan berikut ini!

*Kerjakan soal berikut dengan tepat!*

1. Jarak rata-rata antara jupiter dengan matahari adalah  $7,783 \cdot 10^8$  m. Jika massa matahari  $2,01 \cdot 10^{30}$  kg dan tetapan  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>, tentukan kala revolusi planet jupiter!
2. Jarak sebuah satelit diukur dari pusat bumi adalah  $8,2 \cdot 10^6$  m. Jika massa bumi adalah  $5,97 \cdot 10^{24}$  kg dan  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>, tentukan kelajuan satelit mengitari bumi!
1. Hukum gravitasi Newton menyatakan bahwa setiap partikel di alam semesta ini akan mengalami gaya tarik satu dengan yang lain. Besar gaya tarik-menarik ini berbanding lurus dengan massa masing-masing benda

dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua-



### Kerja Mandiri 3

ya.

Secara matematis hukum gravitasi Newton dapat dirumuskan:

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

2. Medan gravitasi atau percepatan gravitasi dirumuskan:



## Rangkuman

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

- Hukum I Kepler menyatakan bahwa setiap planet bergerak pada lintasan berbentuk elips dengan matahari berada di salah satu fokus elips.
- Hukum II Kepler menyatakan bahwa suatu garis khayal yang menghubungkan matahari dengan planet menyapu luas juring yang sama dalam selang waktu yang sama.
- Hukum III Kepler menyatakan bahwa perbandingan antara kuadrat waktu revolusi dengan pangkat tiga jarak rata-rata ke matahari adalah sama untuk semua planet. Hukum III Kepler dapat dirumuskan:

$$\frac{T^2}{R^3} = k \text{ atau } \frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3}, \text{ dengan } k = \frac{4\pi^2}{GM}$$

- Hukum I Newton menyatakan bahwa sebuah benda akan tetap diam atau tetap bergerak lurus beraturan jika tidak ada resultan gaya yang bekerja pada benda itu.

Hukum I Newton secara matematis dirumuskan:

$$\Sigma F = 0$$

- Hukum II Newton menyatakan bahwa resultan gaya yang bekerja pada benda yang bermassa konstan adalah setara dengan hasil kali massa benda dengan percepatannya.

Hukum II Newton dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Sigma F = m \cdot a$$

- Hukum III Newton menyatakan bahwa gaya aksi dan reaksi oleh dua buah benda pada masing-masing benda adalah sama besar dan berlawanan arah.

Hukum III Newton dirumuskan:

$$F_{\text{aksi}} = -F_{\text{reaksi}}$$

- Massa matahari dapat ditentukan dengan rumus:

$$M = \frac{v^2 \cdot R}{G} = \frac{4\pi \cdot R^3}{G \cdot T^2}$$

- Kelajuan suatu satelit mengitari planet ditentukan dengan rumus berikut.

$$v_s = \sqrt{\frac{G \cdot m}{r}}$$

**A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!**

1. Suatu planet mempunyai massa  $4 \times 10^{20}$  kg dan berjari-jari 4.000.000 km. Percepatan gravitasi di permukaan planet adalah . . . .
  - a.  $2,34 \text{ G m/s}^2$
  - b.  $4 \text{ G m/s}^2$
  - c.  $16 \text{ G m/s}^2$
  - d.  $25 \text{ G m/s}^2$
  - e.  $34,2 \text{ G m/s}^2$
2. Dua planet masing-masing bermassa  $m_1 = 25$  juta ton dan  $m_2 = 400$  juta ton. Jarak antarplanet adalah 2 juta kilometer. Letak suatu titik yang memiliki medan gravitasi nol adalah . . . .



### Soal-soal Uji Kompetensi

- a. 0,2 juta km dari  $m_1$
  - b. 0,4 juta km dari  $m_1$
  - c. 0,2 juta km dari  $m_2$
  - d. 0,4 juta km dari  $m_2$
  - e. 0,5 juta km dari  $m_2$
3. Suatu planet memiliki kala revolusi 8 tahun. Jarak planet itu ke matahari adalah . . . .
    - a.  $\frac{1}{4}$  sa
    - b.  $\frac{1}{2}$  sa
    - c. 2 sa
    - d. 4 sa
    - e. 8 sa
  4. Hukum II Kepler menyatakan bahwa dalam waktu yang sama, garis khayal yang menghubungkan suatu planet dengan matahari dalam orbit planet akan membentuk suatu juring yang memiliki luas . . . .
    - a.  $\frac{1}{2}$  luas juring terbesar
    - b. sama dengan juring yang lainnya
    - c. 2 kali luas juring lainnya
    - d. 4 kali luas juring lainnya
    - e. kuadrat luas juring lainnya
  5. Jika jarak suatu titik dijadikan 2 kali jarak semula dari pusat suatu planet, percepatan gravitasinya menjadi . . . .
    - a.  $\frac{1}{4}$  kali semula
    - b.  $\frac{1}{2}$  kali semula
    - c. tetap
    - d. 2 kali semula
    - e. 4 kali semula
  6. Oneng naik bus yang bergerak dengan kecepatan 40 km/jam. Tiba-tiba bus direm secara mendadak, akibatnya Oneng terdorong ke muka. Hal ini disebabkan karena . . . .
    - a. gaya dorong bus
    - b. gaya dari rem
    - c. sifat kelembaman Oneng
    - d. sifat kelembaman bus
    - e. gaya berat Oneng
  7. Sebuah mobil massanya 1 ton. Selama 4 sekon kecepatannya bertambah secara beraturan dari 10 m/s menjadi 18 m/s. Besar gaya yang mempercepat mobil itu adalah . . . .
    - a. 2.000 N
    - b. 4.000 N
    - c. 6.000 N
    - d. 8.000 N
    - e. 10.000 N
  8. Faktor-faktor yang memengaruhi gaya tarik-menarik dua benda di angkasa adalah . . . .

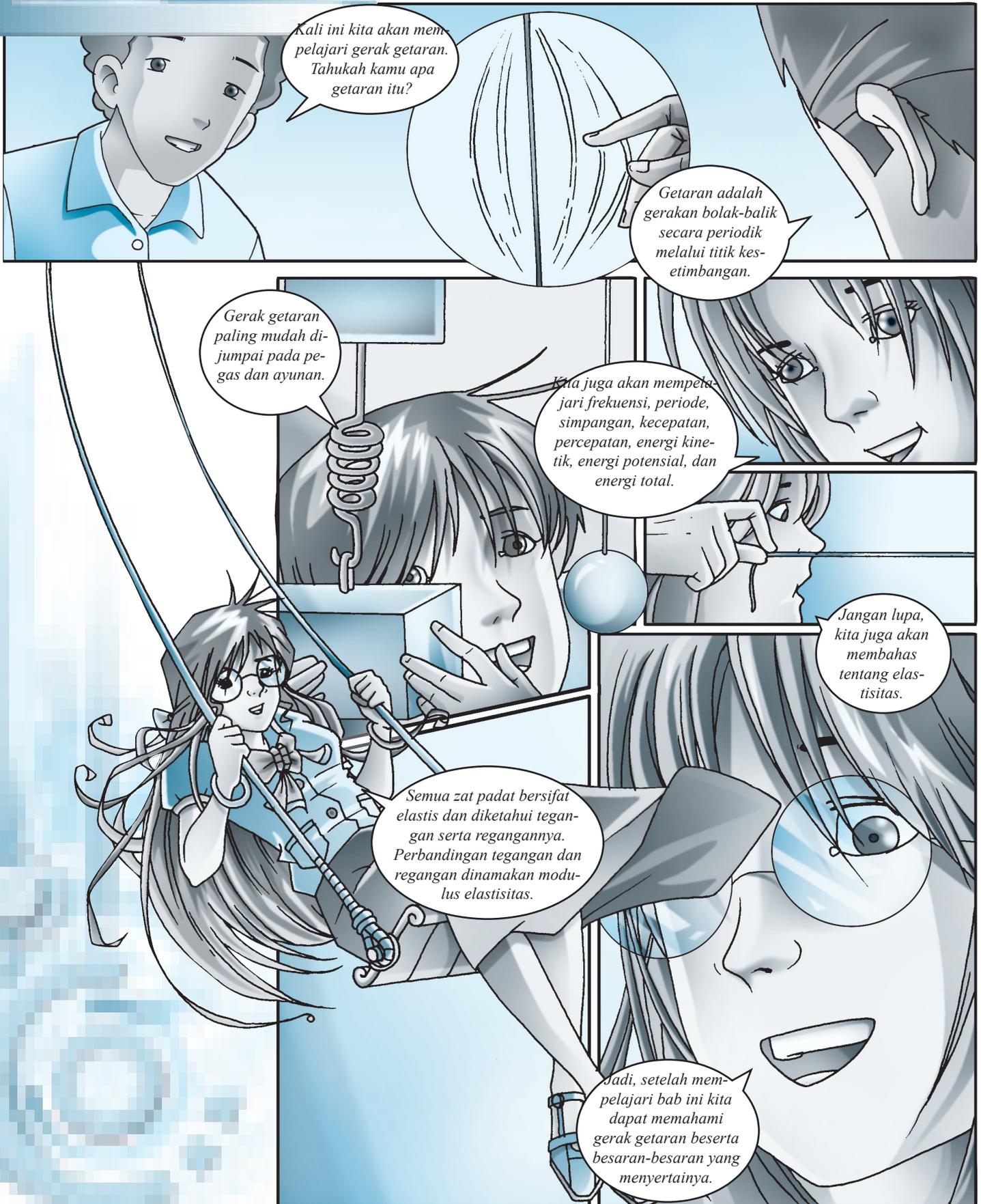
- 1) massa masing-masing benda
  - 2) jenis masing-masing benda
  - 3) jarak kedua benda
  - 4) intensitas masing-masing benda
- Pernyataan di atas yang benar adalah . . . .
- a. 1), 2), dan 3)
  - b. 1) dan 3)
  - c. 2) dan 4)
  - d. 4) saja
  - e. semua benar
9. Kala revolusi venus adalah  $19,4 \cdot 10^6$  s. Jika jarak venus ke matahari adalah  $108 \cdot 10^6$  km maka kelajuan venus mengitari matahari adalah . . . .
- a. 35 km/s
  - b. 35 m/s
  - c. 34 km/s
  - d. 34 m/s
  - e. 38 km/s
10. Jarak satelit dari pusat bumi adalah  $7,8 \cdot 10^6$  m. Jika massa bumi  $5,98 \cdot 10^{24}$  kg dan  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$  maka kelajuan satelit adalah . . . .
- a.  $7,115 \cdot 10^3$  m/s
  - b.  $7,511 \cdot 10^3$  m/s
  - c.  $7,151 \cdot 10^3$  m/s
  - d.  $7,151 \cdot 10^2$  m/s
  - e.  $7,511 \cdot 10^2$  m/s

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

1. Dua planet masing-masing bermassa  $1 \cdot 10^{10}$  kg dan  $4 \cdot 10^8$  kg. Jarak kedua planet  $5 \cdot 10^6$  km. Tentukan letak sebuah planet bermassa  $2 \cdot 10^6$  kg yang mengalami gaya gravitasi nol di antara kedua planet, relatif terhadap planet bermassa  $4 \cdot 10^8$  kg!
2. Dua planet masing-masing massanya  $4 \cdot 10^8$  kg dan  $6 \cdot 10^8$  kg. Jarak antara kedua planet adalah  $2 \cdot 10^6$  km. Jika

$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ , tentukan gaya gravitasi antara kedua planet!

3. Jarak sebuah meteor dari planet yang bermassa  $5 \cdot 10^{10}$  kg adalah  $10^5$  km. Jika  $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ , tentukan medan gravitasi yang dialami meteor tersebut!
4. Empat buah benda yang identik masing-masing massanya 10 kg. Benda-benda tersebut diletakkan pada ujung-ujung bujur sangkar yang panjang sisinya 0,5 m. Jika  $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ , tentukan medan gravitasi di pusat bujur sangkar!
5. Jarak uranus ke matahari adalah  $2,875 \cdot 10^9$  km. Jika massa matahari adalah  $2,01 \cdot 10^{30}$  kg, tentukan kelajuan uranus mengitari matahari dan kala revolusinya!



Kali ini kita akan mempelajari gerak getaran. Tahukah kamu apa getaran itu?

Getaran adalah gerakan bolak-balik secara periodik melalui titik kesetimbangan.

Gerak getaran paling mudah dijumpai pada pegas dan ayunan.

Kita juga akan mempelajari frekuensi, periode, simpangan, kecepatan, percepatan, energi kinetik, energi potensial, dan energi total.

Jangan lupa, kita juga akan membahas tentang elastisitas.

Semua zat padat bersifat elastis dan diketahui tegangan serta regangannya. Perbandingan tegangan dan regangan dinamakan modulus elastisitas.

Jadi, setelah mempelajari bab ini kita dapat memahami gerak getaran beserta besaran-besaran yang menyertainya.



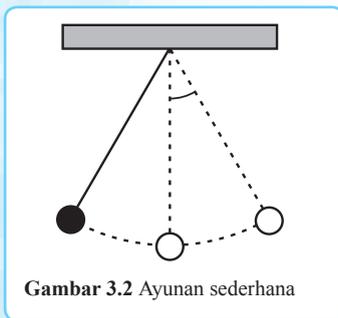
Gambar 3.1 Mobil yang sedang melaju di jalan yang tidak rata

Jalan yang dilalui kendaraan tidak selalu rata. Pernahkah kamu mengamati peredam kejut kendaraan saat kendaraan melewati jalan yang tidak rata? Pegas yang ada pada peredam kejut (*shock absorber*) berfungsi untuk meredam getaran saat kendaraan melewati jalan yang tidak rata. Pegas tersebut turut menentukan kenyamanan dan keamanan kendaraan saat dikendarai. Coba bayangkan seandainya mobil atau motor tidak dilengkapi *shock absorber*! Lebih jauh mengenai getaran dan pegas akan kita bahas pada bab ini.

**Kata Kunci:** Gaya Pegas – Gerak Harmonik Sederhana – Elastisitas

## A. Ayunan Bandul Sederhana

Mari kita mulai pembahasan mengenai getaran dengan ayunan sederhana yang melakukan gerak bolak-balik.



Gambar 3.2 Ayunan sederhana

seederhana yang melakukan gerak bolak-balik. Ayunan sederhana sering disebut dengan bandul. Ayunan yang terdiri atas beban yang diikat pada benang disimpangkan dengan sudut  $\theta$  tertentu sehingga ayunan tersebut melakukan gerakan bolak-balik sepanjang busur AC. Perhatikan gambar 3.2!

Gambar 3.2 menunjukkan gerakan bolak-balik ayunan melalui titik A, B, dan C.

Gerakan yang terjadi pada ayunan disebut getaran. **Getaran** merupakan gerakan bolak-balik secara periodik melalui titik kesetimbangan. Satu getaran lengkap adalah gerakan bolak-balik dari A ke C dan kembali lagi ke A. Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu getaran lengkap disebut periode. Sedangkan banyaknya getaran atau gerak bolak-balik yang dapat dilakukan dalam waktu satu detik disebut frekuensi. Frekuensi yang ditimbulkan oleh ayunan tidak dipengaruhi gaya dari luar. Frekuensi yang demikian disebut frekuensi alamiah.

■ **Getaran**

Getaran pada ayunan terjadi karena adanya gaya pemulih ( $F$ ), yaitu gaya yang menyebabkan benda kembali ke keadaan semula. Besar gaya yang memengaruhi gerak ayunan dapat diketahui dengan rumus:

$$F = -m \cdot g \cdot \sin \theta \text{ atau } F = \frac{-m \cdot g}{\ell} x \quad \dots (3.1)$$

**Keterangan:**

- $F$  : gaya (N)
- $m$  : massa benda (kg)
- $g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
- $\theta$  : sudut simpangan
- $\ell$  : panjang tali (m)
- $x$  : simpangan getar (m)

Tanda minus (-) pada persamaan 3.1 menunjukkan bahwa arah gaya  $F$  berlawanan dengan arah simpangan.

Perhatikan gambar 3.3 di atas! Pada gambar 3.3,  $x$  disebut simpangan. Simpangan adalah kedudukan bandul setiap saat terhadap titik kesetimbangan. Simpangan terjauh yang dicapai bandul disebut amplitudo ( $A$ ). Jika sudut simpangan suatu getaran kecil maka simpangannya juga kecil. Perhatikan gambar 3.4!

Titik AOB pada gambar 3.4 membentuk segitiga siku-siku di A. Dengan menggunakan aturan trigonometri kita peroleh rumus:

$$\sin \theta = \frac{x}{\ell} \text{ atau } x = \ell \cdot \sin \theta \quad \dots (3.2)$$

**Keterangan:**

- $x$  : simpangan getar (m)
- $\theta$  : sudut simpangan
- $\ell$  : panjang tali (m)

Periode getaran pada ayunan sederhana yang memiliki sudut simpangan kecil dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 3.1. Besar gaya pemulih sama dengan gaya sentripetal, sehingga:

$$F_s = m \cdot a_s = m \cdot \omega^2 R = m \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R$$

Karena jari-jari  $R$  sama dengan panjang tali maka  $F_s = m \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \ell$ .

Dengan memasukkan persamaan di atas ke dalam persamaan 3.1 diperoleh rumus berikut.

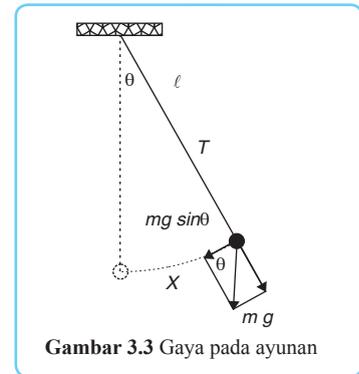
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad \dots (3.3)$$

Frekuensi getaran ( $f$ ) dinyatakan sebagai  $f = \frac{1}{T}$ , sehingga

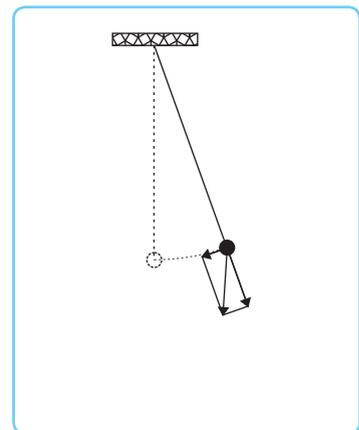
$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}} \text{ atau } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}} \quad \dots (3.4)$$

**Keterangan:**

- $T$  : periode getaran (s)



Gambar 3.3 Gaya pada ayunan



$$\pi : 3.14 = \frac{22}{7}$$

$f$  : frekuensi getaran (Hz)

Dari persamaan 3.3 dan 3.4 dapat kita ketahui bahwa periode dan frekuensi ayunan sederhana tidak bergantung pada massa bandul. Periode dan frekuensi ayunan sederhana ditentukan oleh panjang tali dan percepatan gravitasi. Untuk lebih memantapkan pemahamanmu, kerjakanlah latihan di bawah ini!

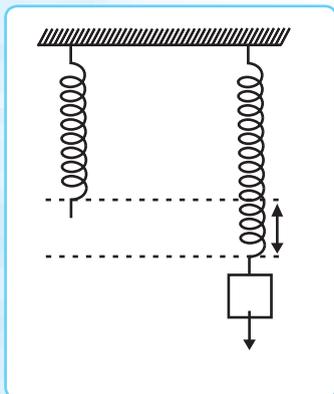
*Kerjakan soal berikut dengan tepat!*



### Kerja Mandiri 1

1. Sebuah ayunan A menimbulkan frekuensi 4 kali frekuensi yang ditimbulkan oleh ayunan B. Jika panjang tali ayunan B adalah 1 meter, berapa panjang tali pada ayunan A?
2. Sebuah bandul sederhana dengan panjang tali  $l$  dan massa beban  $m$  kg digunakan untuk mengukur gravitasi bumi. Ketika bandul dibawa ke suatu planet, ternyata berat beban 4 kali beratnya ketika di bumi. Jika frekuensi bandul di bumi 50 Hz, hitunglah frekuensi bandul ketika digunakan di planet tersebut!

## B. Gaya Pegas



Kamu tentu masih ingat peran pegas *shock absorber* mobil pada gambar 3.1 bukan? Pegas tersebut berperan untuk meredam getaran yang ditimbulkan oleh gerakan mobil pada jalan yang tidak rata. Untuk mengetahui prinsip kerja pegas tersebut, perhatikan gambar 3.5! Sebuah pegas dikenai gaya  $F$ . Pegas akan bergerak periodik dari titik A ke B dan kembali lagi ke A. Hal ini terjadi karena pegas mempunyai gaya pemulih.

Gerak periodik yang dialami pegas sama dengan gerak pada ayunan, sehingga gerak pada pegas juga disebut getaran harmonik (gerak harmonik sederhana). Besar simpangan getar pada pegas sama dengan pertambahan panjang. Pertambahan panjang pada pegas sebanding dengan besar gaya yang bekerja. Pernyataan ini dikenal dengan **hukum Hooke** dan dirumuskan sebagai berikut.

$$F = -k \cdot \Delta x \quad \dots (3.5)$$

**Hukum Hooke**

**Keterangan:**

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

$k$  : konstanta pegas (N/m)

$\Delta x$  : pertambahan panjang pegas (m)

Tanda (-) negatif menunjukkan bahwa arah gaya pemulih yang senantiasa menuju ke titik kesetimbangan selalu berlawanan dengan arah gaya penyebabnya atau arah simpangannya. Namun dalam notasi skalar, tanda negatif dihilangkan sehingga hukum Hooke menjadi:

$$F = k \cdot \Delta x \quad \dots (3.6)$$

Gerak yang terjadi pada pegas merupakan gerak harmonik sederhana. Dengan demikian, pegas mempunyai periode dan frekuensi yang dirumuskan sebagai berikut.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{dan} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \dots (3.7)$$

Konstanta pada persamaan 3.5 dan 3.6 disebut konstanta pembanding atau konstanta pegas. Coba perhatikan lagi gambar 3.5! Untuk meregangkan pegas dengan simpangan sejauh  $x$  terhadap titik B, kita harus memberikan gaya luar sebesar  $F = k \cdot x$ . Dengan demikian, makin besar nilai tetapan pegas ( $k$ ) makin besar gaya yang kita perlukan untuk meregangkan pegas dengan simpangan tertentu. Jadi, dapat kita pahami apabila suatu pegas memiliki konstanta pegas ( $k$ ) yang besar maka pegas tersebut semakin kaku. Nilai konstanta suatu pegas dapat dicari melalui persamaan:

$$k = m \omega^2 \quad \dots (3.8)$$

**Keterangan:**

$\omega$  : kecepatan sudut dari gerak pegas (rad/s)

Jika dua atau lebih pegas disusun seri atau paralel maka nilai konstanta penggantinya ditentukan sebagai berikut.

**Susunan Seri**

Dua atau lebih pegas yang disusun secara seri dapat digantikan oleh satu pegas. Pegas pengganti ini harus mempunyai konstanta pegas yang besarnya sama dengan konstanta pegas total. Pertambahan panjang total pegas sama dengan penjumlahan dari pertambahan panjang masing-masing pegas ( $x_{\text{tot}} = x_1 + x_2$ ), sehingga:

$$\begin{aligned} x_{\text{tot}} &= x_1 + x_2 \\ \frac{F_{\text{tot}}}{k_{\text{tot}}} &= \frac{F_1}{k_1} + \frac{F_2}{k_2} \\ \frac{F_{\text{tot}}}{k_{\text{tot}}} &= \frac{F_{\text{tot}}}{k_1} + \frac{F_{\text{tot}}}{k_2} \\ \frac{1}{k_{\text{tot}}} &= \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \end{aligned}$$

Dengan demikian, konstanta pegas total dari dua atau lebih pegas

yang disusun secara seri dirumuskan:

$$\frac{1}{k_{\text{seri}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots \quad \dots (3.9)$$

### Susunan Paralel

Coba perhatikan gambar 3.7! Jika beban pada gambar 3.7 kita tarik maka kedua pegas mengalami simpangan yang sama  $x_1 = x_2 = x$ . Gaya total yang bekerja pada kedua pegas merupakan penjumlahan gaya dari masing-masing pegas.

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

$$F_{\text{tot}} = k_1 x_1 + k_2 x_2$$

$$F_{\text{tot}} = k_1 x + k_2 x$$

$$k_{\text{tot}} \cdot x = (k_1 + k_2) x$$

$$k_{\text{tot}} = k_1 + k_2$$

Dari uraian di atas dapat kita simpulkan bahwa konstanta pegas total untuk dua atau lebih pegas yang disusun paralel dirumuskan sebagai berikut

$$k_{\text{paralel}} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots \quad \dots (3.10)$$

Dengan memerhatikan aturan di atas maka dapat ditentukan besar konstanta dari pegas yang disusun seri, paralel, atau kombinasi.

Contoh soal di bawah ini akan membantumu lebih memahami materi tentang pegas. Pelajarilah dengan cermat! Setelah itu ujilah pemahamanmu dengan mengerjakan pelatihan di bawahnya!

### Contoh Soal

Sebuah pegas dengan konstanta pegas  $\pi^2$  N/m diberi beban 40 gram. Selanjutnya, pegas ditekan ke atas sejauh 10 cm dan digetarkan. Tentukan periode dan frekuensinya!

Penyelesaian:

Diketahui:

$$k = \pi^2 \text{ N/m}$$

$$m = 40 \text{ gram}$$

$$A = 10 \text{ cm}$$

Ditanyakan:  $T = \dots?$

$$f = \dots?$$

Jawab:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{0,04}{\pi^2}} = 0,4 \text{ sekon}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ Hz}$$

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Suatu pegas diberi beban 100 gram sehingga panjangnya bertambah  $x$  cm. Frekue-



## Kerja Mandiri 2

- nsi yang dihasilkan pegas adalah  $\frac{20}{\pi}$  Hz. Pegas kemudian ditarik sehingga panjangnya bertambah 3 cm. Tentukan nilai  $x$ !
2. Sebuah mobil bermassa 1.500 kg mempunyai empat buah pegas. Konstanta dari masing-masing pegas adalah 11.250 N/m. Jika total massa lima orang penumpang dalam mobil adalah 300 kg, berapa frekuensi getaran mobil ketika mobil yang dikendarai melewati sebuah lubang di jalan?

*Kerjakan bersama teman sebangku!*

Buatlah kliping atau kumpulan informasi tentang pemanfaatan pegas dalam kehidupan sehari-hari. Jelaskan prinsip penggunaan pegas



## Kerja Berpasangan 1

tersebut!

### C. Persamaan Gerak Harmonik Sederhana

Sebelumnya kita telah membahas getaran suatu benda pada pegas dan ayunan. Seperti disebutkan sebelumnya, getaran pada pegas dan ayunan merupakan gerak harmonik sederhana. Kali ini kita akan mempelajari persamaan-persamaan yang berlaku pada gerak harmonik sederhana. Tahukah kamu bahwa proyeksi dari suatu gerak melingkar beraturan menghasilkan gerak harmonik sederhana? Untuk lebih jelasnya, pelajarilah pembahasan berikut!

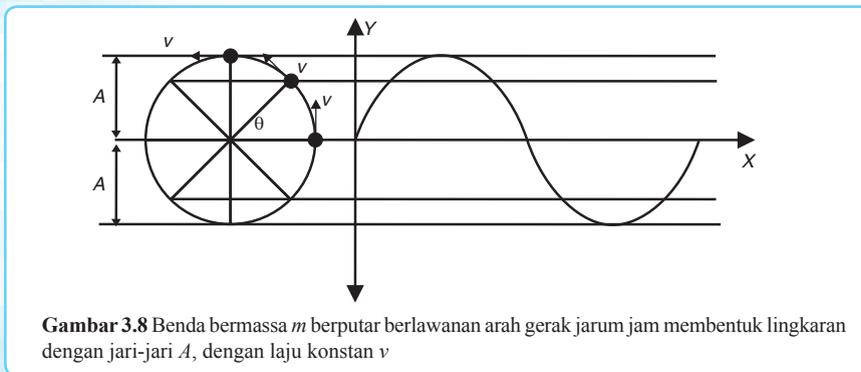
#### 1. Persamaan Simpangan Gerak Harmonik Sederhana

Simpangan dari pegas dan bandul dapat digambarkan dalam suatu fungsi sinusoidal. Persamaan tersebut juga dapat dilukiskan dari sebuah proyeksi gerak melingkar beraturan.

Perhatikan gambar 3.8 berikut ini!

Pada gambar 3.8 benda bergerak melingkar beraturan telah me-

nempuh sudut fase sebesar  $\theta$ . Besar sudut fasenya dapat diuraikan



**Gambar 3.8** Benda bermassa  $m$  berputar berlawanan arah gerak jarum jam membentuk lingkaran dengan jari-jari  $A$ , dengan laju konstan  $v$

menjadi:

$$\theta = \omega \cdot t = 2\pi \cdot f \cdot t = \frac{2\pi}{T} \cdot t \quad \dots (3.11)$$

**Keterangan:**

- $\theta$  : sudut fase (rad atau derajat)
- $\omega$  : kecepatan sudut (rad/s)
- $t$  : waktu titik tersebut telah bergetar (s)

Dari gambar 3.8 kita peroleh persamaan simpangan dari gerak harmonik sederhana adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} y &= A \sin \theta \\ y &= A \sin (\omega \cdot t) \\ y &= A \sin (2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \\ y &= A \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t \right] \end{aligned} \quad \dots (3.12)$$

**Keterangan:**

- $\pi$  :  $180^\circ$  atau 3,14

Jika benda melakukan gerak harmonik sederhana dengan sudut awal  $\theta_0$  maka persamaan simpangannya menjadi:

$$\begin{aligned} y &= A \sin (\theta + \theta_0) \\ y &= A \sin (\omega \cdot t + \theta_0) \\ y &= A \sin (2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \theta_0) \\ y &= A \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t + \theta_0 \right] \\ y &= A \sin 2\pi \left[ \frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi} \right] \\ y &= A \sin 2\pi \varphi \end{aligned} \quad \dots (3.13)$$

**Keterangan:**

- $\varphi$  : fase getaran (tidak bersatuan) =  $\left[ \frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi} \right]$

Dengan demikian, jika suatu benda telah bergetar dari  $t_1$  ke  $t_2$  dengan  $t_2 > t_1$  maka beda fase yang dialami benda yang bergetar tersebut adalah:

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{t_2 - t_1}{T} \quad \dots (3.14)$$

**Keterangan:**

$\Delta \varphi$  : beda fase

Dua kedudukan suatu benda dikatakan sefase jika  $\Delta \varphi = 0, 1, 2, 3, \dots n$ . Sebaliknya, jika  $\Delta \varphi = \frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}, \dots (n + \frac{1}{2})$  maka dua kedudukan suatu benda dikatakan berlawanan fase.  $n$  adalah bilangan cacah.

Kecepatan dan percepatan gerak harmonik sederhana ditentukan dengan menurunkan persamaan simpangan gerak harmonik sederhana dan dirumuskan sebagai berikut.

Persamaan simpangan:

$$y = A \sin \omega \cdot t \quad \text{dengan} \quad y_{\text{maks}} = A \quad \dots (3.15)$$

Persamaan kecepatan:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos \omega \cdot t \quad \text{dengan} \quad v_{\text{maks}} = A \omega \quad \dots (3.16)$$

Persamaan percepatan:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \sin \omega \cdot t \quad \text{dengan} \quad a_{\text{maks}} = A \omega^2 \quad \dots (3.17)$$

**Keterangan:**

$v$  : kecepatan suatu benda pada gerak harmonik sederhana (m/s)

$a$  : percepatan pada suatu benda pada gerak harmonik sederhana (m/s<sup>2</sup>)

Jika sudut fase gerak harmonik sederhana berada di titik kesetimbangan ( $\theta = 0^\circ$ ) maka  $y = 0$ ,  $v = v_{\text{maks}}$ , dan  $a = 0$ . Jika sudut fase berada di titik simpangan terbesar ( $\theta = 90^\circ$ ) maka  $y = y_{\text{maks}} = A$ ,  $v = 0$ , dan  $a = a_{\text{maks}}$ .

Dalam gerak harmonik sederhana bekerja gaya  $F = -k \cdot \Delta y$ . Menurut hukum Newton:  $F = m \cdot a$ . Jika kedua persamaan tersebut disubstitusikan maka diperoleh:

$$\begin{aligned} m \cdot a &= -k \cdot y \\ m (-\omega^2 \cdot y) &= -k \cdot y \\ -m \omega^2 \cdot y &= -k \cdot y \\ k &= m \cdot \omega^2 \end{aligned}$$

**Keterangan:**

$k$  : konstanta gerak harmonik (N/m)

## 2. Persamaan Energi Gerak Harmonik Sederhana

Semua benda yang bergerak mempunyai energi kinetik dan energi potensial. Benda yang bergerak harmonik sederhana juga

mempunyai energi kinetik dan energi potensial. Energi kinetik gerak harmonik sederhana dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 E_k &= \frac{1}{2} m \cdot v^2 \\
 E_k &= \frac{1}{2} m (\omega \cdot A \cos \omega t)^2 \\
 E_k &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t \\
 E_k &= \frac{1}{2} k A^2 \cos^2 \omega t \quad \dots (3.18)
 \end{aligned}$$

Energi potensial gerak harmonik sederhana adalah energi yang dimiliki oleh benda yang bergetar harmonik sederhana karena simpangannya. Energi potensial gerak harmonik sederhana dirumuskan:

$$\begin{aligned}
 E_p &= \frac{1}{2} k y^2 \\
 E_p &= \frac{1}{2} k (A \sin \omega t)^2 \\
 E_p &= \frac{1}{2} k A^2 \sin^2 \omega t \quad \dots (3.19)
 \end{aligned}$$

Energi total yang dimiliki oleh benda yang bergerak harmonik sederhana berasal dari energi potensial dan energi kinetik. Energi ini disebut energi mekanik. Energi mekanik gerak harmonik sederhana dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}
 E &= E_p + E_k \\
 E &= \frac{1}{2} k A^2 \sin^2 \omega t + \frac{1}{2} k A^2 \cos^2 \omega t \\
 E &= \frac{1}{2} k A^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) \\
 E &= \frac{1}{2} k A^2 \quad \dots (3.20)
 \end{aligned}$$

Dalam setiap getaran, besar energi potensial dan energi kinetik selalu berubah tetapi jumlahnya tetap. Pada gerak harmonik sederhana terjadi pertukaran energi potensial menjadi energi kinetik atau sebaliknya, tetapi energi mekaniknya (energi totalnya) tetap. Pernyataan ini disebut hukum kekekalan energi mekanik.

Pada titik kesetimbangan ( $\theta = 0^\circ$ ), energi kinetik mencapai nilai maksimum dan energi potensial mencapai nilai minimum ( $E_p = 0$ ). Kecepatan di titik ini adalah:

$$\begin{aligned}
 E_m &= E_k + E_p \\
 E_m &= E_k + 0 \\
 E_m &= E_k \\
 \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2
 \end{aligned}$$

$$k \cdot A^2 = m \cdot v^2$$

$$v = A \sqrt{\frac{k}{m}} = A \cdot \omega$$

Adapun kecepatan getar benda pada sembarang titik dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$E_m = E_k + E_p$$

$$\frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2$$

$$k \cdot A^2 = m \cdot v^2 + k \cdot y^2$$

$$m \cdot v^2 = k \cdot A^2 - k \cdot y^2$$

$$m \cdot v^2 = k (A^2 - y^2)$$

$$v^2 = \frac{k}{m} (A^2 - y^2)$$

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

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

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

... (3.21)

Agar kamu lebih mudah memahami tentang gerak harmonik sederhana, pelajailah contoh soal di bawah ini dengan cermat! Setelah itu kerjakan pelatihan di bawahnya bersama temanmu!

### Contoh Soal

1. Sebuah pegas melakukan gerak harmonik sederhana dengan persamaan:  $y = 8 \sin 6 \pi t$ ,  $y$  dalam cm dan  $t$  dalam sekon. Tentukan:
  - a. amplitudo,
  - b. periode,

- c. kecepatan saat  $t = \frac{1}{5}$  s,

- d. percepatan saat  $t = \frac{1}{5}$  s.

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $y = 8 \sin 6 \pi t$

Ditanyakan:

- a.  $A = \dots ?$
- b.  $T = \dots ?$
- c.  $v = \dots ?$
- d.  $a = \dots ?$

Jawab:

a. Bentuk umum persamaan gerak harmonik sederhana  $y = A \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t \right]$  sehingga amplitudonya  $A = 8 \text{ cm}$

b.  $6\pi = \frac{2\pi}{T}$  maka  $T = \frac{1}{3}$  sekon

c.  $v = \frac{dy}{dt} = 48\pi \cos 6\pi t$

Saat  $t = \frac{1}{5} \text{ s}$

$$v = 48 \times 3,14 \cos (6 \times 180^\circ \times \frac{1}{5})$$

$$v = 150,72 \cos 216$$

$$v = -121,9 \text{ cm/s} = -1,219 \text{ m/s}$$

d.  $a = \frac{dv}{dt} = -288\pi^2 \sin 6\pi t$

Saat  $t = \frac{1}{5} \text{ s}$

$$a = -288 (3,14)^2 \sin (6 \times 180^\circ \times \frac{1}{5})$$

$$a = 1669,05 \text{ cm/s}^2 = 16,6905 \text{ m/s}^2$$

2. Suatu titik materi melakukan gerak harmonik sederhana dengan amplitudo 10 cm dan periode 2 sekon. Jika saat  $t = 0$  simpangan titik materi maksimum, tentukan fase getaran saat simpangan getarannya 5 cm.

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$A = 10 \text{ cm}$$

$$T = 2 \text{ s}$$

$$y = 5 \text{ cm}$$

Ditanyakan:  $\varphi = \dots ?$

Jawab:

Langkah 1:

Menentukan sudut awal.

$$y = A \sin 2\pi \left[ \frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi} \right]$$

$$A = A \sin 2\pi \left[ \frac{0}{2} + \frac{\theta_0}{2\pi} \right]$$

$$1 = \sin 2\pi \left[ \frac{0}{2} + \frac{\theta_0}{2\pi} \right]$$

$$\sin 90^\circ = \sin 2\pi \left[ \frac{0}{2} + \frac{\theta_0}{2\pi} \right]$$

$$\sin \frac{\pi}{2} = \sin 2\pi \left[ \frac{0 + \theta_0}{2 + 2\pi} \right]$$

$$\frac{2\pi}{2} = 2\pi \left[ \frac{0 + \theta_0}{2 + 2\pi} \right]$$

$$\frac{1}{4} = \frac{\theta_0}{2\pi}$$

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2}$$

Langkah 2:

Menentukan fase saat simpangannya 5 cm.

$$y = A \sin 2\pi \left[ \frac{t + \theta_0}{T + 2\pi} \right]$$

$$5 = 10 \sin 2\pi \left[ \frac{t + \frac{\pi}{2}}{T + 2\pi} \right]$$

$$\frac{1}{2} = \sin 2\pi \left[ \frac{t + \frac{1}{4}}{2 + \frac{1}{4}} \right]$$

$$\sin 30^\circ = \sin 2\pi \left[ \frac{t + \frac{1}{4}}{2 + \frac{1}{4}} \right]$$

$$\sin 2 \frac{\pi}{6} = \sin 2\pi \left[ \frac{t + \frac{1}{4}}{2 + \frac{1}{4}} \right]$$

$$\frac{\pi}{6} = 2\pi \left[ \frac{t + \frac{1}{4}}{2 + \frac{1}{4}} \right]$$

$$\frac{1}{12} = \left[ \frac{t + \frac{1}{4}}{2 + \frac{1}{4}} \right]$$

$$\frac{1}{12} - \frac{1}{4} = \frac{t}{2}$$

$$\frac{1}{12} - \frac{3}{12} = \frac{t}{2}$$

$$-\frac{1}{6} = \frac{t}{2}$$

$$t = -\frac{1}{3}$$

Langkah 3:

Menentukan fase getaran

$$\varphi = \left[ \frac{t + \theta_0}{T + 2\pi} \right]$$

$$\varphi = \left[ \frac{-\frac{1}{3} + \frac{\pi}{2}}{2 + 2\pi} \right]$$

$$\varphi = \left[ \frac{-\frac{1}{6} + \frac{1}{4}}{2 + 2\pi} \right]$$

$$\varphi = \left[ -\frac{2}{12} + \frac{3}{12} \right]$$

$$\varphi = \frac{1}{12}$$

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

1. Suatu partikel melakukan getaran harmonik dengan amplitudo sebesar 2 cm dan periodenya 1 sekon. Jika gerak dimulai dari titik kesetimbangan, hitunglah:
  - a. kecepatan dan waktu saat mencapai fase  $\frac{5}{6}$  pertama kali,
  - b. percepatan dan waktu saat mencapai fase  $\frac{2}{3}$  pertama kali.
2. Suatu pegas digantung vertikal. Jika pegas diberi beban 1 kg, panjangnya bertambah  $\frac{40}{\pi^2}$  cm. Kemudian pegas ditekan ke atas sejauh 3 cm dan dilepaskan. Hitung energi potensial saat  $t = \frac{1}{3}$  sekon!



## Kerja Berpasangan 2

3. Suatu benda melakukan gerak harmonik sederhana dengan amplitudo 10 cm. Jika gerak dimulai dari titik kesetimbangan, hitunglah:
  - a. percepatan saat  $E_k = E_p$  pertama kali. Pada saat itu gerak ke bawah dan simpangan berada di atas titik kesetimbangan.
  - b. kecepatan saat  $E_k = E_p$  pertama kali. Pada saat itu gerak ke atas dan simpangan berada di bawah titik kesetimbangan.

Diketahui bahwa waktu untuk mencapai keadaan di atas adalah  $\frac{1}{16}$  sekon.
4. Suatu benda melakukan gerak harmonik sederhana. Pada saat simpangannya 10 cm di atas titik kesetimbangan, percepatannya  $1.000 \pi^2 \text{ cm/s}^2$  dengan arah percepatan menuju titik kesetimbangan dan arah gerak ke bawah. Hitunglah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan itu jika saat itu kelajuannya  $100\sqrt{3} \pi \text{ cm/s}$ !
5. Benda yang bermassa 100 gram bergetar harmonik vertikal dengan amplitudo 5 cm dan frekuensi 10 Hz. Pada suatu ketika fasenya  $\frac{1}{12}$ . Jika percepatannya  $100 \pi^2 \text{ cm/s}^2$  dengan gerak dimulai dari titik kesetimbangan, tentukanlah:
  - a. simpangan saat itu,
  - b. gaya yang bekerja pada saat itu,



- c. energi potensial pada saat itu,
- d. kelajuan pada saat itu,
- e. energi kinetik pada saat itu.

## D. Elastisitas

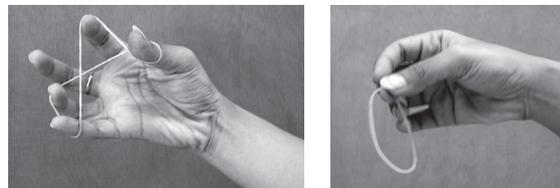
Ketika kamu masih kecil, pernahkah kamu bermain dengan karet gelang dan mengubahnya menjadi berbagai macam bentuk? Bagaimana bentuk karet setelah kamu selesai bermain? Tentunya karet gelang akan kembali ke bentuk semula. Keadaan ini disebabkan sifat karet yang elastis.

Contoh benda elastis selain karet adalah pegas. Pegas dapat kembali ke bentuk semula selama mendapat sejumlah gaya peubah yang masih berada dalam batas elastisitasnya. Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa **elastisitas** merupakan kemampuan suatu benda untuk kembali ke keadaan semula setelah gaya yang dikenakan padanya dilepaskan. Jika gaya yang diberikan melebihi batas elastisitas maka elastisitas benda

bisa hilang, patah, atau putus.

### 1. Jenis-jenis Perubahan Bentuk

Jika suatu benda elastis dikenai dua gaya sejajar yang sama besar dan berlawanan arah maka benda akan mengalami gaya tegangan dan perubahan bentuk. Perubahan-perubahan itu misalnya seperti di bawah ini.



#### a. Regangan

Regangan (*strain*) adalah perubahan bentuk benda yang terjadi karena gaya yang diberikan pada masing-masing ujung benda dan arahnya menjauhi benda. Pada peristiwa regangan terjadi tegangan tarik, sehingga benda bertambah panjang.

#### b. Mampatan

Mampatan merupakan kebalikan dari regangan. Mampatan terjadi karena gaya yang bekerja pada masing-masing ujung benda arahnya menuju titik pusat benda. Pada peristiwa mampatan terjadi tegangan mampat yang mengakibatkan benda menjadi lebih pendek.

## Elastisitas

### c. Geseran

Geseran terjadi karena gaya yang bekerja pada benda dikenakan pada masing-masing sisi benda. Pada peristiwa geseran terjadi tegangan geser. Akibatnya benda mengalami pergeseran.



### Sebaiknya Tahu



Sendi lutut memiliki kelenturan spesial untuk berjalan dan bergerak. Persambungan dua tulang tersebut memiliki kelenturan dan elastisitas khusus walaupun tidak tampak berbentuk pegas. Layaknya sebuah pegas, sendi lutut hanya akan meregang searah dengan gaya yang bekerja pa-

## 2. Modulus Elastis

Dari gambar 3.9 kita mengetahui bahwa karet termasuk benda elastis. Sifat elastis benda seperti karet akan hilang bila gaya yang diberikan pada benda tersebut melebihi batas elastisitasnya. Sifat elastis suatu bahan berkaitan erat dengan modulus elastis. Modulus elastis disebut juga **modulus Young**. Modulus elastis adalah perbandingan antara tegangan dan regangan yang dialami oleh suatu benda. Untuk memahami konsep modulus elastis perhatikan gambar 3.11!

Sebuah batang yang memiliki luas penampang  $A$  mula-mula memiliki panjang  $\ell_0$ . Batang tersebut kemudian ditarik dengan gaya  $F$  sehingga panjangnya menjadi  $\ell$ . Pertambahan panjang batang tersebut adalah  $\Delta\ell = \ell - \ell_0$ .

Tegangan pada batang merupakan hasil bagi antara gaya tarik yang dialami batang dengan luas penampangnya. Secara matematis, tegangan dapat dirumuskan:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots (3.22)$$

#### Keterangan:

$\sigma$  : tegangan (N/m<sup>2</sup>)

$F$  : gaya (N)

$A$  : luas penampang (m<sup>2</sup>) (luas penampang pegas = luas lingkaran =  $\pi \cdot r^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$ )

Adapun regangan pada batang merupakan hasil bagi antara pertambahan panjang dengan panjang awal. Secara matematis dapat dirumuskan:

$$e = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \dots (3.23)$$

#### Keterangan:

$e$  : regangan (tanpa satuan)

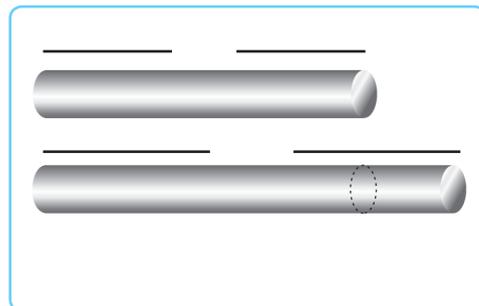
$\Delta\ell$  : pertambahan panjang (m)

$\ell_0$  : panjang awal (m)

$\ell$  : panjang akhir (m)

Dengan menggunakan persamaan 3.22 dan 3.23 diperoleh rumus modulus elastis sebagai berikut.

### Modulus Young



$$E = \frac{\sigma}{e}$$

$$E = \frac{F}{A \cdot \frac{\Delta l}{l_0}}$$

$$E = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad \dots (3.24)$$

**Keterangan:**

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

Agar kamu lebih memahami materi di atas, cermatilah contoh soal di bawah ini, kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

**Contoh Soal**

Seutas tali sepanjang 2 m dengan luas penampang  $2 \text{ mm}^2$  diberi beban bermassa 5 kg, sehingga panjangnya bertambah 4 mm. Tentukan:

- tegangan tali,
- regangan tali,
- modulus elastis tali.

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$l_0 = 2 \text{ m}$$

$$A = 2 \text{ mm}^2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

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

$$\Delta l = 4 \text{ mm} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ditanyakan:

- $\sigma = \dots?$
- $e = \dots?$
- $E = \dots?$

Jawab:

Langkah 1:

Menentukan besar  $F$ .

$$F = m \cdot g$$

$$F = 5 \cdot 10$$

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

Langkah 2:

$$a. \quad \sigma = \frac{F}{A} = \frac{50}{2 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$b. \quad e = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$c. \quad E = \frac{\sigma}{e} = \frac{2,5 \cdot 10^7}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,25 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

*Kerjakan dengan baik bersama kelompokmu!*

1. Gambarlah grafik yang menunjukkan hubungan antara benda yang bersifat elastis dengan pemberian gaya tegangan, sehingga diperoleh hubungan antara gaya tegangan dan regangan!
  2. Tentukan panjang awal sebuah benda elastis, misalnya per atau karet! Berilah gaya tegangan yang dapat terukur dengan menggunakan dinamometer! Catatlah setiap pertambahan panjang hingga putusya benda tersebut!
  3. Buatlah laporan mengenai hasil kerja kelompok itu!
  4. Presentasikan hasilnya di depan kelas!
1. Gaya pemulih ( $F$ ) pada bandul sederhana dirumuskan:



## Kerja Kelompok

$$F = -mg \sin \theta$$

2. Persamaan periode pada bandul sederhana adalah:

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

3. Persamaan frekuensi pada bandul sederhana adalah:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$



## Rangkuman

4. Gaya Hooke atau gaya pegas dirumuskan:

$$F = -k \cdot \Delta x$$

5. Periode dan frekuensi pegas yang melakukan gerak harmonik sederhana dirumuskan:

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

6. Konstanta getaran dapat dirumuskan:

$$k = m \omega^2 \quad \text{atau} \quad \omega^2 = \frac{k}{m}$$

7. Konstanta pegas total secara seri dirumuskan:

$$\frac{1}{k_{\text{seri}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots$$

8. Konstanta pegas total secara paralel dirumuskan:

$$k_{\text{paralel}} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots$$

9. Persamaan simpangan dari gerak harmonik sederhana dapat dinyatakan:

$$y = A \sin \theta$$

10. Persamaan kecepatan gerak harmonik sederhana dirumuskan:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos \omega \cdot t$$

11. Persamaan percepatan gerak harmonik sederhana dirumuskan:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \sin \omega \cdot t$$

12. Persamaan energi kinetik gerak getaran harmonik sederhana dirumuskan:

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

13. Persamaan energi potensial gerak getaran harmonik sederhana dirumuskan:

$$E_p = \frac{1}{2} k y^2 \quad \text{atau} \quad E_p = \frac{1}{2} k A^2 \sin^2 \omega t$$

14. Energi total energi mekanik gerak getaran harmonik sederhana dirumuskan:

$$E = E_p + E_k \quad \text{atau} \quad E = \frac{1}{2} k A^2$$

15. Bentuk persamaan lain dari kecepatan gerak harmonik sederhana dirumuskan:

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - y^2)} \quad \text{atau} \quad v = \omega \sqrt{(A^2 - y^2)}$$

16. Tegangan merupakan hasil bagi antara gaya tarik yang dialami benda dengan luas penampangnya, dan dirumuskan:

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

17. Regangan merupakan hasil bagi antara pertambahan panjang dengan panjang awal, dan dirumuskan:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

18. Modulus elastis adalah perbandingan antara tegangan dan regangan yang dialami oleh suatu benda, dan dirumuskan:

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad \text{atau} \quad E = \frac{F \cdot \Delta l_0}{A \cdot \Delta l}$$

**A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!**

- Saat seutas benang dengan panjang 0,5 m diberi beban 200 gram, ternyata panjangnya bertambah 8 mm. Jika luas penampang benang 1 mm<sup>2</sup> maka modulus Young dari benang adalah  
.....
  - 1,25 · 10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>
  - 4,25 · 10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>
  - 5,5 · 10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>
  - 6,25 · 10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>
  - 8 · 10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>
- Dua buah pegas identik, masing-masing memiliki konstanta  $k_1 = k_2 = 100$  N/m disusun paralel. Kemudian pegas-pegas tersebut disusun seri dengan pegas yang mempunyai



## Soal-soal Uji Kompetensi

- konstanta 200 N/m. Jika sistem pegas diberi beban 40 N maka pegas akan bertambah panjang . . . .
- 10 cm
  - 20 cm
  - 40 cm
  - 50 cm
  - 80 cm
3. Dua buah titik melakukan gerak harmonik sederhana pada suatu garis lurus. Kedua titik tersebut berasal dari titik kesetimbangan dengan arah yang sama. Jika periode masing-masing  $\frac{1}{10}$  s dan  $\frac{1}{12}$  s maka beda fase kedua titik setelah bergerak selama  $\frac{1}{3}$  s adalah . . . .
- $\frac{1}{7}$
  - $\frac{1}{6}$
  - $\frac{1}{3}$
  - $\frac{1}{2}$
  - $\frac{2}{3}$
4. Sebuah gerak harmonik sederhana mempunyai persamaan  $y = 0,8 \sin(10\pi t)$ . Jika  $y$  dalam cm dan  $t$  dalam sekon maka amplitudo dan frekuensi getaran harmonik adalah . . . .
- 8 cm dan 2 Hz
  - 4 cm dan 2 Hz
  - 1 cm dan 4 Hz
  - 0,8 cm dan 5 Hz
  - 0,4 cm dan 10 Hz
5. Pada getaran harmonik, massa beban yang digantung pada ujung bawah pegas 1 kg dan periode getarannya 2 sekon. Jika massa beban ditambah menjadi 4 kg maka periode getarnya adalah . . . .
- $\frac{1}{4}$  sekon
  - $\frac{1}{2}$  sekon
  - 1 sekon
  - 4 sekon
  - 8 sekon
6. Sebuah titik bergetar harmonik dengan waktu getar 1,20 sekon dan amplitudo 3,6 cm. Pada saat  $t = 0$  sekon, titik itu melewati titik kesetimbangannya ke arah atas. Besar simpangan pada saat  $t = 0,1$  sekon dan  $t = 1,8$  sekon adalah . . . .
- 1,8 cm dan 0 cm
  - 0 cm dan 1,8 cm
  - 1 cm dan 0,5 cm
  - 0,5 cm dan 1 cm
  - 1,5 cm dan 1 cm
7. Pada gerak harmonik sederhana selalu terdapat perbandingan yang tetap antara simpangan dengan . . . .
- kecepatan
  - percepatan
  - frekuensi
  - periode
  - massa
8. Sebuah benda yang massanya 0,005 kg bergerak harmonik sederhana dengan periode 0,04 sekon dan amplitudonya 0,01 m. Percepatan maksimum benda sama dengan . . . .
- 123 m/s<sup>2</sup>
  - 247 m/s<sup>2</sup>
  - 494 m/s<sup>2</sup>
  - 988 m/s<sup>2</sup>
  - 1.976 m/s<sup>2</sup>
9. Seutas tali bergetar menurut persamaan  $y = 10 \sin 628 t$  dengan  $t$  adalah waktu. Frekuensi getaran tali adalah . . . .
- 10 Hz
  - 20 Hz
  - 100 Hz
  - 200 Hz

- b. 50 Hz                      e. 400 Hz  
 c. 100 Hz
10. Apabila  $E_k$  menyatakan energi kinetik,  $E_p$  menyatakan energi potensial, dan  $E_m$  menyatakan energi mekanik suatu getaran harmonik maka pada saat simpangan getaran maksimum . . . .
- a.  $E_k = E_m$  dan  $E_p = 0$   
 b.  $E_k = 0$  dan percepatannya nol
- c.  $E_k = E_p = \frac{1}{2} E_m$   
 d.  $E_k = \frac{1}{2} E_p$   
 e.  $E_k = 0, E_p = E_m$
4. Benda bermassa 100 gram bergetar harmonik vertikal dengan amplitudo 5 cm dan frekuensinya 10 cps (*cycle per second*). Pada suatu ketika fasenya  $\frac{1}{12}$ . Tentukan:
- a. simpangan pada saat itu,  
 b. gaya yang bekerja pada saat itu,  
 c. energi potensial terhadap kedudukan setimbang pada saat itu,  
 d. kelajuan dan perlajuan benda pada saat itu,  
 e. energi kinetik benda pada saat itu.

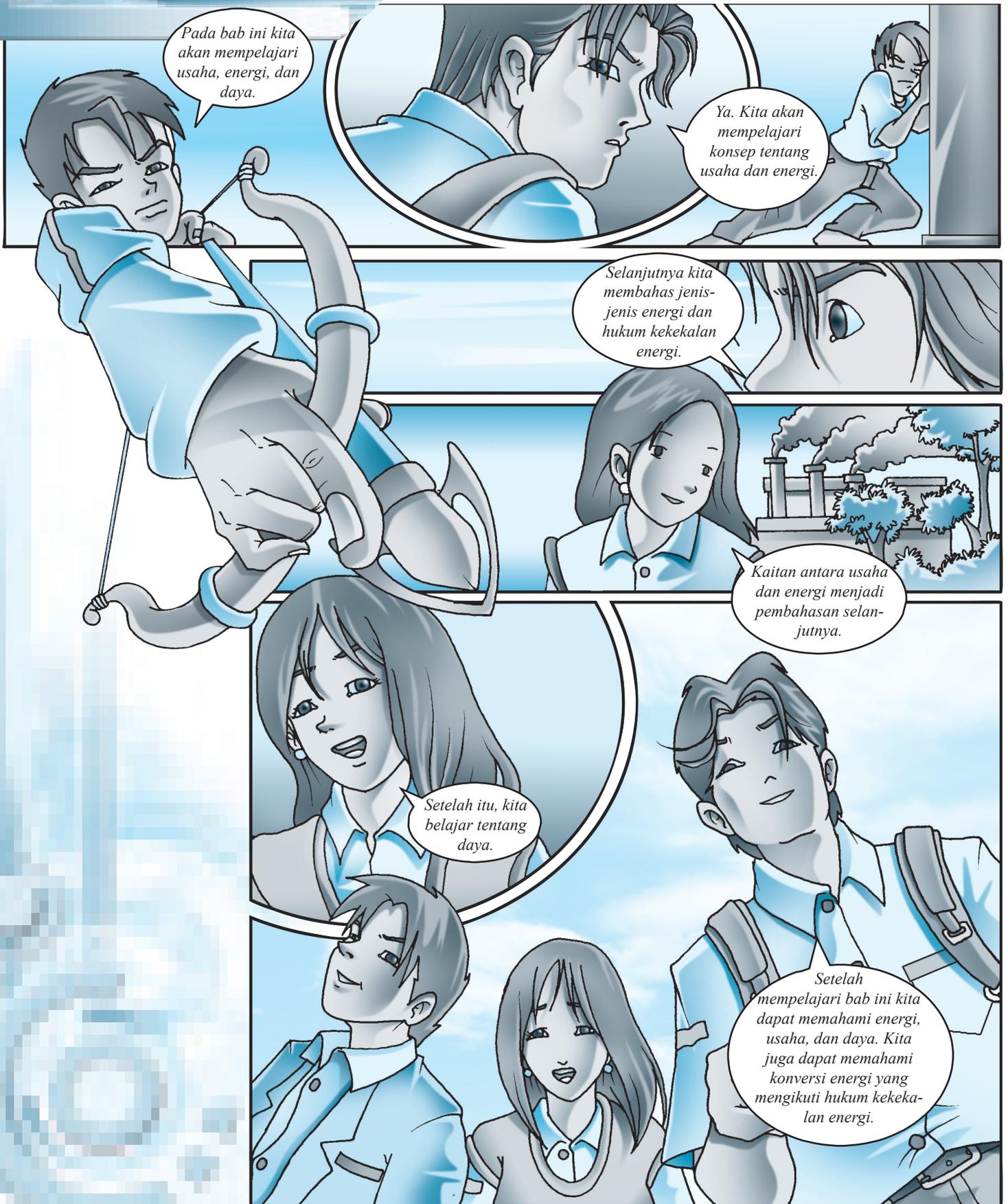
**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!**

1. Suatu getaran harmonik sederhana mempunyai persamaan  $y = 4 \sin 16 \pi t$ .  $y$  dalam cm dan  $t$  dalam sekon. Tentukan:
- a. amplitudo,  
 b. frekuensi,  
 c. periode,  
 d. kecepatan saat  $t = \frac{1}{8}$  s,  
 e. percepatan saat  $t = \frac{1}{4}$  s,  
 f. fase saat  $t = \frac{1}{16}$  s.
2. Jika kala revolusi planet A adalah 8 tahun dan planet B adalah 27 tahun, tentukan perbandingan jarak planet A ke matahari dibanding jarak planet B ke matahari!
3. Seutas tali sepanjang 20 m mempunyai jari-jari penampang melintang sebesar 2 mm. Jika tali digunakan untuk menahan beban bermassa 80 kg maka tali meregang sepanjang 10 cm. Tentukan:
- a. tegangan tali,  
 b. regangan tali,  
 c. modulus elastis tali.
5. Persaman gerak suatu getaran adalah  $y = 10 \sin 50\pi t$ .  $y$  dalam cm dan  $t$  dalam sekon. Tentukan:
- a. persamaan percepatannya,  
 b. percepatan maksimumnya,  
 c. waktu benda bergetar saat fasenya  $\frac{1}{5}$ ,  
 d. panjang simpangan pada saat fasenya  $\frac{1}{5}$ ,  
 e. besar kecepatan getar pada saat  $t = \frac{1}{75}$  detik.

# BAB

# 4

## USAHA, ENERGI, DAN DAYA





Gambar 4.1 Seorang pemanah saat akan melepaskan anak panah

Pernahkah kamu mengamati orang yang sedang memanah? Mengapa anak panah yang dilepaskan dapat melesat jauh hingga mencapai sasaran? Anak panah dapat mencapai sasaran karena mendapat energi dari pemanah. Sebelum melepaskan anak panah, seorang pemanah harus merentangkan busurnya terlebih dahulu. Busur yang terentang memiliki energi potensial. Ketika anak panah dilepaskan, energi potensial tersebut berubah menjadi energi kinetik yang digunakan anak panah untuk bergerak. Untuk mempelajari lebih lanjut tentang energi dan perubahannya, mari kita pelajari konsep tentang usaha, energi, dan daya berikut!

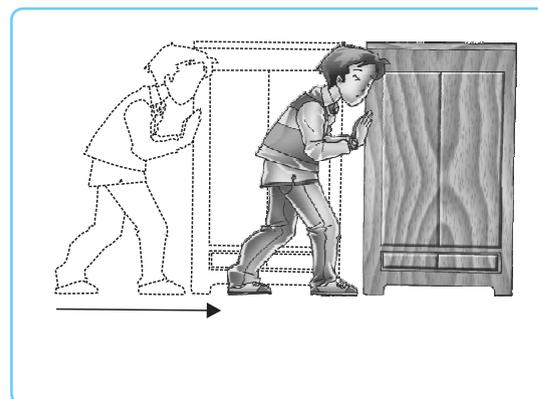
**Kata Kunci:** Konsep tentang Usaha dan Energi – Jenis-jenis Energi – Hubungan antara Usaha

## dan Energi – Daya

### A. Usaha

Kita sudah sering mendengar kata usaha. Apakah sebenarnya usaha itu? Untuk memahami konsep tentang usaha, perhatikan uraian berikut!

Gambar 4.2 memperlihatkan ilustrasi seseorang yang sedang mendorong lemari sejauh  $s$  meter. Orang tersebut dikatakan melakukan usaha atau kerja karena lemari mengalami perpindahan.



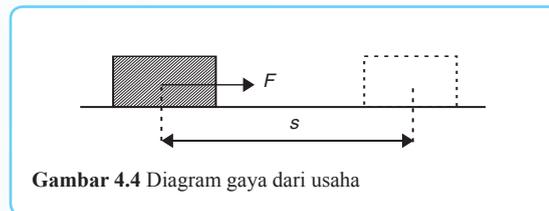
Pada gambar 4.3 terlihat seseorang sedang mendorong tembok dengan sekuat tenaga. Orang yang mendorong dinding tembok dikatakan tidak melakukan usaha atau kerja, meskipun orang tersebut mengeluarkan gaya dorong yang sangat besar. Hal ini dikarenakan tembok tidak mengalami perpindahan kedudukan. Usaha dikatakan bernilai jika terdapat perpindahan kedudukan.



## ■ Usaha

Usaha memiliki berbagai arti dalam bahasa sehari-hari. Dalam fisika usaha diberi arti yang spesifik untuk mendeskripsikan apa yang dihasilkan gaya ketika gaya itu bekerja pada suatu benda. **Usaha** juga didefinisikan sebagai hasil kali besar perpindahan dengan komponen gaya yang sejajar dengan perpindahan.

Pada orang yang mendorong lemari seperti ilustrasi di awal, gaya yang diberikan pada lemari searah dengan perpindahan lemari. Jika gaya



yang dikerjakan pada benda searah dengan perpindahan benda, diagram gayanya dapat digambarkan seperti pada 4.4 di bawah ini.

Pada gambar 4.4, gaya  $F$  diberikan kepada benda. Akibatnya benda mengalami perpindahan sejauh  $s$ . Dengan demikian, usaha yang dilakukan oleh gaya  $F$  dirumuskan:

$$W = F \cdot s \quad \dots (4.1)$$

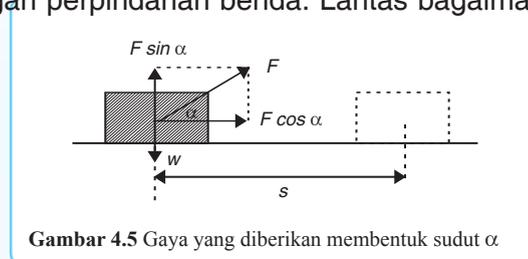
### Keterangan:

$W$  : usaha (joule)

$F$  : gaya yang sejajar dengan perpindahan (N)

$s$  : perpindahan (m)

Persamaan di atas berlaku jika gaya yang diberikan pada benda searah dengan perpindahan benda. Lantas bagaimana jika gaya yang



diberikan pada benda membentuk sudut terhadap arah perpindahan?

Perhatikan gambar 4.5 di atas! Pada gambar 4.5 terlihat bahwa sebuah gaya  $F$  yang membentuk sudut diberikan pada benda. Akibatnya benda mengalami perpindahan sejauh  $s$ . Usaha yang dilakukan oleh gaya  $F$  dapat dinyatakan dengan rumus berikut.

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

$$\dots (4.2)$$

Ada kalanya gaya yang diberikan pada suatu benda besarnya tidak teratur. Bagaimana cara menentukan besarnya usaha, jika gaya yang diberikan tidak teratur?

Sebagai contoh, seseorang yang mendorong lemari. Dalam selang waktu 5 sekon, gaya yang diberikan orang tersebut dari 2 N menjadi 8 N. Akibatnya lemari berpindah dari kedudukan 2 m menjadi 6 m.

Untuk menentukan usaha yang dilakukan oleh orang tersebut, kita dapat menggambarkan gaya dan perpindahan yang dilakukannya seperti gambar 4.6. Usaha yang dilakukan orang tersebut dapat ditentukan dengan mencari luas di bawah kurva. Dari gambar 4.6 terlihat bahwa luas di bawah kurva berbentuk trapesium. Oleh karena itu, usaha yang dilakukan orang tersebut adalah:

$W = \text{luas trapesium}$

$W = \text{jumlah garis sejajar} \times \frac{1}{2} \times \text{tinggi}$

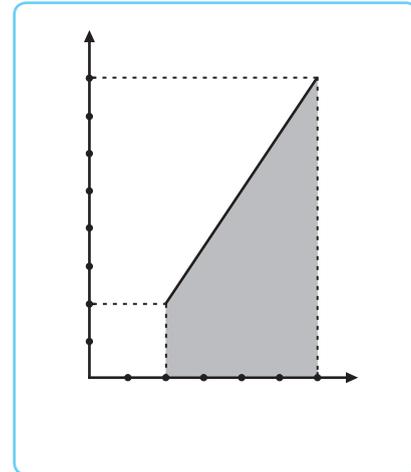
$$W = (8 + 2) \times \left[ \frac{1}{2} \times (6 - 2) \right]$$

$$W = 10 \left( \frac{1}{2} \times 4 \right)$$

$$W = 10 \times 2$$

$$W = 20 \text{ joule}$$

Agar kamu lebih memahami cara menentukan besarnya usaha, perhatikan contoh soal berikut! Kemudian kerjakan soal-soal di bawahnya!



### Contoh Soal

Sebuah balok bermassa 5 kg di atas lantai licin ditarik gaya 4 N membentuk sudut  $60^\circ$  terhadap bidang horizontal. Jika balok berpindah sejauh 2 m, tentukan usaha yang dilakukan!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $m = 5 \text{ kg}$

$$F = 4 \text{ N}$$

$$s = 2 \text{ m}$$

Ditanyakan:  $W = \dots?$

Jawab:

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

$$W = 4 \cdot 2 \cdot \cos 60^\circ$$

$$W = 4 \text{ joule}$$



## Kerja Mandiri 1

*Kerjakan soal berikut dengan tepat!*

1. Sebuah benda meluncur di atas papan kasar sejauh 5 m. Jika benda mendapat perlawanan gesekan dengan papan sebesar 180 newton, berapa besarnya usaha yang dilakukan oleh benda tersebut?
2. Gaya sebesar 60 newton bekerja pada sebuah benda. Arah gaya membentuk sudut  $30^\circ$  dengan bidang horizontal. Jika benda berpindah sejauh 50 m, berapa besarnya usaha yang dilakukan oleh benda tersebut?



## Diskusi

*Diskusikan bersama kelompokmu!*

1. Bagaimanakah besar usaha yang dilakukan oleh suatu benda jika lintasan yang ditempuh benda berbeda-beda? Misalnya sebuah mobil yang melaju di jalan lurus, jalan yang berbelok, menikung dan jalan yang menanjak.
2. Buatlah penjelasan mengenai masing-masing usaha tersebut!
3. Presentasikan hasil diskusimu di depan kelas! Berikan kesempatan kepada kelompok lain untuk menanggapi!

## B. Energi

Energi merupakan salah satu konsep penting dalam sains. Energi dapat diartikan sebagai **kemampuan untuk melakukan usaha atau kerja**. Cobalah kamu sebutkan beberapa jenis energi yang kamu kenal! Bagaimanakah sifat energi tersebut? Apakah energi itu tetap ada namun dapat berubah bentuk? Jelaskanlah salah satu bentuk energi yang kamu kenal dalam melakukan suatu usaha atau gerak!

Dalam fisika terdapat berbagai jenis energi, di antaranya energi potensial, energi kinetik, dan energi mekanik yang akan dibahas berikut ini.

### ■ Energi

## 1. Energi Potensial

Energi potensial adalah energi yang berkaitan dengan kedudukan benda terhadap titik acuan. Dengan demikian, titik acuan akan menjadi tolok ukur penentuan ketinggian suatu benda. Energi potensial ada beberapa macam, seperti berikut ini.

### a. Energi potensial gravitasi

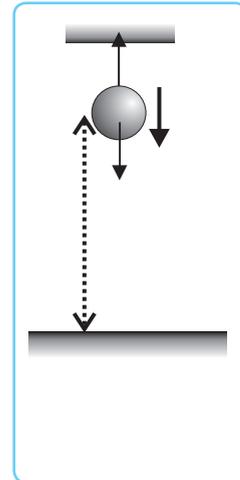
Kamu tentu pernah melihat air terjun bukan? Pada air terjun tersimpan energi potensial gravitasi yang disebabkan oleh ketinggiannya. Demikian juga ketika kita meletakkan sebuah benda pada suatu ketinggian, pada hakikatnya dalam benda tersebut tersimpan energi potensial gravitasi. Energi potensial gravitasi adalah energi potensial suatu benda yang disebabkan oleh kedudukan benda terhadap gravitasi bumi.

Jika kita menggantung bola bermassa  $m$ , (lihat gambar 4.7) pada ketinggian  $h$  dari permukaan tanah maka energi potensial gravitasi bola tersebut dinyatakan:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad \dots (4.3)$$

#### Keterangan:

- $E_p$ : energi potensial (joule)
- $m$ : massa (kg)
- $g$ : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
- $h$ : ketinggian terhadap titik acuan (m)



### b. Energi potensial gravitasi Newton

Energi potensial gravitasi Newton adalah energi potensial gravitasi antara dua benda angkasa. Energi ini dirumuskan sebagai berikut.

$$E_p = -G \frac{M \cdot m}{r} \quad \dots (4.4)$$

#### Keterangan:

- $E_p$ : energi potensial gravitasi Newton (joule)
- $M$ : massa planet (kg)
- $m$ : massa benda (kg)
- $r$ : jarak benda ke pusat planet (m)
- $G$ : tetapan gravitasi universal =  $6,673 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ .

Dari rumus di atas terlihat bahwa  $E_p$  bernilai negatif. Artinya, untuk memindahkan benda dari posisi tertentu ke posisi lain yang jaraknya lebih jauh dari pusat planet diperlukan sejumlah energi. Selain itu, tanda negatif pada  $E_p$  juga menunjukkan bahwa suatu planet akan tetap terikat pada medan gravitasi matahari, sehingga planet tetap berada pada orbitnya.

### c. Energi potensial pegas

Dari pembahasan sebelumnya diketahui bahwa hubungan antara pertambahan panjang dengan gaya pegas adalah sebagai berikut.

$$F = -k \cdot \Delta x$$

Agar kamu lebih memahami konsep energi potensial pada pegas, ambillah sebuah pegas! Setelah itu, tekan pegas tersebut dengan tanganmu! Apa yang terjadi? Jika kamu memberikan gaya tekan yang besar pada pegas maka pegas tersebut juga akan mempunyai energi potensial yang besar. Perhatikan gambar 4.8!



Jika tekanan yang kamu berikan pada pegas tiba-tiba kamu lepaskan, pegas akan kembali ke bentuk semula dengan cepat. Kemampuan pegas untuk kembali ke bentuk semula disebut energi potensial pegas.

Energi potensial pegas dapat ditentukan dengan menggambarkan gaya pegas dan pertambahan panjang pegas seperti gambar 4.9. Luas di bawah kurva pada gambar 4.9 menunjukkan besarnya energi potensial pegas dan dapat dituliskan:

$$E_p = \text{luas segitiga}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot x_A \cdot F_A$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot x_A \cdot k \cdot x_A$$

$$E_p = \frac{1}{2} k \cdot x_A^2$$

Secara umum, energi potensial pegas dapat dirumuskan:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$$

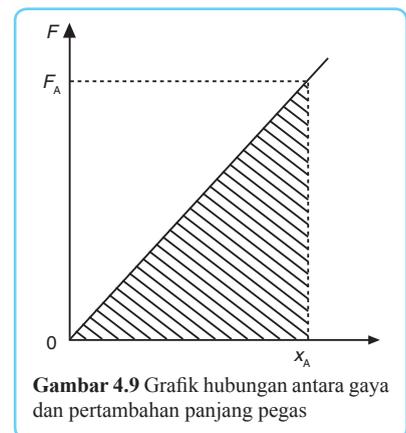
**Keterangan:**

$E_p$  : energi potensial pegas (joule)

$k$  : konstanta pegas (N/m)

$x$  : pertambahan panjang (m)

$F$  : gaya pegas (N)



Gambar 4.9 Grafik hubungan antara gaya dan pertambahan panjang pegas

... (4.5)

Contoh penerapan energi potensial pegas yaitu pada anak panah yang dilepaskan. Contoh lainnya adalah pada mobil mainan yang akan bergerak maju setelah kita beri gaya dorong ke belakang. Untuk membantumu memahami tentang energi potensial, perhatikan contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Suatu benda ketika berada di permukaan bumi menerima energi gravitasi Newton sebesar 10 joule. Tentukan energi potensial gravitasi Newton yang dialami benda itu ketika berada pada ketinggian satu kali jari-jari bumi dari permukaan bumi!

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$E_{p1} = 10 \text{ joule}$$

$$r_2 = 2r_1$$

Ditanyakan:  $E_{p2} = \dots?$

Jawab:

$$\frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \frac{-G \frac{M.m}{r_2}}{-G \frac{M.m}{r_1}}$$

$$\frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \frac{r_2}{r_1}$$

$$\frac{E_{p2}}{10} = \frac{r_1}{(2r_1)}$$

$$E_{p2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ joule}$$

## 2. Energi Kinetik

Energi kinetik adalah energi yang berkaitan dengan gerak suatu benda. Jadi, setiap

benda yang bergerak memiliki energi kinetik. Meskipun gerak suatu benda dapat dilihat sebagai suatu sikap relatif, namun penentuan kerangka acuan dari gerak harus tetap dilakukan untuk menentukan gerak itu.

Persamaan energi kinetik dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m v^2 \quad \dots (4.6)$$

**Keterangan:**

$E_k$  : energi kinetik (joule)

$m$  : massa benda (kg)

$v$  : kecepatan gerak suatu benda (m/s)



## 3. Energi Mekanik

Energi mekanik adalah energi total yang dimiliki oleh suatu benda. Energi mekanik berasal dari energi potensial dan energi kinetik

benda tersebut. Untuk lebih jelasnya, simaklah uraian berikut!

Perhatikan benda yang jatuh dari suatu ketinggian! Bagaimanakah perubahan kecepatan dan ketinggiannya? Pada benda yang jatuh tampak bahwa ketinggiannya akan selalu berkurang. Hal ini berarti energi potensialnya juga berkurang. Apakah energi potensial yang berkurang tersebut hilang begitu saja? Tentu tidak. Karena energi tersebut berubah menjadi energi kinetik, sehingga energi kinetik dan kecepatan benda tersebut akan bertambah. Dengan demikian, besar energi mekanik benda tersebut adalah tetap dan dirumuskan sebagai berikut.

$$E_m = E_p + E_k \quad \dots (4.7)$$

Energi mekanik suatu benda bersifat kekal, artinya energi mekanik tidak dapat dimusnahkan, namun dapat berubah bentuk. Pernyataan di atas disebut **hukum kekekalan energi mekanik**. Secara matematis, hukum kekekalan energi mekanik dapat dirumuskan:

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} \quad \dots (4.8)$$

Persamaan di atas hanya berlaku jika tidak terjadi gesekan. Jika terjadi gesekan, sebagian energi akan berubah menjadi energi panas. Agar kamu dapat lebih memahami penerapan rumus-rumus energi, pelajari contoh soal berikut! Kemudian kerjakan soal-soal di bawahnya!

### Contoh Soal

1. Buah kelapa bermassa 4 kg jatuh dari pohon setinggi 12,5 m. Tentukan kecepatan kelapa saat menyentuh tanah!

#### Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 4 \text{ kg}$$

$$h = 12,5 \text{ m}$$

Ditanyakan:  $v_2 = \dots?$

Jawab:

Kelapa jatuh mengalami gerak jatuh bebas, sehingga kecepatan awalnya nol. Saat jatuh di tanah ketinggian kelapa sama dengan nol.

$$m \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = m \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2$$

Jika semua ruas dibagi dengan  $m$  maka diperoleh:

$$g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 = g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2$$

$$10 \cdot 12,5 + \frac{1}{2} \cdot 0^2 = 10 \cdot 0 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2$$

$$125 + 0 = 0 + \frac{1}{2} v_2^2$$

$$v_2 = \sqrt{250}$$

### Hukum Kekekalan Energi Mekanik

$$v_2 = 10,95 \text{ m/s}$$

2. Sebuah benda jatuh dari ketinggian 4 m, kemudian melewati bidang lengkung seperempat lingkaran licin dengan jari-jari 2 m. Tentukan kelajuan saat lepas dari bidang lengkung tersebut!

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$h_1 = 6 \text{ m}$$

Ditanyakan:  $v_2 = \dots?$

Jawab:

Jika bidang lintasan licin maka benda mengalami gerak jatuh bebas. Lintasan benda tidak perlu diperhatikan, sehingga diperoleh:

$$m \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = m \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2$$

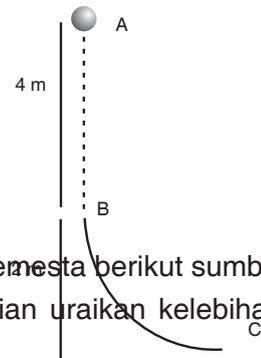
$$g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 = g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2$$

$$10 \cdot 6 + \frac{1}{2} \cdot 0^2 = 10 \cdot 0 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2$$

$$60 + 0 = 0 + \frac{1}{2} v_2^2$$

$$v_2 = \sqrt{120}$$

$$v_2 = 10,95 \text{ m/s}$$



*Kerjakan soal berikut dengan tepat!*

1. Sebutkan beberapa bentuk energi yang ada di alam semesta berikut sumbernya!
2. Tuliskan cara memanfaatkan energi tersebut, kemudian uraikan kelebihan dan kekurangannya!
3. Presentasikan hasil kerjamu di depan kelas secara bergantian!



## Kerja Mandiri 2

### C. Kaitan antara Usaha dan Energi

Pada bagian ini akan kita pelajari hubungan antara usaha dengan energi kinetik dan energi potensial. Di depan telah disinggung bahwa kerja atau usaha dapat terjadi karena adanya sejumlah energi. Apabila dalam sistem hanya berlaku energi kinetik saja maka teori usaha-energi dapat ditentukan sebagai berikut.

$$W = F \cdot s$$

$$W = m \cdot a \cdot s$$

$$W = \frac{1}{2} m \cdot 2 \cdot a \cdot s$$

Karena  $2 \cdot a \cdot s = v_2^2 - v_1^2$  maka

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

$$W = \Delta E_k \quad \dots (4.9)$$

Apabila dalam sistem hanya berlaku energi potensial gravitasi saja maka teori usaha-energi dapat ditentukan dengan persamaan:

$$W = \Delta E_p$$

$$W = m \cdot g \cdot h_2 - m \cdot g \cdot h_1 \quad \dots (4.10)$$

Pada berbagai kasus dengan beberapa gaya dapat ditentukan besarnya usaha netto (bersih) sebagai berikut.

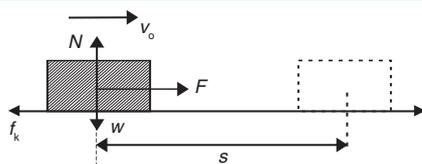
### 1. Pada bidang datar

Perhatikan gambar 4.11! Pada gambar terlihat bahwa sebuah gaya  $F$  menarik balok sehingga balok mengalami perpindahan sejauh  $s$ . Jika lantai pada gambar tersebut menimbulkan gaya gesek sebesar  $f_k$  maka resultan gaya yang bekerja pada benda adalah:

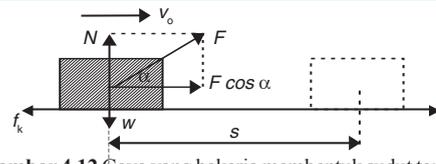
$$\Sigma F = F - f_k$$

Besar usaha yang dilakukan oleh benda dirumuskan:

$$W = \Sigma F \cdot s$$



Gambar 4.11 Gaya yang bekerja searah bidang datar



Gambar 4.12 Gaya yang bekerja membentuk sudut terhadap bidang datar

$$W = (F - f_k) \cdot s$$

Dari persamaan 4.9, kita tahu bahwa  $W = \Delta E_k$  sehingga

$$W_{\text{netto}} = F \cdot \cos \alpha - f_k \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m (v_t^2 - v_0^2) \quad \dots (4.11)$$

Jika gaya yang bekerja membentuk sudut  $\alpha$  terhadap bidang datar, seperti gambar 4.12, resultan gaya yang bekerja pada balok adalah:

$$\Sigma F = F \cos \alpha - f_k$$

Besar usaha yang dilakukan oleh balok tersebut adalah:

$$W = \Sigma F \cdot s$$

$$W = ( \cos \alpha - f_k ) \cdot s$$

Analogi dengan persamaan 4.12 kita peroleh:

$$W_{\text{netto}} = F \cdot \cos \alpha - f_k \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m (v_t^2 - v_0^2) \quad \dots (4.12)$$

**Keterangan:**

$m$  : massa balok (kg)

$V_0$  : kecepatan awal (m/s)

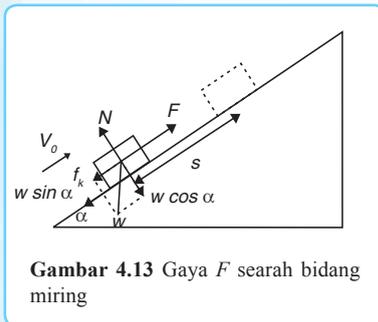
$V_t$  : kecepatan akhir (m/s)

## 2. Pada bidang miring

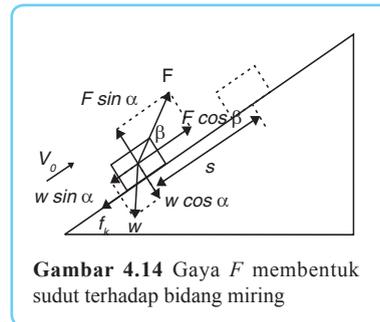
Kaitan antara usaha dan energi pada gerak benda pada bidang miring adalah sebagai berikut. Misalnya sebuah balok bermassa  $m$  diberi gaya  $F$  sehingga balok bergerak ke atas sejauh  $s$  seperti gambar 4.13. Jika lantai bidang miring pada gambar tersebut menimbulkan gaya gesek  $f_k$  maka resultan gaya yang bekerja adalah:

$$\Sigma F = F - w \sin \alpha - f_k$$

Dengan demikian, usaha netto yang bekerja pada balok dirumuskan:



**Gambar 4.13** Gaya  $F$  searah bidang miring



**Gambar 4.14** Gaya  $F$  membentuk sudut terhadap bidang miring

$$W_{\text{netto}} = (F - w \cdot \sin \alpha - f_k) \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m (v_t^2 - v_0^2) \quad \dots (4.13)$$

Jika gaya yang bekerja pada balok membentuk sudut  $\beta$  terhadap bidang miring maka resultan gayanya:

$$\Sigma F = F \cdot \cos \beta - w \cdot \sin \alpha - f_k$$

Dengan demikian, usaha netto yang bekerja pada balok adalah:

$$W_{\text{netto}} = (F \cdot \cos \beta - w \cdot \sin \alpha - f_k) \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m (v_t^2 - v_0^2) \quad \dots (4.14)$$

**Keterangan:**

$\alpha$  : sudut yang dibentuk bidang miring

Untuk lebih jelasnya, pelajari contoh soal berikut! Kemudian kerjakan soal di bawahnya!

### Contoh Soal

1. Tentukan usaha untuk mengangkat balok 10 kg dari permukaan tanah ke atas meja setinggi 1,5 m.

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$m = 10 \text{ kg}$$

$$h_1 = 0 \text{ m}$$

$$h_2 = 1,5 \text{ m}$$

Ditanyakan:  $W = \dots?$

Jawab:

$$W = m \cdot g (h_1 - h_2)$$

$$W = 10 \cdot 10 \cdot (0 - 1,5)$$

$$W = -150 \text{ joule}$$

Tanda (-) berarti diperlukan sejumlah energi untuk mengangkat balok tersebut.

2. Sebuah air terjun setinggi 100 m menumpahkan air melalui sebuah pipa dengan luas penampang  $0,5 \text{ m}^2$ . Laju aliran air yang melalui pipa adalah  $2 \text{ m/s}$ . Tentukan energi yang dihasilkan air terjun tiap sekon yang dapat digunakan untuk menggerakkan turbin di dasar air terjun!

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$h_1 = 100 \text{ m}$$

$$h_2 = 0 \text{ m}$$

$$A = 0,5 \text{ m}^2$$

$$v = 2 \text{ m/s}$$

Ditanyakan:  $W = \dots?$

Jawab:

Langkah 1:

Menentukan debit air terjun, yaitu banyaknya volume air yang mengalir melalui suatu penampang lintang tertentu tiap satuan waktu.

$$Q = A \cdot v$$

$$Q = 0,5 \cdot 2$$

$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

Langkah 2:

Menentukan volume air dalam debit air.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$1 = \frac{V}{1}$$

$$V = 1 \text{ m}^3$$

Langkah 3:

Menentukan massa air tiap sekon.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$1.000 = \frac{m}{1}$$

$$m = 1.000 \text{ kg}$$

Langkah 4:

Menentukan energi yang dihasilkan air terjun tiap sekon.

$$W = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

$$W = 1.000 \cdot 10 \cdot (100 - 0)$$

$$W = 1.000.000 \text{ joule}$$

*Kerjakan soal berikut dengan tepat!*

Gaya sebesar 80 newton bekerja pada benda bermassa  $50\sqrt{3}$  kg. Jika arah gaya membentuk sudut  $30^\circ$  dengan horizontal, hitunglah kecepatan benda setelah berpindah sejauh 10 m!

## D. Daya

Saat kita membeli bola lampu, pada kardus kemasan bola lampu tersebut selalu



### Kerja Mandiri 3

tercantum angka-angka dalam satuan watt. Misalnya 5 watt, 10 watt, dan sebagainya. Menyatakan besaran apakah watt itu? Watt merupakan satuan untuk menyatakan daya.

**Daya** adalah kemampuan untuk mengubah suatu bentuk energi menjadi bentuk energi lain. Sebagai contoh, sebuah lampu 100 watt be-

refisiensi 100 %. Artinya tiap detik lampu tersebut akan mengubah 100 joule energi listrik yang memasuki lampu menjadi 100 joule energi cahaya. Semakin besar daya suatu alat, semakin besar pula kemampuan alat tersebut mengubah suatu bentuk energi menjadi bentuk energi lain.

Jika energi yang masuk ke suatu alat seluruhnya dapat diubah menjadi energi bentuk lain maka efisiensi alat tersebut adalah 100%. Besarnya daya dirumuskan sebagai berikut.

$$P = \frac{W}{t}$$

... (4.15)

**Keterangan:**

$P$  : daya (watt)

$W$  : usaha (joule)

## Daya

$t$  : waktu (s)

Dalam kehidupan sehari-hari sukar ditemukan kondisi ideal. Oleh karena itu, dikenal adanya konsep efisiensi. Konsep efisiensi adalah suatu perbandingan antara energi atau daya yang dihasilkan dibandingkan dengan usaha atau daya masukan. Efisiensi dirumuskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} \times 100 \% \quad \text{atau} \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad \dots (4.16)$$

**Keterangan:**

$\eta$  : efisiensi (%)

$W_{out}$  : usaha yang dihasilkan (joule)

$W_{in}$  : usaha yang dimasukkan atau diperlukan (joule)

$P_{out}$  : daya yang dihasilkan (watt)

$P_{in}$  : daya yang dimasukkan atau dibutuhkan (watt)

Untuk membantumu memahami tentang perubahan bentuk energi, lakukan kegiatan berikut!

### Perubahan Bentuk Energi

#### A. Tujuan

Menunjukkan adanya perubahan suatu bentuk energi menjadi bentuk energi lain.

#### B. Alat dan Bahan

1. Pegas 1 buah
2. Balok 1 buah



### Praktikum

3. Bola kecil 1 buah

#### C. Langkah Kerja

1. Tempelkan pegas pada balok yang cukup besar. Kemudian di ujung pegas diberi bola kecil!
2. Letakkan semua benda di meja! Tariklah bola kecil kemudian lepaskan!
3. Selidikilah perubahan energi apa saja yang terjadi dalam percobaan tersebut!
4. Buatlah kesimpulan dari hasil kerjamu dan diskusikan hasilnya dengan teman-temanmu dengan bimbingan bapak ibu guru.

Peringatan:

- a. Kembalikan semua peralatan ke tempat semula!
- b. Jagalah kebersihan lingkungan!

Setelah melakukan kegiatan di atas, kamu tentu sudah memahami tentang perubahan bentuk energi. Selanjutnya simaklah contoh soal berikut! Setelah itu kerjakan soal-soal di bawahnya!

#### Contoh Soal

1. Romi mendorong kotak bermassa 3 kg dengan gaya 15 N. Tentukan daya

yang dilakukan anak tersebut jika ia mampu mendorong kotak sejauh 2,5 m dalam waktu 2 sekon!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $m = 15 \text{ kg}$

$$s = 2,5 \text{ m}$$

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

Ditanyakan:  $P = \dots?$

Jawab:

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = \frac{F \cdot s}{t}$$

$$P = \frac{15 \cdot 2,5}{2}$$

$$P = \frac{37,5}{2}$$

$$P = 18,75 \text{ watt}$$

2. Sebuah mobil bermassa 1 ton dipacu dari kelajuan 36 km/jam menjadi 144 km/jam dalam 4 sekon. Jika efisiensi mobil 80 %, tentukan daya yang dihasilkan mobil!

**Penyelesaian:**

Diketahui:

$$m = 1 \text{ ton}$$

$$v_1 = 36 \text{ km/jam}$$

$$v_2 = 144 \text{ km/jam}$$

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

Ditanyakan:  $P = \dots?$

Jawab:

Langkah 1:

Menentukan usaha yang dilakukan.

$$W = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \quad (1 \text{ ton} = 1.000 \text{ kg}, 144 \text{ km/jam} = 40 \text{ m/s}, 36 \text{ km/jam} = 10 \text{ m/s})$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot 1.000 \cdot (40)^2 - \frac{1}{2} \cdot 1.000 \cdot (10)^2$$

$$W = 750.000 \text{ joule}$$

Langkah 2:

Menentukan daya yang dibutuhkan.

$$P_{in} = \frac{W}{t}$$

$$P_{in} = \frac{750.000}{4}$$

$$P_{in} = 187.500 \text{ watt}$$

Langkah 3:

Menentukan usaha yang dihasilkan.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$80\% = \frac{P_{out}}{187.500}$$

$$P_{out} = 150.000 \text{ watt}$$

*Kerjakan soal berikut bersama teman sebangkumu!*

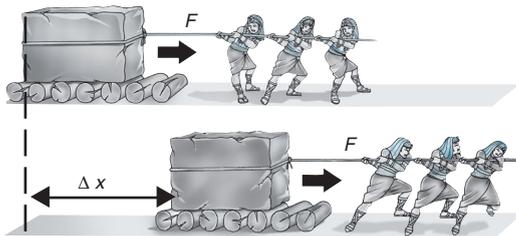
1. Gambar di bawah ini adalah salah satu kegiatan bangsa Mesir primitif dalam membangun piramid. Berikan ilustrasi secara singkat mengenai besaran-besaran yang bekerja pada gambar berikut!
  2. Sebutkan faktor yang dibutuhkan oleh bangsa Mesir primitif dalam memindahkan batu besar!
  3. Berapa daya yang dibutuhkan untuk memindahkan batu tersebut? Jelaskan pula efisiensinya!
1. Usaha adalah hasil kali resultan gaya dengan perpindahan.



## Kerja Berpasangan

$$W = F \cdot \cos \alpha \cdot d$$

2. Energi potensial adalah energi yang dimiliki benda karena posisinya.



$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

3. Energi kinetik adalah energi yang dimiliki benda bergerak.



## Rangkuman

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

4. Energi mekanik adalah jumlah energi potensial dan energi kinetik.

$$E_m = E_p + E_k$$

5. Usaha pada arah mendatar sama dengan perubahan energi kinetik.

$$W = \Delta E_k$$

6. Usaha pada arah vertikal sama dengan perubahan energi potensial.

$$W = \Delta E_p$$

7. Hukum Kekekalan Energi Mekanik dirumuskan sebagai berikut.

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

8. Daya adalah energi tiap satuan waktu.

$$P = \frac{W}{t}$$

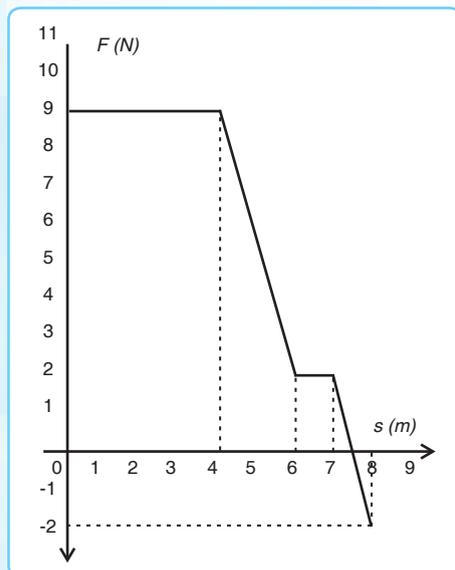
### A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Gaya sebesar 40 N digunakan untuk menarik sebuah benda pada lantai datar. Tali yang digunakan untuk menarik benda membentuk sudut  $45^\circ$  dan benda berpindah sejauh  $4\sqrt{2}$  m. Besar usaha yang dilakukan adalah . . . .
- 40 joule
  - 120 joule
  - 160 joule



## Soal-soal Uji Kompetensi

- d.  $210\sqrt{2}$  joule  
e.  $450\sqrt{2}$  joule
2. Sebuah mobil mainan mempunyai kedudukan yang ditunjukkan oleh grafik berikut ini.  
Usaha yang dilakukan mobil mainan untuk berpindah dari titik asal ke kedudukan sejauh 8 meter adalah . . . .
- a. 30 joule                      d. 46 joule  
b. 44 joule                      e. 49 joule  
c. 45 joule
3. Jika sebuah bola bermassa 1 kg menggelinding dengan kelajuan tetap 4 m/s maka energi kinetik bola adalah . . . .



- a. 1 joule                      d. 4 joule  
b. 2 joule                      e. 8 joule  
c. 3 joule
4. Kelereng dilempar ke atas dari permukaan tanah dengan kecepatan 8 m/s. Kecepatan kelereng saat bergerak ke atas dengan tinggi 2 m adalah . . . .
- a.  $3\sqrt{6}$  m/s                      d.  $\sqrt{8}$  m/s

- b.  $2\sqrt{6}$  m/s                      e.  $\sqrt{6}$  m/s  
c. 2 m/s
5. Sebuah motor dengan kelajuan 18 km/jam memerlukan waktu 5 sekon untuk berhenti. Jika massa motor 100 kg maka:
- 1) perlambatan motor sebesar  $1 \text{ m/s}^2$
  - 2) usaha yang diperlukan untuk menghentikan motor adalah -1.250 joule
  - 3) gaya rem untuk menghentikan gerak motor sebesar -100 N
  - 4) motor berhenti setelah menempuh jarak 12,5 m

Pernyataan di atas yang benar adalah . . . .

- a. 1), 2), dan 3)  
b. 1) dan 3)  
c. 2) dan 4)  
d. 4) saja  
e. semua benar
6. Sebuah balok bermassa 400 gram dijatuhkan dari ketinggian 2 m ke permukaan tanah. Jika pada permukaan tanah terdapat pegas dengan konstanta 100 N/m maka pegas akan tertekan sebesar . . . .
- a. 0,01 m                      d. 0,04 m  
b. 0,02 m                      e. 0,05 m  
c. 0,03 m
7. Sebuah motor bermassa 300 kg berhenti dari kelajuan 36 km/jam sejauh 5 m. Besar gaya pengereman yang dilakukan adalah . . . .
- a. 1.000 N                      d. 4.000 N  
b. 2.000 N                      e. 5.000 N  
c. 3.000 N
8. Saat sebuah peluru ditembakkan vertikal ke atas dari permukaan tanah,

berlaku . . . .

- 1) di permukaan tanah energi kinetik minimum
- 2) di permukaan tanah energi potensial maksimum
- 3) di titik tertinggi energi kinetik maksimum
- 4) di titik tertinggi energi potensial maksimum

Dari pernyataan di atas yang benar adalah . . . .

- a. 1), 2), dan 3)
  - b. 1) dan 3)
  - c. 2) dan 4)
  - d. 4) saja
  - e. semua benar
9. Mesin truk Pak Bonar mempunyai kekuatan 1.000 daya kuda (hp). Jika 1 hp = 746 watt maka daya keluaran mesin dengan efisiensi mesin 90 % adalah . . . .
- a.  $7,460 \cdot 10^5$  watt
  - b.  $7,460 \cdot 10^4$  watt
  - c.  $7,460 \cdot 10^3$  watt
  - d.  $6,714 \cdot 10^5$  watt
  - e.  $6,714 \cdot 10^4$  watt
10. Air terjun pada ketinggian 40 m mengalirkan air sebanyak 150.000 kg/menit. Jika efisiensi generator 50 % maka daya yang dihasilkan generator adalah . . . .
- |           |           |
|-----------|-----------|
| a. 525 kW | d. 450 kW |
| b. 500 kW | e. 400 kW |
| c. 475 kW |           |

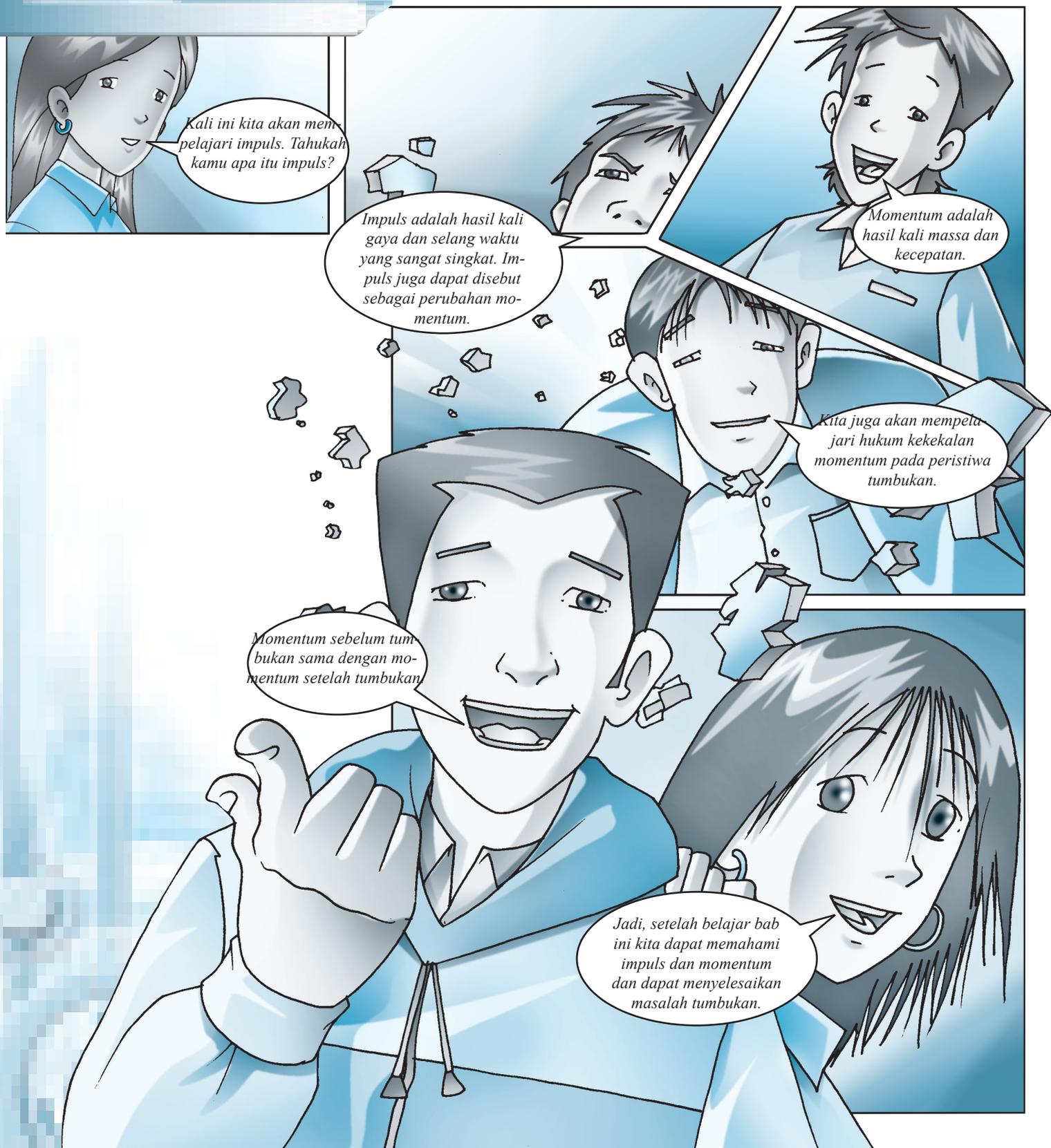
**B. Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!**

1. Mila memindahkan buku 200 gram dari permukaan tanah ke atas meja setinggi 1,25 m. Tentukan besar usaha yang diperlukan!
2. Buah apel bermassa 100 gram jatuh dari ketinggian 2 m. Tentukan kecepatan buah apel saat menyentuh tanah!
3. Sebuah mobil dengan rem blong dan berkecepatan 36 km/jam menaiki tanjakan dengan kemiringan  $37^\circ$ . Berapa besar gaya gesek roda dan jalan tanjakan itu sehingga mobil berhenti?
4. Sebuah peluru bermassa 40 gram ditembakkan dengan sudut elevasi  $63^\circ$  dan kecepatan awal 20 m/s. Tentukan energi total peluru di titik tertinggi!
5. Sebuah mesin mempunyai kekuatan 1.350 hp. Jika 1 hp = 746 watt dan efisiensi mesin adalah 87%, tentukan daya keluaran mesin dalam satuan watt!

# BAB

# 5

## IMPULS DAN MOMENTUM



Kali ini kita akan mempelajari impuls. Tahukah kamu apa itu impuls?

Impuls adalah hasil kali gaya dan selang waktu yang sangat singkat. Impuls juga dapat disebut sebagai perubahan momentum.

Momentum adalah hasil kali massa dan kecepatan.

Kita juga akan mempelajari hukum kekekalan momentum pada peristiwa tumbukan.

Momentum sebelum tumbukan bukan sama dengan momentum setelah tumbukan.

Jadi, setelah belajar bab ini kita dapat memahami impuls dan momentum dan dapat menyelesaikan masalah tumbukan.



Sumber: Dok. CAP

Gambar 5.1 Permainan sepak bola

Sepak bola merupakan olahraga yang sangat populer. Pernahkah kamu bermain sepak bola atau memerhatikan orang yang sedang bermain sepak bola? Dalam permainan sepak bola banyak terdapat prinsip-prinsip fisika, antara lain tumbukan. Ketika seorang pemain hendak memasukkan bola ke dalam gawang, dia harus menggerakkan bola tersebut dengan cara menendang atau menyundulnya. Pada peristiwa ini terjadi perubahan momentum dan impuls. Apa yang dimaksud dengan momentum dan impuls? Untuk mengetahuinya pelajailah materi-materi berikut.

**Kata kunci:** Momentum – Impuls – Hukum Kekekalan Momentum – Tumbukan – Koefisien Restitusi

## A. Momentum

Pada ilustrasi di atas, bola yang semula diam setelah ditendang akan bergerak. Bola bergerak karena bola memiliki momentum. Setiap benda yang bergerak dikatakan memiliki momentum. **Momentum** adalah hasil kali antara massa benda dengan kecepatan gerak benda tersebut. Semakin besar massa benda, semakin besar momentumnya. Demikian pula jika semakin cepat benda bergerak, semakin besar pula momentumnya.

## ■ Momentum

Momentum suatu benda yang bergerak dapat dirumuskan:

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v} \quad \dots (5.1)$$

**Keterangan:**

$\mathbf{p}$  : momentum (kg · m/s)

$m$  : massa benda (kg)

$\mathbf{v}$  : kecepatan benda (m/s)

Momentum merupakan besaran vektor yang mempunyai arah sama dengan arah kecepatan benda. Untuk memahami lebih lanjut tentang momentum, cobalah perhatikan contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Mobil dengan massa 800 kg bergerak dengan kelajuan 72 km/jam. Tentukan momentum mobil tersebut!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $m = 800$  kg

$$\mathbf{v} = 72 \text{ km/jam} = 20 \text{ m/s}$$

Ditanyakan:  $\mathbf{p} = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= m \cdot \mathbf{v} \\ &= 800 \cdot 20 \\ &= 16.000 \text{ kg}\cdot\text{m/s} \end{aligned}$$

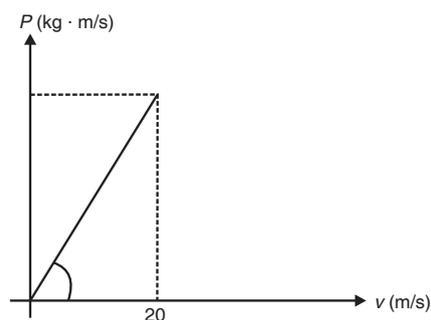


## Kerja Berpasangan 1

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

1. Sebuah bola 800 gram ditendang dengan gaya 200 N. Sesaat setelah ditendang, bola mempunyai kelajuan 144 km/jam. Tentukan momentum bola sesaat setelah ditendang!
2. Sebuah benda bergerak dipercepat dari keadaan diam. Hubungan antara momentum dengan kelajuan benda dapat dinyatakan dengan grafik di bawah ini:

Tentukan besar momentum saat  $v = 20$  m/s!



3. Sebuah mobil bergerak dipercepat dari keadaan diam dengan percepatan  $5 \text{ m/s}^2$ . Jika massa mobil  $1,5 \text{ ton}$ , tentukan momentum mobil setelah bergerak selama satu menit!
4. Sebuah bola pingpong bermassa  $20 \text{ gram}$  jatuh bebas dari ketinggian  $1,8 \text{ m}$ . Jika percepatan gravitasi di tempat tersebut adalah  $20 \text{ m/s}^2$ , tentukan momentum bola saat menumbuk lan-

## B. Impuls

tail!

Mari kita ingat kembali peristiwa bola yang ditendang oleh kaki pemain! Sebelum ditendang, bola tersebut dalam keadaan diam. Setelah ditendang, bola bergerak dengan kecepatan tertentu. Adanya perubahan kecepatan menunjukkan bahwa momentum bola juga berubah. Dengan demikian, momentum yang dimiliki suatu benda tidak selamanya sama. Dengan kata lain, momentum suatu benda dapat mengalami perubahan. Perubahan momentum terjadi karena adanya impuls. Impuls merupakan hasil kali antara gaya dengan waktu selama gaya tersebut bekerja pada benda. Besarnya impuls dapat ditentukan dengan menggunakan hukum II Newton, yaitu:

$$F = m \cdot a$$

Jika

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

maka

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$F dt = m \cdot dv$$

$$\int F dt = \int_{v_1}^{v_2} m dv$$

$$\int F dt = m \cdot (v_2 - v_1)$$

$$\int F dt = m \cdot v_2 - m \cdot v_1$$

$$Ft = m \cdot \Delta v$$

$$I = \Delta p$$

... (5.2)

**Keterangan:**

$F$  : gaya (N)

$m$  : massa (kg)

$a$  : percepatan ( $\text{m/s}^2$ )

$dt$  : selang waktu pemberian gaya (s)

$v_1$  : kecepatan awal (m/s)

$v_2$  : kecepatan akhir (m/s)

Agar lebih paham mengenai impuls, pelajailah contoh soal di bawah ini kemudian kerjakan latihan di bawahnya!

### Contoh Soal

Sebuah bola bermassa 800 gram ditendang dengan gaya 400 N. Jika kaki dan bola bersentuhan selama 0,5 sekon, tentukan impuls pada peristiwa tersebut!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $m = 0,8 \text{ kg}$

$$F = 400 \text{ N}$$

$$\Delta t = 0,5 \text{ s}$$

Ditanyakan:  $I = \dots ?$

Jawab:

$$I = F \cdot \Delta t$$

$$I = 400 \cdot 0,5$$

$$I = 200 \text{ N.s}$$



### Kerja Mandiri 1

*Kerjakan soal berikut dengan tepat!*

1. Seorang pemain voli memukul bola dengan impuls 500 N.s. Jika tangan dan bola bersentuhan selama 0,5 sekon, tentukan gaya yang diberikan pada bola!
2. Sebuah bola golf mula-mula dalam keadaan diam kemudian dipukul dengan gaya 250 N. Jika bola dengan tongkat pemukul bersentuhan selama 2 sekon, tentukan impuls yang diberikan pemukul pada bola!
3. Sigit menyodok bola dengan gaya 40 N. Jika impuls yang terjadi adalah 20 N.s, tentukan lama bola bersentuhan dengan tongkat penyodok!

## C. Hukum Kekekalan Momentum

Dalam peristiwa tumbukan seperti tumbukan bola dengan kaki pemain sepak bola, momentum dari masing-masing benda dapat mengalami perubahan. Bola yang semula diam dapat berubah kecepatannya. Sedangkan kaki yang semula bergerak dengan cepat setelah menendang bola, kecepatannya akan menurun. Akan tetapi, momentum total seluruh sistem adalah tetap. Peristiwa ini dikenal dengan hukum kekekalan momentum. **Hukum kekekalan momentum** menyatakan bahwa jika gaya luar yang bekerja pada suatu sistem adalah nol maka momentum linear total sistem tersebut akan tetap konstan. Dengan kata lain, momentum benda sebelum tumbukan sama dengan momentum benda setelah tumbukan.

**Hukum  
Kekekalan  
Momentum**

Secara matematis, hukum kekekalan momentum dapat dirumuskan:

$$p_1 + p_2 = p_1 + p_2$$

sebelum sesudah



Gambar 5.2 Benda sebelum tumbukan



Gambar 5.3 Selama tumbukan



Gambar 5.4 Setelah tumbukan

Dalam peristiwa tumbukan berlaku hukum III Newton, sehingga diperoleh:

$$\text{Aksi} = -\text{Reaksi}$$

$$\mathbf{F}_{AB} \cdot \Delta t = -\mathbf{F}_{BA} \cdot \Delta t$$

$$(m_B \cdot \mathbf{v}_B' - m_B \cdot \mathbf{v}_B) = -(m_A \cdot \mathbf{v}_A' - m_A \cdot \mathbf{v}_A)$$

$$m_A \cdot \mathbf{v}_A + m_B \cdot \mathbf{v}_B = m_A \cdot \mathbf{v}_A' + m_B \cdot \mathbf{v}_B' \quad (5.3)$$

Kamu akan lebih memahami teori di atas setelah mengerjakan latihan. Namun sebelumnya, pelajari contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Sebuah peluru bermassa 0,03 kg ditembakkan dengan kecepatan 600 m/s pada sepotong kayu yang digantung pada seutas tali. Jika ternyata peluru tersebut masuk ke dalam kayu dan massa kayu adalah 3,57 kg, hitung kecepatan kayu sesaat setelah peluru tersebut mengenainya!

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $m_p = 0,03 \text{ kg}$

$\mathbf{v}_p = 600 \text{ m/s}$

$m_k = 3,57 \text{ kg}$

$\mathbf{v}_k = 0 \text{ m/s}$

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

Jawab:

$$m_p \cdot \mathbf{v}_p + m_k \cdot \mathbf{v}_k = (m_p + m_k) \cdot \mathbf{v}'$$

$$0,03 \cdot 600 + 3,57 \cdot 0 = (0,03 + 3,57) \cdot \mathbf{v}'$$



## Kerja Berpasangan 2

$$18 = 3,6 \cdot v'$$

$$v' = 5 \text{ m/s}$$

Kerjakan bersama teman sebangkumu!

- Seorang anak naik papan luncur yang massanya 5 kg dengan kelajuan 5 m/s. Jika massa anak tersebut 25 kg, tentukan kecepatan papan luncur pada saat:
  - anak tersebut melompat ke depan dengan kelajuan 2 m/s,
  - anak tersebut melompat ke belakang dengan kelajuan 2 m/s,
  - anak tersebut melompat ke samping dengan kelajuan 2 m/s.
- Sebuah senapan bermassa 2 kg menembakkan peluru yang massanya 2 gram dengan kelajuan 400 m/s. Tentukan kecepatan peluru sesaat sebelum lepas dari senapan!
- Dua buah bola *A* dan *B* massanya masing-masing 0,2 kg dan 0,4 kg. Kedua bola bergerak berlawanan arah dan segaris kemudian bertumbukan. Sesaat setelah tumbukan, kelajuan bola *A* adalah 10 m/s berlawanan dengan arah semula. Jika kelajuan *A* dan *B* sebelum tumbukan masing-masing 80 m/s dan 12 m/s, tentukan laju dan arah bola *B* sesaat setelah tumbukan!
- Bola *A* bermassa 600 gram dalam keadaan diam, ditumbuk

## D. Macam-macam Tumbukan

oleh bola *B* bermassa 400 gram yang bergerak dengan laju 10 m/s. Setelah tumbukan, kelajuan bola *B* menjadi 5 m/s searah dengan arah bola semula. Tentukan kelajuan bola *A* sesaat setelah ditumbuk bola *B*!

Pada peristiwa tumbukan antara dua buah benda berlaku hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi. Dengan demikian, persamaan yang berlaku dalam peristiwa tumbukan adalah sebagai berikut.

Dari hukum kekekalan momentum diperoleh:

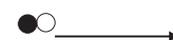
$$m_A \cdot v_A + m_B \cdot v_B = m_A \cdot v_A' + m_B \cdot v_B'$$

$$m_A \cdot (v_A - v_A') = -m_B \cdot (v_B - v_B') \quad \dots (5.4)$$

Dengan menggunakan hukum kekekalan energi didapatkan persamaan berikut.



Gambar 5.5 Sebelum tumbukan



Gambar 5.6 Selama tumbukan



Gambar 5.7 Sesudah tumbukan

$$\frac{1}{2} \cdot m_A \cdot v_A^2 + \frac{1}{2} \cdot m_B \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} m_A \cdot v_A'^2 + \frac{1}{2} m_B \cdot v_B'^2$$

$$m_A \cdot (v_A^2 - v_A'^2) = m_B \cdot (v_B^2 - v_B'^2) \quad \dots \dots$$

(5.5)

Jika persamaan (5.5) dibagi dengan persamaan (5.4) diperoleh:

$$\frac{m_A \cdot (v_A^2 - v_A'^2)}{m_A \cdot (v_A - v_A')} = \frac{-m_B \cdot (v_B^2 - v_B'^2)}{-m_B \cdot (v_B - v_B')}$$

$$v_A + v_A' = v_B + v_B'$$

$$v_A - v_B = -(v_A' - v_B')$$

$$e = \frac{-(v_A' - v_B')}{(v_A - v_B)} = 1$$

Persamaan di atas disebut persamaan restitusi ( $e$ ), yaitu bilangan yang menunjukkan perbandingan kecepatan benda sebelum dan sesudah tumbukan. Koefisien restitusi benda yang bertumbukan tidak selalu sama dengan 1. Pada suatu peristiwa tumbukan ada kalanya  $e$  bernilai 0 ( $e = 0$ ) atau antara 0 dan 1 ( $0 < e < 1$ ). Dengan demikian persamaan di atas menjadi:

$$e = \frac{(v_A' - v_B')}{(v_A - v_B)} \quad \dots \dots$$

(5.6)

**Keterangan:**

$e$  : koefisien restitusi, nilainya  $0 \leq e \leq 1$

Berdasarkan nilai koefisien restitusi ada 3 macam tumbukan.

## 1. Tumbukan Elastis Sempurna

**Tumbukan elastis sempurna** terjadi antara dua benda atau lebih yang energi kinetiknya setelah tumbukan tidak ada yang hilang dan momentum linear totalnya tetap. Contoh tumbukan elastis sempurna yaitu apabila dua bola di atas sebuah meja saling bertumbukan satu sama lain. Jumlah momentum bola sebelum bertumbukan sama dengan jumlah momentum bola setelah bertumbukan. Selain itu, jumlah energi kinetik bola sebelum tumbukan juga sama dengan jumlah energi kinetik bola setelah tumbukan.

Pada tumbukan elastis sempurna berlaku hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi kinetik. Nilai koefisien restitusi tumbukan elastis sempurna adalah 1 ( $e = 1$ ).

## 2. Tumbukan Tidak Elastis

**Tumbukan tidak elastis** terjadi antara dua benda atau lebih yang energi kinetiknya setelah tumbukan hilang karena berubah menjadi panas, bunyi, atau bentuk energi lainnya. Momentum benda sebelum dan sesudah tumbukan adalah konstan. Tumbukan tidak elastis terjadi jika partikel-partikel yang bertabrakan menempel bersama-sama setelah terjadi tumbukan.

Sebagai contoh tumbukan tidak elastis adalah dua buah mobil

**Tumbukan Elastis Sempurna**

**Tumbukan Tidak Elastis**

yang bertabrakan pada kecepatan tinggi. Energi yang berkaitan dengan energi kinetik kedua mobil diubah menjadi energi panas dan bunyi. Tabrakan yang menghancurkan dua buah mobil yang bertumbukan mempunyai momentum yang sama dengan jumlah momentum kedua mobil sebelum bertabrakan, dengan menganggap tidak ada gesekan dengan tanah. Kecepatan benda-benda sesudah tumbukan adalah sama. Pada tumbukan tidak elastis hanya berlaku hukum kekekalan momentum. Nilai koefisien restitusi tumbukan tidak elastis adalah 0 ( $e = 0$ ).

## Tumbukan Elastis Sebagian

### 3. Tumbukan Elastis Sebagian

Tumbukan elastis sebagian terjadi antara dua benda atau lebih yang sebagian energi kinetiknya hilang setelah terjadi tumbukan karena berubah menjadi panas, bunyi, atau bentuk energi lainnya. Momentum benda sebelum dan sesudah tumbukan adalah konstan. Tumbukan elastis sebagian terjadi jika partikel-partikel yang bertumbukan tidak menempel bersama-sama setelah terjadi tumbukan.

Pada tumbukan elastis sebagian, berlaku momentum kekal dan energi kinetik tidak kekal. Nilai koefisien restitusi tumbukan elastis sebagian adalah  $0 < e < 1$ .

Agar lebih memahami tumbukan, pelajari contoh soal berikut ini! Setelah itu, kerjakan latihan di bawahnya!

#### Contoh Soal

Bola A bermassa 40 gram bergerak dengan kelajuan 10 m/s menumbuk bola B dengan massa 60 gram yang bergerak searah dengan kelajuan 5 m/s. Tentukan kelajuan bola A dan B sesaat setelah tumbukan jika tumbukan yang terjadi adalah:

- tumbukan elastis sempurna,
- tumbukan elastis sebagian  $e = 0,5$ ,
- tumbukan tidak elastis.

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $m_A = 40$  gram  
 $v_A = 10$  m/s  
 $m_B = 60$  gram  
 $v_B = 5$  m/s

Ditanyakan: a)  $v_A'$  dan  $v_B'$  saat  $e = 1$ ,  
 b)  $v_A'$  dan  $v_B'$  saat  $e = 0,5$ ,  
 c)  $v_A'$  dan  $v_B'$  saat  $e = 0$ .

Jawab:

Dari hukum kekekalan momentum diperoleh:

$$\begin{aligned} 400 + 300 &= 40 \cdot v_A' + 60 \cdot v_B' \\ 700 &= 40 \cdot v_A' + 60 \cdot v_B' \\ 70 &= 4 \cdot v_A' + 6 \cdot v_B' \end{aligned} \quad \dots (1)$$

Dari rumus koefisien restitusi diperoleh:

$$e = \frac{v_B' - v_A'}{v_A - v_B}$$

$$e \cdot (v_A - v_B) = v_B' - v_A'$$

$$\begin{aligned} \text{a) } e \cdot (v_A - v_B) &= v_B' - v_A' \\ 1 \cdot (10 - 5) &= v_B' - v_A' \\ -v_A' + v_B' &= 5 \end{aligned}$$

... (2)

$$\text{Pers. 1 } 4 \cdot v_A' + 6 \cdot v_B' = 70$$

$$\text{Pers. 2 } -v_A' + v_B' = 5 \times 4$$

$$10 \cdot v_B' = 90$$

$$v_B' = 9 \text{ m/s}$$

Dari persamaan (2):

$$-v_A' + v_B' = 5$$

$$-v_A' + 9 = 5$$

$$-v_A' = 5 - 9$$

$$-v_A' = -4$$

$$v_A' = 4 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } e \cdot (v_A - v_B) &= v_B' - v_A' \\ 0,5 \cdot (10 - 5) &= v_B' - v_A' \\ 2,5 &= v_B' - v_A' \end{aligned}$$

... (3)

$$\text{Pers. 1 } 4 \cdot v_A' + 6 \cdot v_B' = 70$$

$$\text{Pers. 2 } -v_A' + v_B' = 2,5 \times 4$$

$$10 \cdot v_B' = 80$$

$$v_B' = 8 \text{ m/s}$$

Dari persamaan (3):

$$-v_A' + v_B' = 2,5$$

$$v_A' = v_B' - 2,5$$

$$v_A' = 8 - 2,5$$

$$v_A' = 5,5 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } e \cdot (v_A - v_B) &= v_B' - v_A' \\ 0 \cdot (10 - 5) &= v_B' - v_A' \\ v_B' - v_A' &= 0 \end{aligned}$$

... (4)

$$\text{Pers. 1 } 4 \cdot v_A' + 6 \cdot v_B' = 70$$

$$\text{Pers. 2 } -v_A' + v_B' = 0 \times 4$$

$$10 \cdot v_B' = 70$$

$$v_B' = 7 \text{ m/s}$$

Dari persamaan (4):



## Kerja Kelompok

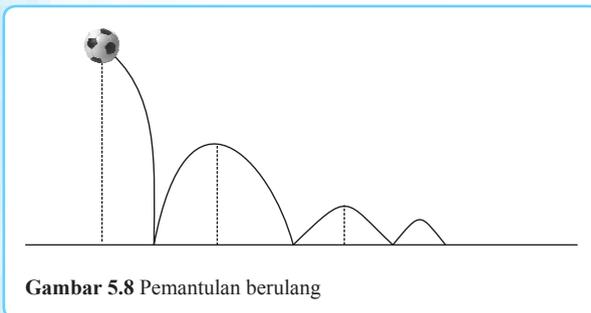
$$\begin{aligned}v_B' - v_A' &= 0 \\v_A' &= v_B' \\v_A' &= 7 \text{ m/s}\end{aligned}$$

*Kerjakan bersama kelompokmu!*

Dua buah bola *A* dan *B* massanya masing-masing 90 gram dan 50 gram. Kedua bola bergerak saling berlawanan dan segaris hingga akhirnya bertumbukan. Tentukan kelajuan bola *A* dan *B* sesaat setelah tumbukan jika tumbukan yang terjadi adalah:

## E. Koefisien Restitusi Benda Jatuh

- tumbukan elastis sempurna,
- tumbukan elastis sebagian dengan  $e = 0,4$ ,
- tumbukan tidak elastis.



Gambar 5.8 Pemantulan berulang

Sebuah bola dijatuhkan dari ketinggian  $h_1$  ke lantai. Setelah sampai di lantai, bola dipantulkan hingga mencapai ketinggian  $h_2$ , dengan  $h_2 < h_1$ . Pemantulan ini berlangsung berulang-ulang dengan ketinggian yang semakin berkurang. Perhatikan gambar 5.8!

Sebelum bola bertumbukan dengan lantai, bola mengalami gerak jatuh bebas, sehingga kecepatan bola sebelum tumbukan adalah  $v_A' = -\sqrt{2 \cdot g \cdot h_1}$ . Sesudah bola bertumbukan dengan lantai, bola bergerak vertikal ke atas menempuh ketinggian  $h_2$  dengan kecepatan awal sama dengan kecepatan sesudah tumbukan, yaitu  $v_A' = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2}$ , (tanda - menunjukkan arah berlawanan dengan  $v_A$ ). Karena lantai dalam keadaan diam maka kecepatan lantai sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama, yaitu  $v_B = v_B' = 0$ . Dari penjelasan ini dapat diketahui bahwa koefisien restitusi benda jatuh adalah:

$$e = -\frac{(v_A' - v_B')}{(v_A - v_B)}$$

**Koefisien Restitusi**

$$e = -\frac{-\sqrt{2 \cdot g \cdot h_2}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} - 0}$$

$$e = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_2}{2 \cdot g \cdot h_1}}$$

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

(5.7)

Dengan mengetahui koefisien restitusi suatu benda maka kita dapat meminimalkan kerusakan yang terjadi pada benda yang mengalami

tumbukan.

Contoh soal di bawah ini akan membantumu memahami koefisien restitusi benda jatuh. Setelah mempelajari contoh soal berikut, kerjakanlah pelatihan di bawahnya!

### Contoh Soal

Sebuah bola dijatuhkan ke lantai dari ketinggian 15 m. Koefisien restitusi antara bola dengan lantai adalah 0,75. Tentukan tinggi bola setelah pantulan ketiga!

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $h_1 = 15$  m

$e = 0,75$

Ditanyakan:  $h_4 = \dots ?$

Jawab:

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

$$e^2 = \frac{h_2}{h_1}$$

Ketinggian pantulan pertama adalah:

$$h_2 = e^2 \cdot h_1$$

$$h_2 = (0,75)^2 \cdot 15$$

$$h_2 = (0,5625) \cdot 15$$

$$h_2 = 8,4375 \text{ m}$$

Ketinggian pantulan kedua adalah:

$$h_3 = e^2 \cdot h_2$$

$$h_3 = 0,5625 \cdot 8,4375$$

$$h_3 = 4,7461 \text{ m}$$

Ketinggian pantulan ketiga adalah:



## Kerja Mandiri 2

$$h_4 = e^2 \cdot h_3$$

$$h_4 = 0,5625 \cdot 4,7461$$

$$h_4 = 2,6697 \text{ m}$$

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

- Sebuah bola jatuh bebas ke lantai dari ketinggian 3,6 m. Setelah menumbuk lantai bola dipantulkan ke atas dengan kelajuan 6 m/s. Jika massa bola 800 gram tentukan:
  - kelajuan bola sesaat setelah menyentuh lantai,
  - impuls pada bola,
  - gaya yang diberikan bola pada lantai, jika bola dan lantai bersentuhan selama 50 milisekon.



## Rangkuman

- Sebuah bola dijatuhkan dari ketinggian 10 m. Jika koefisien restitusi tumbukan antara bola dengan lantai adalah 0,9, hitunglah tinggi pantulan maksimal setelah bola itu membentur lantai sebanyak dua kali!
- Momentum adalah hasil kali antara massa benda dengan kecepatan gerak benda tersebut.

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$$

- Impuls adalah hasil kali antara gaya dengan waktu selama gaya tersebut bekerja pada benda.

$$\int \mathbf{F} dt = m \cdot \mathbf{v}_2 - m \cdot \mathbf{v}_1$$

$$\mathbf{F}t = m \cdot \Delta \mathbf{v}$$

- Impuls menyebabkan terjadinya perubahan momentum.

$$I = \Delta \mathbf{p}$$

- Hukum kekekalan momentum menyatakan bahwa momentum sebelum tumbukan sama dengan momentum sesudah tumbukan.

$$\mathbf{p}_{\text{sebelum tumbukan}} = \mathbf{p}_{\text{sesudah tumbukan}}$$

$$m_A \cdot \mathbf{v}_A + m_B \cdot \mathbf{v}_B = m_A \cdot \mathbf{v}_A' + m_B \cdot \mathbf{v}_B'$$

- Koefisien restitusi antara dua benda yang bertumbukan adalah sebagai berikut.

$$e = -\frac{(v_A' - v_B')}{(v_A - v_B)}$$

6. Menurut koefisien restitusi, tumbukan dibedakan menjadi 3, yaitu:
  - a) tumbukan elastis sempurna, dengan  $e = 1$ ,
  - b) tumbukan tidak elastis, dengan  $e = 0$ ,
  - c) tumbukan elastis sebagian, dengan  $0 < e < 1$ .
7. Koefisien restitusi benda jatuh adalah:



### Soal-soal Uji Kompetensi

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

#### A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Sebuah benda bermassa 4 kg dijatuhkan tanpa kecepatan awal dari ketinggian 62,5 m. Jika percepatan gravitasi bumi  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , momentum benda ketika menumbuk permukaan tanah adalah . . . .
  - a. 7,9 kg.m/s
  - b. 35 kg.m/s
  - c. 70 kg.m/s
  - d. 140 kg.m/s
  - e. 1225 kg.m/s
2. Sebuah bola dengan massa  $m$  dilemparkan mendatar dengan kelajuan  $v$ . Bola ini mengenai dinding dan dipantulkan dengan kelajuan yang sama. Besar impuls yang dikerjakan dinding pada bola adalah . . . .
  - a. 0
  - b.  $m \cdot v$
  - c.  $\frac{1}{2} m \cdot v$
  - d.  $2 m \cdot v$
  - e.  $\frac{m}{v}$
3. Sebuah balok 2 kg meluncur ke kanan dengan kecepatan 10 m/s sepanjang meja yang licin dan menumbuk sebuah balok lain bermassa 8 kg yang mula-mula diam. Bila arah ke kanan



diambil positif dan tumbukannya adalah elastis sempurna maka kecepatan masing-masing balok 2 kg dan 8 kg adalah . . . .

- a. 6 m/s dan 4 m/s
  - b. -6 m/s dan 4 m/s
  - c. 4 m/s dan 6 m/s
  - d. -4 m/s dan 6 m/s
  - e. -4 m/s dan 4 m/s
4. Sebuah balok dengan massa 2 kg dan kelajuan  $\frac{1}{2} \text{ m/s}$  bertumbukan dengan balok yang diam bermassa 6 kg. Kedua balok menempel sesudah tumbukan. Kelajuan kedua balok sesudah tumbukan adalah . . . .
    - a.  $\frac{1}{2} \text{ m/s}$
    - b.  $\frac{1}{3} \text{ m/s}$
    - c.  $\frac{1}{4} \text{ m/s}$
    - d.  $\frac{1}{6} \text{ m/s}$
    - e.  $\frac{1}{8} \text{ m/s}$
  5. Sebuah balok yang bermassa 1,5 kg terletak diam di atas bidang horizontal. Koefisien gesekan balok dengan bidang horizontal adalah 0,2. Selanjutnya peluru bermassa 10 gram 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 . . . .

- a. 152 m/s                      d. 250 m/s  
 b. 200 m/s                      e. 302 m/s  
 c. 212 m/s
6. Seorang anak melempar bola bermassa 250 gram dengan gaya 50 N. Jika bola bersentuhan dengan tangan selama 0,3 sekon maka besar impuls yang terjadi adalah . . . .
- a. 0,75 N.s                      d. 15 N.s  
 b. 0,075 N.s                      e. 1,5 N.s  
 c. 7,5 N.s
7. Sebuah bola jatuh dari ketinggian 7 m kemudian memantul sebanyak tiga kali. Tinggi pantulan pertama adalah 0,63 m. Koefisien restitusi antara benda dengan lantai adalah . . . .
- a. 0,9                              d. 0,03  
 b. 0,09                              e. 0,5  
 c. 0,3
8. Balok bermassa 750 gram didorong dengan gaya 100 N. Sesaat setelah didorong, balok mempunyai kecepatan 0,5 m/s. Momentum balok sesaat setelah didorong adalah . . . .
- a. 50 kg.m/s  
 b. 37,5 kg.m/s  
 c. 18,75 kg.m/s  
 d. 0,1825 kg.m/s  
 e. 0,1875 kg.m/s
9. Sebuah anak panah bermassa 0,3 kg melesat dengan kecepatan 5 m/s. Anak panah tersebut kemudian menancap pada balok kayu bermassa 4,5 kg yang digantung pada seutas tali. Kecepatan kayu sesaat setelah anak panah menancap adalah . . . .
- a. 1,5 m/s                      d. 3,125 m/s  
 b. 4,5 m/s                      e. 2 m/s  
 c. 0,3125 m/s
10. Sebuah benda dijatuhkan dari ketinggian 2 m. Kecepatan bola sesudah tumbukan adalah 3,5 m/s dan koefisien restitusi antara benda dengan lantai adalah 0,4. Kecepatan bola sesaat sebelum tumbukan adalah . . . .
- a. 7 m/s  
 b. 0,8 m/s  
 c. 1,75 m/s  
 d. 1,4 m/s  
 e. 8,75 m/s
- B. Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!**
1. Seorang pemain bisbol akan memukul bola yang datang padanya dengan kecepatan 10 m/s. Bola tersebut kemudian dipukul dan bersentuhan dengan pemukul dalam waktu 0,01 detik. Setelah dipukul bola berbalik arah dengan kecepatan 15 m/s. Jika massa bola adalah 2 kg, tentukan:
- a) besar momentum awal,  
 b) besar momentum akhir,  
 c) besar perubahan momentumnya,  
 d) besar impulsnya,  
 e) besar gaya yang diderita bola.
2. Perahu sekoci yang mempunyai massa 200 kg bergerak dengan kecepatan 2 m/s. Kadek yang bermassa 50 kg berada dalam perahu tersebut. Tibatiba Kadek meloncat dengan kecepatan 6 m/s. Hitunglah kecepatan sekoci sesaat setelah Kadek meloncat, jika:
- a) arah loncatan berlawanan dengan arah sekoci,  
 b) arah loncatan searah dengan arah perahu.
3. Sebuah benda jatuh ke atas tanah dari ketinggian 9 m. Ternyata benda tersebut terpantul setinggi 1 meter.

Hitunglah:

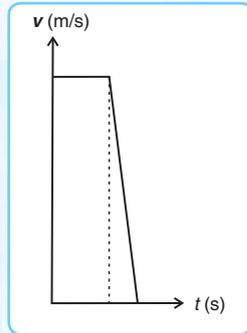
- a) koefisien elastisnya,
  - b) kecepatan pantulan benda,
  - c) tinggi pantulan ketiga.
4. Bola seberat 5 N bergerak dengan kelajuan 3 m/s. Bola itu menumbuk bola lain yang beratnya 10 N dan bergerak berlawanan arah dengan kecepatan 6 m/s. Hitunglah kelajuan masing-masing bola sesudah tumbukan, bila:
- a) koefisien restitusinya  $\frac{1}{3}$ ,
  - b) tumbukan tidak elastis sama sekali,
  - c) tumbukan elastis sempurna.
5. Dua buah benda *A* dan *B* yang masing-masing massanya 20 kg dan 40 kg bergerak segaris lurus saling mendekati. *A* bergerak dengan kecepatan 10 m/s dan *B* bergerak den-



## Soal-soal Akhir Semester 1

gan kecepatan 4 m/s. Kedua benda kemudian bertumbukan. Hitunglah energi kinetik yang hilang jika sifat tumbukan tidak elastis sama sekali!

### A. Pilihlah satu jawaban yang paling te-



pat!

- Sebuah sepeda motor bergerak pada kecepatan yang dilukiskan dengan grafik kecepatan terhadap waktu berikut ini:  
Besarnya perpindahan sepeda motor selama 15 sekon adalah . . . .  
a. 40 m  
b. 100 m  
c. 150 m  
d. 400 m  
e. 500 m
- Sebuah benda bergerak dengan persamaan kecepatan  $v = 2t + 5$ ,  $v$  dalam m/s dan  $t$  dalam sekon. Bila saat  $t = 0$  s benda berada pada  $x = 4$  m maka posisi benda saat  $t = 4$  s adalah . . . .  
a. 20 m  
b. 25 m  
c. 30 m  
d. 35 m  
e. 40 m
- Roda sepeda berputar pada porosnya dengan persamaan posisi sudut  $\theta = 3t + 2t^2$ ,  $\theta$  dalam radian dan  $t$  dalam sekon. Posisi sudut saat  $t = 2$  sekon adalah . . . .  
a. 3 rad  
b. 5 rad  
c. 12 rad  
d. 14 rad  
e. 18 rad
- Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan awal  $v_0$  dan sudut elevasi  $\alpha$ . Pada saat peluru mencapai tinggi maksimum maka . . . .  
a. tenaga kinetiknya maksimum  
b. tenaga potensialnya maksimum  
c. tenaga potensialnya minimum  
d. tenaga totalnya maksimum  
e. kecepatannya maksimum
- Jika percepatan gravitasi di permukaan planet  $5 \text{ m/s}^2$  maka percepatan gravitasi pada ketinggian satu kali jari-jari planet dari permukaan planet adalah . . . .  
a.  $1,25 \text{ m/s}^2$   
b.  $2,25 \text{ m/s}^2$   
c.  $4,25 \text{ m/s}^2$   
d.  $5 \text{ m/s}^2$   
e.  $6,25 \text{ m/s}^2$
- Jika suatu benda di bumi memiliki berat 180 N maka berat benda di bulan yang memiliki gravitasi  $\frac{1}{9}$  kali gravitasi bumi adalah . . . .  
a. 1.620 N  
b. 180 N  
c. 90 N  
d. 20 N  
e. 9 N
- Planet A memiliki massa 5 kali massa bumi. Bila jari-jari bumi  $\frac{1}{3}$  kali jari-jari planet A maka berat benda di planet A . . . kali berat benda di bumi.  
a. 45  
b. 15  
c.  $\frac{5}{3}$   
d.  $\frac{3}{5}$

- e.  $\frac{5}{9}$
8. Sebuah satelit mempunyai jarak  $3 \cdot 10^6$  m dari pusat bumi. Jika massa bumi  $5,98 \cdot 10^{24}$  kg dan tetapan  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup> maka kelajuan satelit adalah . . . .
- $11,5 \cdot 10^3$  m/s
  - $11,5 \cdot 10^4$  m/s
  - $11,5 \cdot 10^5$  m/s
  - $11,5 \cdot 10^{-5}$  m/s
  - $11,5 \cdot 10^{-4}$  m/s
9. Seutas kawat sepanjang 10 m digunakan untuk menahan beban 20 kg. Jika luas penampang kawat 4 mm<sup>2</sup> dan  $g = 10$  m/s<sup>2</sup> maka tegangan kawat . . . .
- $3 \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup>
  - $4 \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup>
  - $5 \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup>
  - $6 \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup>
  - $7 \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup>
10. Sebuah pegas yang diberi beban 100 gram mempunyai konstanta pegas 1.000 N/m. Saat pegas diberi simpangan maksimum 10 cm kemudian dilepaskan hingga bergetar harmonik, kelajuan maksimum dari getaran pegas adalah . . . .
- 10 m/s
  - 5 m/s
  - 2 m/s
  - 1 m/s
  - 0,1 m/s
11. 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 sehingga beban bergetar harmonik. Jika  $g = 10$  m/s<sup>2</sup> maka frekuensi getaran adalah . . . .
- 0,5 Hz
  - 1,6 Hz
  - 5,0 Hz
  - 18,8 Hz
  - 62,8 Hz
12. Kecepatan sebuah benda yang bergerak selaras sederhana adalah . . . .
- terbesar pada simpangan terbesar
  - berbanding terbalik dengan periodenya
  - terbesar pada simpangan terkecil
  - tidak tergantung pada frekuensi getaran
  - tidak tergantung simpangannya
13. Sebuah balok bermassa 3 kg didorong ke atas bidang miring kasar. Gaya dorong pada balok 24 N ke atas sejajar bidang miring dengan kemiringan 37°. Jika gaya gesek balok dan bidang miring 3 N, balok berpindah sejauh 2 m. Usaha total pada balok adalah . . . .
- 32,3 joule
  - 33,2 joule
  - 31,3 joule
  - 33,1 joule
  - 33 joule
14. Sebuah mesin dapat menurunkan benda bermassa 10 kg dari ketinggian 4 m ke permukaan tanah dalam waktu 2 sekon. Daya mesin tersebut adalah . . . .
- 125 watt
  - 200 watt
  - 250 watt
  - 275 watt
  - 300 watt
15. Sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian 125 m. Jika energi potensial awalnya 2.500 joule maka:
- massa benda 2,5 kg
  - benda sampai di tanah setelah 6,25 sekon
  - kecepatan saat mencapai tanah adalah 50 m/s
  - tepat saat menyentuh tanah energi kinetiknya 1.250 joule
- Dari pernyataan di atas yang benar

- adalah . . . .
- (1), (2), dan (3)
  - (1) dan (3)
  - (2) dan (4)
  - (4) saja
  - semua benar
16. Saat sebuah benda mengalami gerak jatuh bebas dari ketinggian  $h$  maka berlaku:
- di titik tertinggi energi kinetiknya maksimum
  - di titik tertinggi energi kinetiknya minimum
  - di titik terendah energi potensialnya maksimum
  - di titik terendah energi potensialnya minimum
- Dari pernyataan di atas yang benar adalah . . . .
- (1), (2), dan (3)
  - (1) dan (3)
  - (2) dan (4)
  - (4) saja
  - semua benar
17. Di antara benda bergerak berikut ini, yang akan mengalami gaya terbesar bila menumbuk tembok sehingga berhenti dalam selang waktu yang sama adalah . . . .
- benda bermassa 40 kg dengan laju 25 m/s
  - benda bermassa 50 kg dengan laju 15 m/s
  - benda bermassa 100 kg dengan laju 10 m/s
  - benda bermassa 150 kg dengan laju 7 m/s
  - benda bermassa 200 kg dengan laju 5 m/s
18. Sebuah senapan mesin menembakkan peluru bermassa 50 gram dengan laju 1.000 m/s. Surya memegang senapan itu dengan tangannya dan ia hanya dapat memberikan gaya 180 N untuk menahan senapan. Jumlah maksimum peluru yang dapat ditembakkannya tiap menit adalah . . . .
- 136
  - 140
  - 176
  - 210
  - 216
19. Sebuah mobil melaju dengan kecepatan 25 m/s. Mobil tersebut mengalami momentum 24.000 kg.m/s. Jika massa pengemudi  $\frac{1}{16}$  massa total maka massa mobil adalah . . . .
- 900 kg
  - 960 kg
  - 60 kg
  - 96 kg
  - 90 kg
20. Sebuah benda jatuh dari ketinggian 6 m. Setelah sampai di tanah bola dipantulkan kembali ke atas. Jika tinggi pantulan pertamanya 0,96 m maka koefisien restitusi antara benda dengan tanah adalah . . . .
- 0,2
  - 0,3
  - 0,4
  - 0,5
  - 0,6
21. Sebuah mobil mainan bergerak dengan persamaan kecepatan  $v = 3t^2 - 6t - 9$ ,  $v$  dalam m/s dan  $t$  dalam sekon. Jarak yang ditempuh mobil mainan antara  $t = 1$  s hingga  $t = 4$  s adalah . . . .
- 10 m
  - 20 m
  - 23 m
  - 45 m
  - 18 m
22. Sebuah mobil massanya 2 ton dan mula-mula diam. Setelah 5 detik kecepatan mobil menjadi 20 m/s. Gaya dorong yang bekerja pada mobil ialah . . . .
- 100 N

- b. 200 N  
c. 400 N  
d. 800 N  
e. 8.000 N
23. Suatu beban 100 gram digantungkan pada sebuah pegas. Jika pegas bertambah panjang 0,5 cm maka konstanta pegas adalah . . . .
- a. 100 N/m  
b. 150 N/m  
c. 200 N/m  
d. 500 N/m  
e. 1.000 N/m
24. Usaha untuk memindahkan balok bermassa 0,25 kg dari ketinggian 1 m ke ketinggian 6 m adalah . . . .
- a. - 12,5 joule  
b. - 8,25 joule  
c. - 6 joule  
d. 8,25 joule  
e. 12,25 joule
25. Dua buah bola *A* dan *B* massanya sama. Bola *A* bergerak dengan kecepatan 5 m/s ke arah timur, menumbuk bola *B* yang dalam keadaan diam. Jika tumbukan lenting sempurna, kecepatan bola *A* dan *B* masing-masing sesudah tumbukan adalah . . . .
- a. 0 m/s dan 5 m/s  
b. 2,5 m/s dan 5 m/s  
c. 3,5 m/s dan 5 m/s  
d. 4,5 m/s dan 5 m/s  
e. 5 m/s dan 5 m/s

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

1. Titik *N* pada saat  $t = 0$  s berada pada posisi (2,1) m dan saat  $t = 4$  s pada posisi (5,5) m. Tentukan:
- a. vektor perpindahannya,  
b. komponen vektor perpindahan pada sumbu *X*,  
c. komponen vektor perpindahan pada sumbu *Y*,  
d. besar perpindahannya,  
e. arah perpindahannya.
2. Jika medan gravitasi di bulan  $1 \text{ m/s}^2$ ,

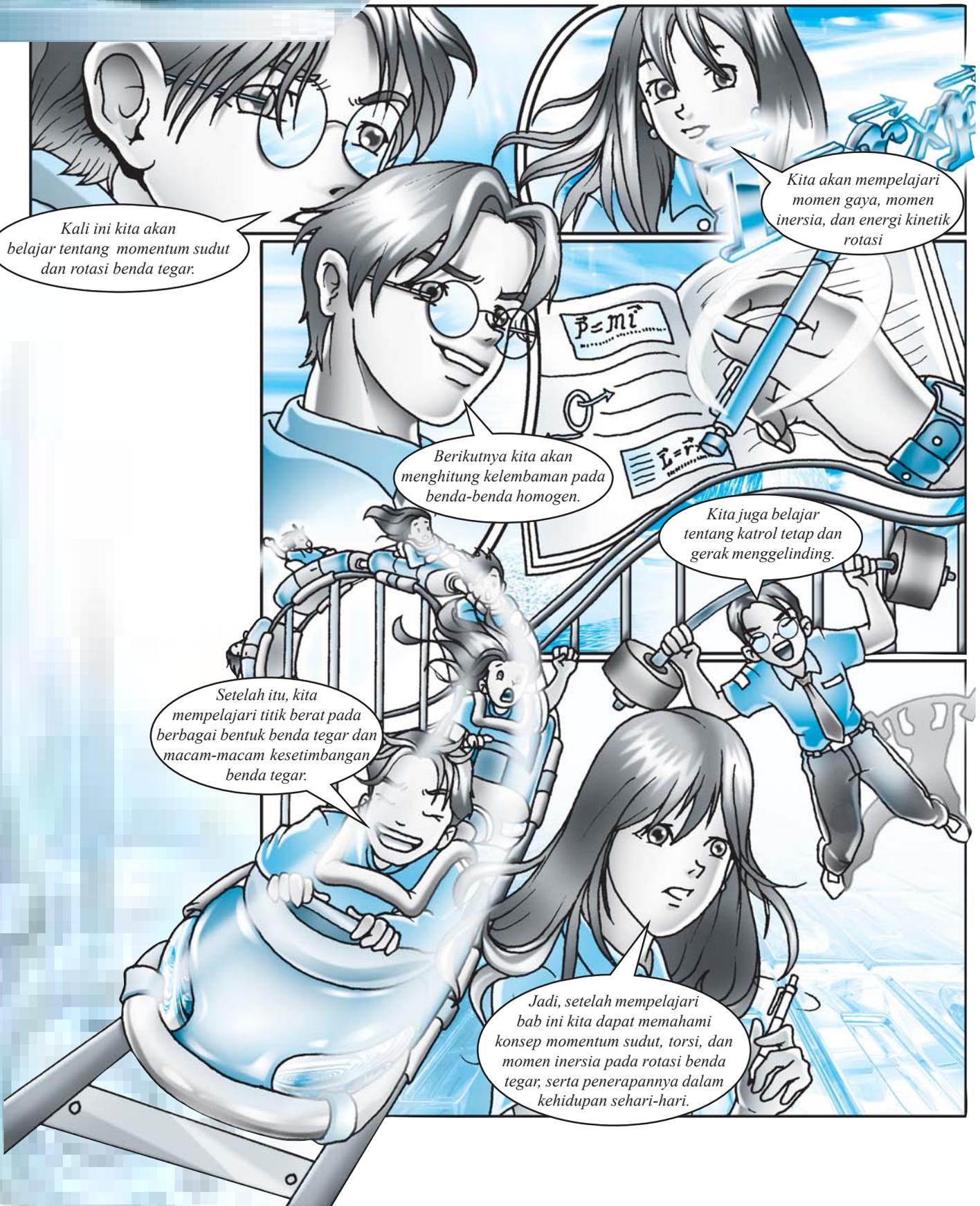
tentukan medan gravitasi pada jarak satu kali jari-jari bulan dari permukaan bulan!

3. Empat buah benda identik bermassa 5 kg berada di ujung-ujung bujur sangkar yang bersisi 0,25 m. Jika tetapan gravitasi universal adalah *G*, tentukan medan gravitasi di pusat bujur sangkar!
4. Suatu benda melakukan gerak harmonik sederhana. Saat simpangannya 10 cm di atas titik setimbang, kecepatannya  $\frac{1}{2}$  kali kecepatan maksimumnya. Jika arah gerak ke bawah dengan percepatan maksimum  $8.000\pi^2\sqrt{3} \text{ cm/s}^2$ , hitunglah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai simpangan tersebut!
5. Tentukan besar usaha yang diperlukan, jika balok bermassa 10 kg di atas lantai licin ditarik dengan gaya 20 N membentuk sudut  $63^\circ$  terhadap horizontal, sehingga balok berpindah sejauh 5 m!
6. Sebuah mesin mempunyai kekuatan 1.800 hp. Jika  $1 \text{ hp} = 746 \text{ watt}$  dan efisiensi mesin 65 %, tentukan daya keluaran mesin dalam satuan watt!
7. Dua buah benda massanya 5 kg dan 12 kg bergerak dengan kecepatan masing-masing 12 m/s dan 5 m/s dan berlawanan arah. Jika tumbukan yang terjadi bersifat sentral, hitunglah :
- a. kecepatan masing-masing benda dan hilangnya energi jika tumbukannya elastis sempurna,  
b. kecepatan masing-masing benda dan energi yang hilang jika tumbukannya tidak elastis sama sekali.
8. Sebuah bola dijatuhkan dari ketinggian 1,5 m di atas sebuah lantai lalu memantul setinggi 0,9 m. Hitunglah koefisien restitusi antara bola dan lantai!
9. Vektor posisi *A* dinyatakan dalam  $r = \ell \mathbf{i} - 3 \mathbf{j}$ . Tentukan vektor perpindahan

# BAB

# 6

## MOMENTUM SUDUT DAN ROTASI BENDA TEGAR





**Gambar 6.1** Ketika pemain *ice skating* melakukan putaran, ia memiliki momentum sudut

Pernahkah kamu melihat seorang pemain *ice skating* yang sedang beraksi? Coba kamu perhatikan gambar di atas! Pada gambar di atas, tampak seorang pemain *ice skating* yang sedang berputar. Saat ia mulai berputar, ia merentangkan kedua tangannya. Setelah itu, perlahan-lahan ia menekuk tangannya ke arah tubuhnya. Ketika ia melakukan gerakan ini, ia akan berputar semakin cepat. Mengapa demikian? Perubahan kecepatan yang terjadi pada pemain tersebut berhubungan dengan perubahan momentum sudut dan gerakan tangannya.

Untuk mengetahui lebih lanjut tentang momentum sudut, pelajailah materi-materi berikut. Karena pada bab ini akan dibahas tentang rotasi benda tegar beserta besaran-besaran dalam dinamika rotasi seperti momentum sudut, momen gaya, momen inersia, hukum kekekalan momentum sudut, dan sebagainya.

**Kata Kunci:** Momen Gaya – Momen Inersia – Kelembaman Benda-benda Homogen – Titik Berat – Macam-macam Kestimbangan

## A. Momen Gaya

Momen gaya merupakan salah satu bentuk usaha dengan salah satu titik sebagai titik acuan. Misalnya anak yang bermain jungkat-jungkit, dengan titik acuan adalah poros jungkat-jungkit.

**Momen gaya** adalah hasil kali gaya dan jarak terpendek arah garis kerja terhadap titik tumpu. Momen gaya sering disebut dengan momen putar atau torsi, diberi lambang  $\tau$  (dibaca: tau).

**Momen Gaya**

$$\tau = F \cdot d \quad \dots (6.1)$$

Satuan dari momen gaya atau torsi ini adalah  $N \cdot m$  yang setara dengan joule.

Momen gaya merupakan penyebab gerak rotasi. Momen gaya yang menyebabkan putaran benda searah putaran jarum jam disebut momen gaya positif. Adapun momen gaya yang menyebabkan putaran benda berlawanan arah dengan putaran jarum jam disebut momen gaya negatif.

Guna memahami momen gaya secara lebih detail, perhatikan sketsa jungkat-jungkit pada gambar 6.2 di samping!

Ketika batang  $AB$  diberi gaya pada ujung-ujungnya yaitu  $F_1$  dan  $F_2$  maka batang akan berotasi. Besar momen gaya yang bekerja pada batang bergantung pada besar gaya yang diberikan dan panjang lengan momen. Semakin besar gaya yang diberikan, semakin besar momennya.

Demikian juga jika lengan momen semakin besar maka semakin besar pula momen gayanya. Lengan momen adalah jarak tegak lurus sumbu rotasi ke arah gayanya.

Pada contoh gambar di atas panjang lengan momen gaya adalah  $OB$  dan  $OA$ . Jika titik  $O$  sebagai titik poros atau titik acuan maka momen gaya yang disebabkan oleh gaya  $F_1$  dan  $F_2$  adalah sebagai berikut:

Momen gaya yang disebabkan oleh gaya  $F_1$  :  $\tau_1$  (tau) =  $+ F_1 \cdot d_1$

Momen gaya yang disebabkan oleh gaya  $F_2$  :  $\tau_2$  =  $-F_2 \cdot d_2$

Pada sistem kesetimbangan resultan momen gaya selalu bernilai nol, sehingga dirumuskan:

$$\Sigma \tau = 0$$

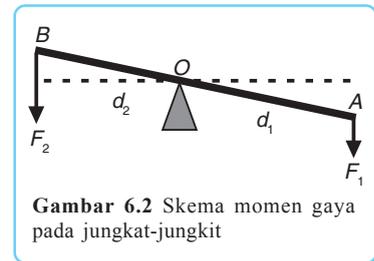
Pada permainan jungkat-jungkit saat kondisi setimbang dicapai yaitu saat batang mendatar terhadap bidang datar, dapat diterapkan resultan momen gaya = nol. Dengan demikian, resultan momen gaya yang bekerja dirumuskan:

$$\begin{aligned} \Sigma \tau &= 0 \\ -F_2 \cdot d_2 + F_1 \cdot d_1 &= 0 \\ F_1 \cdot d_1 &= F_2 \cdot d_2 \end{aligned} \quad \dots (6.2)$$

Pada mekanika dinamika untuk translasi dan rotasi banyak kesamaan-kesamaan besaran yang dapat dibandingkan simbol besarnya. Adapun analogi gerak translasi dan gerak rotasi, termasuk hukum II Newton ditunjukkan dalam tabel berikut.

**Tabel 6.1 Analogi antara Besaran Translasi dengan Besaran Rotasi**

Konsep	Translasi	Rotasi	Catatan
Posisi	$s$	$\theta$	$s = r\theta$
Kecepatan	$v = \frac{ds}{dt}$	$\omega =$	$v = r\omega$
Percepatan	$a =$	$\alpha =$	$a = r\alpha$
Gaya resultan, momen kesetimbangan	$F$ $F = 0$	$\tau$ $\tau = 0$	$\tau = F$



**Gambar 6.2** Skema momen gaya pada jungkat-jungkit

Konsep	Translasi	Rotasi	Catatan
Percepatan konstan	$v = v_0 + at$ $s = v_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$ $v^2 = v_0^2 + 2as$	$\omega = \omega_0 + \alpha t$ $\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$ $\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha$	
Massa, momen kelembaman	$m$	$I$	$I = \sum m_i r_i^2$
Hukum II Newton	$F = ma$	$\tau = I\alpha$	
Usaha	$W = \int F ds$	$W = \int \tau d\theta$	
Daya	$P = Fv$	$P = \tau \omega$	
Energi potensial	$E_p = mgy$		
Energi kinetik	$E_k = \frac{1}{2} mv^2$	$E_k = \frac{1}{2} I\omega^2$	
Impuls	$I = \int F dt$	$I = \int \tau dt$	
Momentum	$p = m \cdot v$	$L = I\omega$	

## B. Momen Inersia Rotasi Benda Tegar

Benda tegar adalah benda padat yang tidak berubah bentuk apabila dikenai gaya luar. Dalam dinamika, jika suatu benda tegar berotasi maka semua partikel di dalam benda tegar tersebut memiliki percepatan sudut  $\alpha$  yang sama. Momen gaya atau gaya resultan gerak rotasi  $\tau$  didefinisikan sebagai berikut.

Apabila sebuah benda tegar diputar terhadap suatu sumbu tetap maka resultan gaya putar (*torque*, baca torsi) luar terhadap sumbu itu sama dengan hasil kali momen inersia benda terhadap sumbu dengan percepatan sudut. Resultan gaya putar dirumuskan sebagai berikut.

$$\tau = \sum F_i R_i \sin \theta_i \quad \text{atau} \quad \tau = (\sum m_i R_i^2) \cdot \alpha \quad \dots (6.3)$$

$\sum m_i R_i^2$  disebut momen inersia atau momen kelembaman benda terhadap sumbu putar, yaitu penjumlahan hasil kali massa tiap partikel dalam suatu benda tegar dengan kuadrat jaraknya dari sumbu. Momen inersia dirumuskan sebagai berikut.

$$I = \sum m_i \cdot R_i^2 \quad \dots (6.4)$$

Definisi lain dari momen inersia adalah perbandingan gaya resultan (momen) terhadap percepatan sudut. Dengan demikian, momen inersia dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$I =$$

$$\tau = I \cdot \alpha$$

Karena percepatan sudut  $\alpha$  merupakan turunan kecepatan sudut terhadap waktu mulai:

$$\tau = I$$

Dari persamaan-persamaan di atas kita tahu bahwa:  $\tau = \Sigma F \cdot R$  dan  $\tau = I \cdot \alpha$ , dengan demikian:

$$\Sigma F \cdot R = I \cdot \alpha \quad \dots (6.5)$$

Percepatan tangensial merupakan percepatan linear  $a$ , yaitu percepatan singgung tepi roda,

$$a = \alpha \cdot R$$

$$\alpha = \dots (6.6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 6.6 ke dalam persamaan 6.5 akan memperoleh:

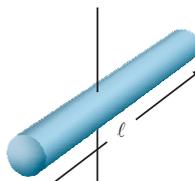
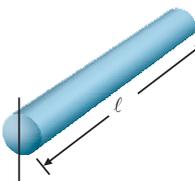
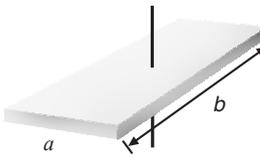
$$\Sigma F \cdot R = I \cdot \dots (6.7)$$

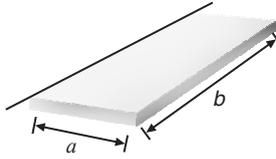
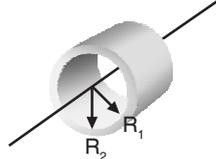
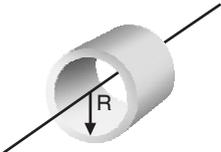
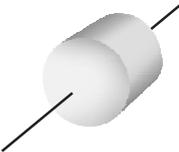
**Momen inersia** dinyatakan sebagai hasil kali satuan massa dan kuadrat satuan jarak. Untuk menghitungnya harus diperhatikan bentuk geometri dari benda tegar homogen.

### Momen Inersia

Tabel di bawah ini menunjukkan momen inersia beberapa benda homogen.

**Tabel 6.2 Momen Inersia Berbagai Benda yang Umum Dikenal**

No	Nama Benda	Letak Sumbu	Gambar	Momen Inersia
1.	Batang silinder	Pusat		$I = \frac{1}{2} M l^2$
2.	Batang silinder	Ujung		$I = \frac{1}{3} M l^2$
3.	Pelat segiempat	Pusat		$I = \frac{1}{12} M (a^2 + b^2)$

4.	Pelat segiempat	Tepi pusat		$I = Ma^2$
5.	Silinder berongga	Pusat		$I = M(R_1^2 + R_2^2)$
6.	Silinder tipis berongga	Pusat		$I = MR^2$
7.	Cincin tipis	Diameter pusat		$I = M(R^2 + w^2)$
8.	Silinder pejal	Pusat		$I = MR^2$
9.	Silinder pejal	Diameter pusat		$I = MR^2 + Ml^2$
10.	Bola pejal	Pusat		$I = MR^2$
11.	Bola berongga	Pusat		$I = mR^2$

Untuk lebih jelasnya, simaklah contoh soal berikut ini! Kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

### Contoh Soal

Empat buah partikel seperti ditunjukkan pada gambar dihubungkan oleh sebuah batang kaku ringan yang massanya dapat diabaikan. Tentukan momen inersia sistem partikel terhadap poros:

- sumbu  $A$ ,
- sumbu  $B$ .

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $m_1 = 1 \text{ kg}$   
 $m_2 = 2 \text{ kg}$   
 $m_3 = 1 \text{ kg}$   
 $m_4 = 3 \text{ kg}$

Ditanyakan: a.  $I_A = \dots?$   
 b.  $I_B = \dots?$

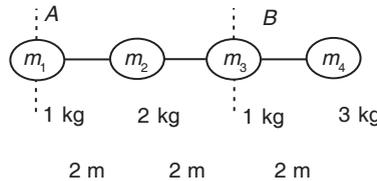
Jawab:

$$\begin{aligned} \text{a. } I_A &= \sum m_i \cdot R_i^2 \\ &= m_1 R_1^2 + m_2 \cdot R_2^2 + m_3 R_3^2 + m_4 R_4^2 \\ &= 1 \cdot 0^2 + 2 \cdot 2^2 + 1 \cdot 4^2 + 3 \cdot 6^2 \\ &= 0 + 8 + 16 + 108 \end{aligned}$$

$$I_A = 132 \text{ kg m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{b. } I_B &= \sum m_i R_i^2 \\ &= m_1 R_1^2 + m_2 R_2^2 + m_3 R_3^2 + m_4 R_4^2 \\ &= 1 \cdot 4^2 + 2 \cdot 2^2 + 1 \cdot 0^2 + 3 \cdot 2^2 \\ &= 16 + 8 + 0 + 12 \end{aligned}$$

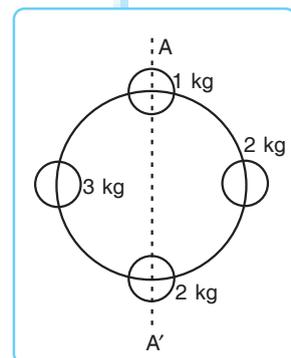
$$I_B = 36 \text{ kg m}^2$$



### Kerja Mandiri 1

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

- Empat buah partikel massanya 1 kg, 2 kg, 2 kg, dan 3 kg seperti ditunjukkan pada gambar, dihubungkan oleh rangka melingkar ringan jari-jari 2 meter yang massanya dapat diabaikan.
  - Tentukan momen inersia sistem terhadap poros melalui pusat lingkaran dan tegak lurus pada bidang kertas!
  - Berapa besar momen gaya yang harus dikerjakan pada sistem untuk memberikan suatu percepatan  $\alpha$  terhadap poros tersebut? ( $\alpha = 4 \text{ rad/s}^2$ )



2. Sebuah sistem yang terdiri atas dua bola dengan massa masing-masing 5 kg dihubungkan oleh sebuah batang kaku yang panjangnya 1 m. Bola dapat diperlakukan sebagai partikel dan massa batang 2 kg. Tentukan momen inersia sistem terhadap sumbu yang tegak lurus batang dan melalui:
- pusat O,
  - salah satu bola.

### C. Persamaan Lain Gerak Rotasi Benda Tegar

Setiap benda berotasi pasti memiliki momentum sudut. Dengan cara yang hampir sama pada gerak translasi, momentum sudut benda yang berotasi akan memiliki nilai yang sebanding dengan momen inersia dan kecepatan sudutnya. Dalam dinamika rotasi, jika suatu benda berotasi terhadap sumbu inersia utamanya maka momentum sudut total  $L$  sejajar dengan kecepatan sudut  $\omega$  dan selalu searah sumbu rotasi. Momentum sudut ( $L$ ) adalah hasil kali momen kelembaman  $I$  dan kecepatan sudut  $\omega$ . Momentum sudut dapat dirumuskan sebagai berikut.

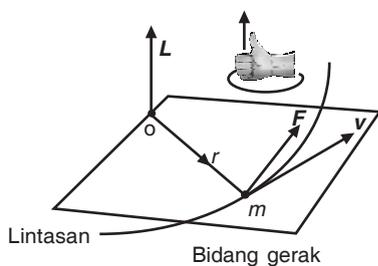
$$L = I \cdot \omega \quad \dots (6.8)$$

Bagaimana persamaan tersebut diperoleh? Perhatikan gambar 6.3 di bawah! Momentum sudut terhadap titik O dari sebuah partikel dengan massa  $m$  yang bergerak dengan kecepatan  $v$  (memiliki momentum  $P = mv$ ) didefinisikan dengan perkalian vektor berikut.

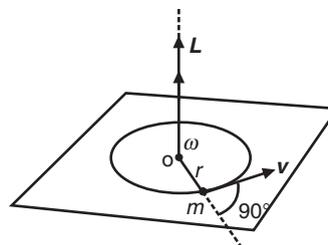
$$L = R \times P$$

$$L = R \times mv$$

$$L = mR \times v$$



**Gambar 6.3** Hubungan vektor antara kecepatan sudut dengan momentum sudut pada gerak melingkar



**Gambar 6.4** Momentum sudut sebuah partikel

Jadi, momentum sudut adalah suatu vektor yang tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk oleh  $\mathbf{R}$  dan  $\mathbf{v}$ . Dalam gerak melingkar dengan  $O$  sebagai pusat lingkaran, vektor  $\mathbf{R}$  dan  $\mathbf{v}$  saling tegak lurus, sehingga:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \omega \mathbf{R} \\ \mathbf{L} &= m \mathbf{R} \mathbf{v} \\ \mathbf{L} &= m \mathbf{R} \omega \mathbf{R} \\ \mathbf{L} &= m \mathbf{R}^2 \omega \end{aligned} \quad \dots (6.9)$$

Jika arah  $\mathbf{L}$  dan  $\omega$  adalah sama maka:

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= m \mathbf{R}^2 \omega \\ \text{atau} \quad \mathbf{L} &= I \omega \end{aligned}$$

Dari persamaan sebelumnya kita tahu bahwa:

$$\omega =$$

Dengan demikian, persamaan 6.9 menjadi:

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= m \mathbf{R}^2 \\ \mathbf{L} &= I \end{aligned}$$

Momentum sudut sebuah partikel relatif terhadap titik tertentu, sehingga momentum sudut termasuk besaran vektor. Secara vektor, momentum sudut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\mathbf{L} = \mathbf{R} \times \mathbf{P} = m (\mathbf{R} \times \mathbf{v}) \quad \dots (6.10)$$

Jika persamaan 6.10 diturunkan terhadap waktu menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{L}}{dt} &= (\mathbf{v} \times m\mathbf{v}) + (\mathbf{R} \times \mathbf{F}) \\ &= 0 + (\mathbf{R} \times \mathbf{F}) \\ &= \mathbf{R} \times \mathbf{F} \end{aligned}$$

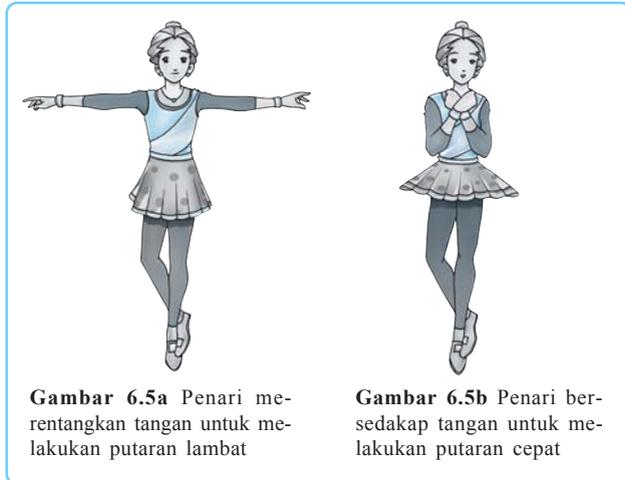
Sebelumnya telah disebutkan bahwa:  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{F} \times \mathbf{R}$ , sehingga

$$\boldsymbol{\tau} = \dots (6.11)$$

Suatu sistem mula-mula mempunyai momentum sudut total  $\Sigma L$  dan momentum sudut total akhir  $\Sigma L'$ . Setelah beberapa waktu, pada sistem tersebut berlaku hukum kekekalan momentum sudut. Peristiwa yang melibatkan momentum sudut misalnya adalah pada penari balet yang melakukan gerakan memutar. Perhatikan gambar 6.5a dan 6.5b!

Seorang penari berputar dengan tangan terentang. Saat penari tersebut menarik tangannya lebih dekat ke tubuh, dia berputar lebih cepat tanpa menggunakan energi tambahan. Semakin tangannya mendekati tubuh, penari berputar semakin cepat.

Momentum sudut total yang bekerja pada penari yang berotasi tetap akan memiliki konstanta tetap jika torsi total yang bekerja pada penari sama dengan nol. Secara matematis momentum sudut dinyatakan:



$$\begin{aligned} \text{momentum sudut awal} &= \text{momentum sudut total akhir} \\ \Sigma L &= \Sigma L' \\ L_1 + L_2 &= L_1' + L_2' \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan di atas maka hukum kekekalan momentum sudut dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Sigma L &= \Sigma L' \\ L_1 + L_2 &= L_1' + L_2' \\ I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 &= I_1' \omega_1' + I_2' \omega_2' \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2}$$

### D. Energi Kinetik Rotasi

Pada saat sebuah benda melakukan gerak rotasi maka energi gerak atau energi rotasinya sama dengan energi kinetik atau energi gerak. Jika sebuah benda dianggap mewakili beberapa buah partikel maka energi kinetik rotasi dapat dipahami dengan pendekatan berikut ini.

Sebuah sistem benda dapat dianggap hanya terdiri atas dua partikel yang massanya  $m_1$  dan  $m_2$ . Sistem tersebut bergerak rotasi dengan kecepatan tangensial  $v_1$  dan  $v_2$ , sehingga energi kinetik partikel pertama

adalah  $m_1 v_1^2$  dan energi kinetik partikel kedua adalah  $m_2 v_2^2$ . Oleh

karena itu, energi kinetik sistem dua partikel tersebut adalah:

$$E_k = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2$$

Secara umum energi kinetik dalam sistem benda tegar dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$E_k = \sum m_i v_i^2$$

Apabila terdapat benda tegar yang berotasi terhadap sebuah sumbu dengan kecepatan angular  $\omega$  maka kecepatan tiap partikelnya adalah  $v_i = \omega \cdot R_i$ . ( $R_i$  adalah jarak partikel ke sumbu rotasi)

Jadi  $E_k = \sum m_i v_i^2$

$$E_k = \sum m_i R_i^2 \omega^2$$

$$E_k = (\sum m_i R_i^2) \omega^2$$

$$E_k = I \cdot \omega^2$$

karena  $L = I \cdot \omega$

maka  $E_k = L \cdot \omega$

atau  $E_k = \frac{1}{2} L \omega$

Suatu sistem benda tegar berotasi terhadap sebuah sumbu yang melalui pusat massanya. Jika pada saat yang sama sistem bergerak translasi terhadap seorang pengamat maka energi kinetik totalnya adalah sebagai berikut.

$$E_k = mv^2 + I \cdot \omega^2 \quad \dots (6.12)$$

Dalam hal ini hukum kekekalan energi total atau energi mekanik tetap berlaku, yaitu:

$$E = E_k + E_p = \text{konstan}$$

$$mv^2 + I \omega^2 + mgh = \text{konstan} \quad \dots (6.13)$$

Untuk memahami lebih jauh tentang hukum kekekalan energi total, cobalah perhatikan contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Sebuah silinder pejal homogen dengan jari-jari  $R$  dan massa  $m$  yang berada di puncak bidang miring, menggelinding menuruni bidang miring seperti tampak pada gambar. Buktikanlah bahwa kecepatan linear pusat massa ketika tiba di dasar

bidang miring adalah  $v = \sqrt{gh}$  dengan menggunakan:

- hukum kekekalan energi,
- hukum II dinamika rotasi.

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $v_1 = 0$   
 $\omega_1 = 0$



Ditanyakan: bukti bahwa  $v = \sqrt{gh}$

Jawab:

a.  $E_{K_1} + E_{P_1} = E_{K_2} + E_{P_2}$

$$(m v_1^2 + I \omega_1^2) + mgh_1 = (m v_2^2 + \frac{1}{2} I \omega_2^2) + mgh_2$$

$$0 + 0 + mgh = mv^2 + \frac{1}{2} mR^2 \omega^2 + 0$$

$$gh = v^2 + \frac{1}{2} R^2 \omega^2$$

$$gh = v^2$$

$$v^2 = gh$$

$$v = \sqrt{gh} \quad (\text{terbukti})$$

- Hukum II Dinamika Rotasi

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$\left( mg \cdot \frac{h}{s} \right) - \dots = m \cdot a$$

$$\frac{gh}{s} = a$$

$$a = \dots$$

$$v^2 = v_0^2 + 2 a s$$

$$v^2 = 0^2 + 2 \cdot \dots \cdot s$$

$$v^2 = gh$$

$$v = \dots \quad (\text{terbukti})$$

## E. Menghitung Momen Inersia atau Kelembaman Benda-Benda Homogen

Apabila benda homogen yang memiliki momen inersia  $I$  diputar terhadap sumbu yang berjarak  $D$  dari sumbu pusat massa benda, sehingga kedua sumbu menjadi sejajar maka momen inersia dari benda tersebut akan berubah. Secara matematis momen inersia benda dapat dirumuskan:

$$I = I_{\text{pm}} + m \cdot D^2$$

Berikut ini akan ditunjukkan cara menghitung momen inersia dari berbagai benda homogen.

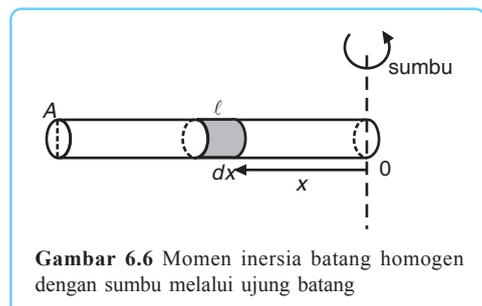
### 1. Batang Homogen (panjang $\ell$ , massa $m$ , penampang $A$ )

Apabila batang homogen diputar dengan sumbu putar di ujung batang atau di tengah batang maka momen inersia dapat ditentukan dengan cara berikut ini.

#### a. Sumbu putar di ujung batang

Momen inersia terhadap sumbu putar di ujung batang ( $O$ ) yang tegak lurus penampang batang dapat ditentukan dengan cara berikut. Perhatikan gambar 6.6 di samping!

Jika diketahui massa jenis batang pada gambar 6.6 adalah  $\rho = \dots = \dots$  maka untuk menentukan momen inersianya kita



Gambar 6.6 Momen inersia batang homogen dengan sumbu melalui ujung batang

ambil bagian kecil  $dx$  yang jaraknya  $x$  dari ujung  $O$ . Massa bagian itu adalah sebagai berikut.

$$dm = \rho dV$$

$$dm = \rho A dx$$

$$dm = \rho A dx$$

$$dm = \rho A dx$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, momen inersia batang yang diputar dengan sumbu putar di ujung batang dirumuskan:

$$I = \int_0^{\ell} x^2 dm$$

$$I = \int_0^{\ell} x^2 \rho A dx$$

$$I = \rho A \int_0^{\ell} x^2 dx$$

$$I = \rho A \left[ \frac{x^3}{3} \right]_0^{\ell}$$

$$I = \rho A \left( \frac{\ell^3}{3} - 0 \right)$$

$$I = \frac{1}{3} \rho A \ell^3$$

$$\frac{1}{3} \rho A \ell^3 = \frac{1}{3} m \ell^2$$

... (6.14)

**b. Sumbu putar di tengah batang (pada titik beratnya)**

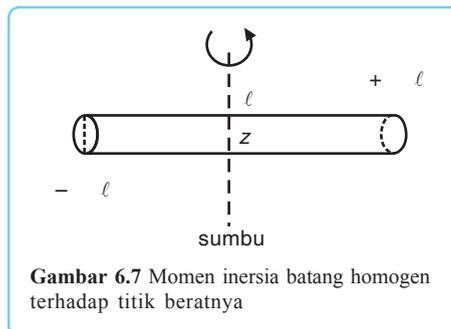
Momen inersia batang yang diputar dengan sumbu putar di tengah atau di titik beratnya ( $z$ ) dapat ditentukan dengan cara berikut.

Perhatikan gambar 6.7 di bawah! Pada batang yang diputar terhadap titik beratnya, panjang silinder

terhadap sumbu putarnya adalah  $\ell$ .

Sehingga momen inersia batang adalah:

$$I = \int_{-\ell/2}^{+\ell/2} x^2 dm$$



$$I = \int x^2 dm$$

$$I = \int x^2 dm$$

$$I = \int x^3$$

$$I = \left( \int_{-\ell}^{\ell} x^3 dx \right)$$

$$I = \left[ \frac{x^4}{4} \right]_{-\ell}^{\ell}$$

$$I = \frac{m \ell^3}{4} \dots (6.15)$$

Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh soal berikut!

### Contoh Soal

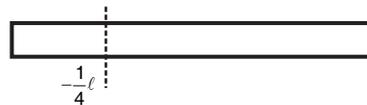
Tentukan momen inersia batang yang berputar pada poros berjarak  $\ell$  dari ujung titik 0.

**Penyelesaian:**

Diketahui: Sumbu rotasi di  $\ell$ .

Ditanyakan:  $I = \dots ?$

Jawab:



$$I = \int x^2 dm \rightarrow dm = \frac{m}{2\ell} dx$$

$$I = \int_{-\ell}^{\ell} x^2 \frac{m}{2\ell} dx = \frac{m}{2\ell} \int_{-\ell}^{\ell} x^2 dx$$

$$I = \frac{m}{2\ell} \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{-\ell}^{\ell}$$

$$I = \dots$$

$$I = \frac{m}{\ell} \dots$$

$$I = \frac{m}{\ell} \dots \ell^3$$

$$I = m \dots \ell^2$$

$$I = m \cdot \ell^2$$

## 2. Batang Tipis (tanpa tebal) Berbentuk Lingkaran (massa $m$ )

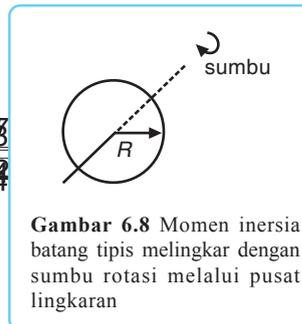
Batang tipis berbentuk lingkaran atau sering disebut cincin tipis jika diputar dengan sumbu putar melalui pusat lingkaran dan garis tengah memiliki momen inersia sebagai berikut.

### a. Sumbu putar melalui pusat lingkaran

Momen inersia terhadap sumbu rotasi melalui pusat lingkaran dan tegak lurus bidang lingkaran.

$$I = m R^2$$

... (6.16)



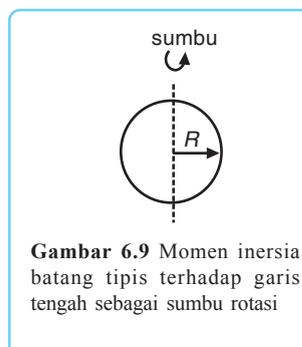
Gambar 6.8 Momen inersia batang tipis melingkar dengan sumbu rotasi melalui pusat lingkaran

### b. Sumbu putar melalui garis tengah lingkaran

Momen inersia terhadap garis tengah sebagai sumbu rotasi seperti gambar 6.9 di samping dirumuskan.

$$I = m R^2$$

... (6.17)



Gambar 6.9 Momen inersia batang tipis terhadap garis tengah sebagai sumbu rotasi

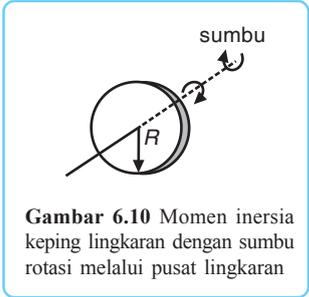
## 3. Keping (pelat) Berbentuk Lingkaran (massa $m$ )

Momen inersia pelat berbentuk lingkaran berbeda dengan batang tipis, meskipun sama-sama berbentuk lingkaran. Pada keping (pelat) berbentuk lingkaran, momen inersianya jika diputar dengan sumbu putar melalui pusat lingkaran dan garis tengah dinyatakan dengan:

**a. Sumbu putar melalui pusat lingkaran**

Momen inersia terhadap sumbu rotasi melalui pusat lingkaran dan tegak lurus keping seperti pada gambar 6.10 di samping adalah:

$$I = m R^2 \quad \dots (6.18)$$

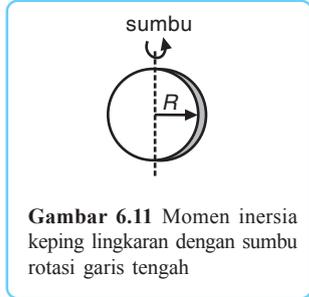


**Gambar 6.10** Momen inersia keping lingkaran dengan sumbu rotasi melalui pusat lingkaran

**b. Sumbu putar melalui garis tengah lingkaran**

Momen inersia terhadap garis tengah sebagai sumbu rotasi seperti pada gambar 6.11 di samping adalah:

$$I = m R^2 \quad \dots (6.19)$$



**Gambar 6.11** Momen inersia keping lingkaran dengan sumbu rotasi garis tengah

**4. Keping Berbentuk Segiempat**

Momen inersia keping berbentuk segi empat berbeda-beda jika sumbu putarnya diubah. Keping tipis segi empat dengan panjang  $a$  dan lebar  $b$ , massa  $m$  sumbu  $X$  sejajar  $a$  dan sumbu  $Y$  sejajar  $b$ , seperti pada gambar 6.12 di samping memiliki momen inersia berikut.

Jika keping diputar terhadap sumbu  $Z$  maka momen inersianya:

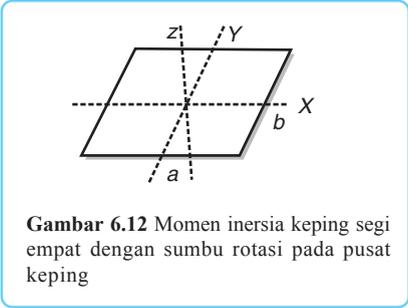
$$I_x = m b^2 \quad \dots (6.20)$$

Jika keping diputar terhadap sumbu  $Y$  maka momen inersianya:

$$I_y = m a^2 \quad \dots (6.21)$$

Jika keping diputar pada titik beratnya  $z$  maka momen inersianya:

$$I_z = m \cdot (a^2 + b^2) \quad \dots (6.22)$$

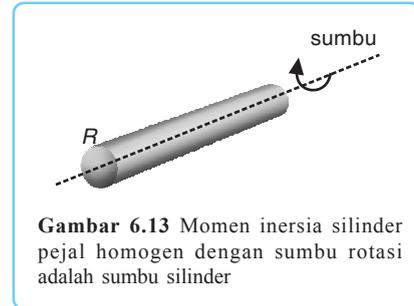


**Gambar 6.12** Momen inersia keping segi empat dengan sumbu rotasi pada pusat keping

## 5. Silinder Pejal Homogen

Momen inersia silinder pejal homogen terhadap sumbu silinder sebagai sumbu rotasi seperti pada gambar 6.13 adalah:

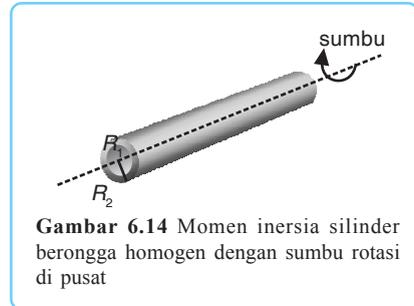
$$I = m R^2 \quad \dots (6.23)$$



## 6. Silinder Berongga Homogen

Momen inersia silinder berongga homogen dengan jari-jari dalam dan luar  $R_1$  dan  $R_2$  seperti gambar 6.14 jika diputar terhadap sumbu silinder sebagai sumbu rotasi akan memiliki momen inersia:

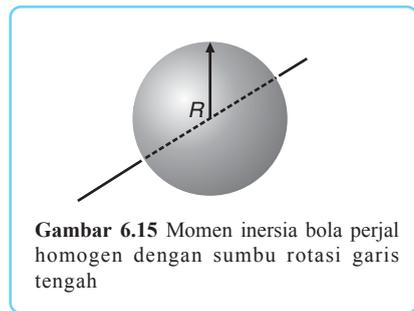
$$I = m (R_1^2 + R_2^2) \quad \dots (6.24)$$



## 7. Bola Pejal Homogen

Sebuah bola pejal dengan massa  $m$  dan jari-jari  $R$  seperti gambar 6.15 jika diputar melalui sumbu rotasi garis tengah bola, akan memiliki momen inersia:

$$I = \frac{2}{5} m R^2 \quad \dots (6.25)$$



## F. Katrol Tetap

Penerapan benda tegar yang sering kita gunakan adalah katrol. Katrol yang umumnya berupa silinder pejal homogen memiliki momen inersia

sebesar  $I = m R^2$ . Katrol sering digunakan untuk memperingan pekerjaan. Misalnya untuk menarik timba dalam sumur dan menarik beban pada bidang miring.

Pada katrol bekerja gerak translasi dan gerak rotasi. Oleh karena itu, untuk menentukan gaya-gaya yang bekerja pada katrol, kita harus menguraikan gaya pada masing-masing gerak translasi dan rotasi. Untuk lebih jelasnya perhatikan uraian berikut!

## 1. Sumbu Dianggap Licin Tanpa Gesekan

Sebuah katrol melakukan gerak rotasi dengan sumbu putar pada titik beratnya. Perhatikan gambar 6.16 di samping! Katrol pada gambar 6.16 diberi beban  $m_1$  dan  $m_2$  pada kedua ujungnya. Jika sumbu katrol dianggap licin tanpa gesekan maka kesetimbangan gaya yang bekerja pada sistem katrol tersebut adalah sebagai berikut.

Pada gerak translasi beban berlaku:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$+ T_1 - m_1 g = m_1 a$$

... (6.26)

$$+ m_2 g - T_2 = m_2 a$$

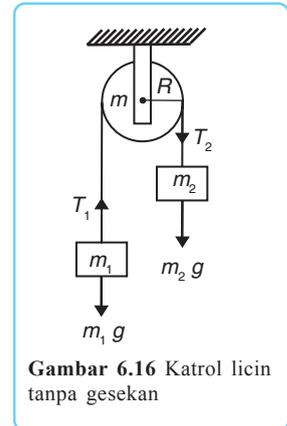
... (6.27)

Pada gerak rotasi katrol berlaku:

$$\tau = I \cdot \alpha$$

$$(T_2 - T_1) R = I$$

... (6.28)



## 2. Pada Puncak Bidang Miring

Sebuah katrol terletak pada puncak bidang miring. Katrol tersebut melakukan gerak rotasi dengan sumbu putar pada titik beratnya. Perhatikan gambar 6.17 di samping! Pada gambar 6.17 antara benda dengan lantai terjadi gaya gesek  $f$ . Dengan demikian kesetimbangan gaya yang bekerja pada sistem katrol tersebut adalah:

Pada gerak translasi beban berlaku:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$+ T_1 - m_1 g \sin \theta - f = m_1 a$$

... (6.29)

$$+ m_2 g - T_2 = m_2 a$$

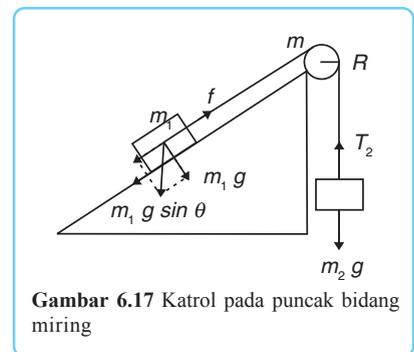
... (6.30)

Pada gerak rotasi katrol berlaku:

$$\Sigma \tau = I \cdot \alpha$$

$$(T_2 - T_1) R = I$$

... (6.31)



## 3. Satu Ujung Talinya Terikat pada Sumbu Katrol

Sebuah katrol yang salah satu talinya terikat pada sumbu katrol melakukan gerak rotasi. Perhatikan gambar 6.18! Kesetimbangan gaya yang bekerja pada sistem katrol tersebut adalah:

Pada gerak translasi beban berlaku:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$mg - T = m \cdot a$$

... (6.32)

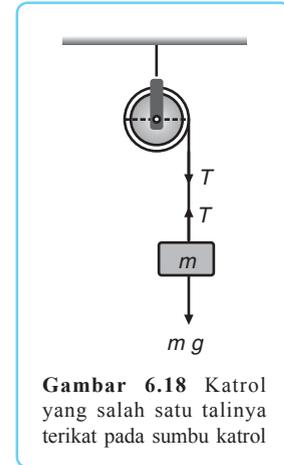
Pada gerak rotasi katrol berlaku:

$$\tau = I \cdot \alpha$$

$$T \cdot R = I \cdot \alpha$$

... (6.33)

Untuk lebih jelasnya, pelajari contoh soal berikut! Kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!



Gambar 6.18 Katrol yang salah satu talinya terikat pada sumbu katrol

### Contoh Soal

Pesawat Atwood seperti pada gambar terdiri atas katrol silinder (dianggap sebagai silinder pejal) yang masanya 4 kg. Massa  $m_1$  dan  $m_2$  masing-masing 5 kg dan 3 kg. Jari-jari katrol = 50 cm. Tentukan:

- percepatan beban,
- tegangan tali.

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $m_k = 4 \text{ kg}$

$m_1 = 5 \text{ kg}$

$m_2 = 3 \text{ kg}$

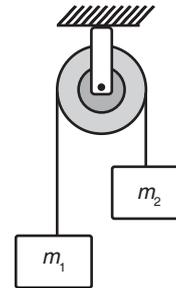
$R = 50 \text{ cm}$

Ditanyakan: a.  $a = \dots ?$

b.  $T_1 = \dots ?$

$T_2 = \dots ?$

$\frac{a}{2}$



Jawab:

a. Tinjau benda  $m_1$

$$\Sigma F = m_1 \cdot a$$

$$W_1 - T_1 = m_1 \cdot a$$

$$5 \cdot 10 - T_1 = 5 \cdot a$$

$$T_1 = 50 - 5a$$

Tinjau benda  $m_2$ :

$$\Sigma F = m_2 \cdot a$$

$$T_2 - W_2 = m_2 \cdot a$$

$$T_2 - 3 \cdot 10 = 3 \cdot a$$

$$T_2 = 30 + 3a$$

Tinjau katrol

$$\Sigma \tau = I \cdot \alpha$$

$$T_1 \cdot R - T_2 \cdot R = m \cdot R_2$$

$$T_1 - T_2 = \dots \cdot 4 \cdot 2$$

$$50 - 5a - 30 - 3a = 2a$$

$$20 = 10 \cdot a$$

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

b.  $T_1 = 50 - 5 \cdot 2 = 40 \text{ N}$

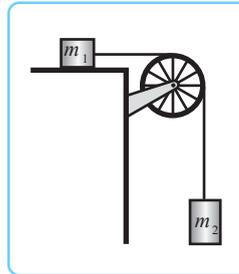
$$T_2 = 30 + 3 \cdot 2 = 36 \text{ N}$$



## Kerja Kelompok 1

*Kerjakan bersama kelompokmu!*

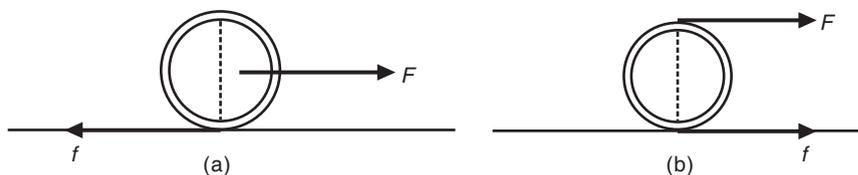
- Sebuah pesawat Atwood seperti pada gambar, terdiri atas katrol silinder licin bermassa 10 kg, beban  $m_1$  bermassa 50 kg, dan beban  $m_2$  bermassa 200 kg. Jika antara balok  $m_1$  dan bidang datar ada gaya gesek dengan  $\mu = 0,1$  dan percepatan gravitasi  $g = 9,8 \text{ m/s}$ , tentukan:
  - percepatan sistem,
  - gaya tegangan tali.
- Balok A ditarik oleh pemberat B dengan cara seperti pada gambar. Koefisien gesek antara balok A dengan lantai = 0,5. Massa A =  $m$ , massa B =  $3m$ , massa tali dan katrol diabaikan, dan percepatan gravitasi  $g$ . Tentukan:
  - gaya tarik oleh tali,
  - percepatan B.



## G. Menggelinding

Contoh lain penerapan benda yang bergerak rotasi dan translasi adalah gerak **menggelinding**. Untuk menentukan gaya-gaya yang bekerja pada gerak menggelinding, perhatikan uraian berikut!

### Menggelinding



**Gambar 6.19** (a) Gerak menggelinding dengan gaya  $F$  pada sumbunya dan (b) gerak menggelinding dengan gaya pada titik singgungnya

Berdasarkan letak gaya yang bekerja pada benda ada dua jenis gerak menggelinding, yaitu:

1. Gerak menggelinding dengan gaya  $F$  berada tepat di sumbu

Gerak menggelinding dengan gaya  $F$  berada tepat di sumbu ditunjukkan oleh gambar 6.19a. Keseimbangan gaya yang bekerja pada sistem ini adalah:

- a. pada gerak translasi berlaku:

$$F - f = m \cdot a \quad \dots (6.34)$$

- b. pada gerak rotasi berlaku:

$$f \cdot R = I \cdot \alpha \quad \dots (6.35)$$

dengan  $\alpha =$

2. Gerak menggelinding dengan gaya  $F$  berada di titik singgung

Gerak menggelinding dengan gaya  $F$  berada di titik singgung ditunjukkan oleh gambar 6.19b. Keseimbangan gaya yang bekerja pada sistem ini adalah:

- a. pada gerak translasi berlaku :  $F + f = m \cdot a \quad \dots (6.36)$

- b. pada gerak rotasi berlaku :  $(F - f) \cdot R = I \cdot \alpha \quad \dots (6.37)$

## H. Keseimbangan Benda Tegar

**Keseimbangan** adalah suatu kondisi benda dengan gaya resultan dan momen gaya resultan sama dengan nol. Keseimbangan benda tegar terjadi pada keadaan benda sebagai berikut.

**Keseimbangan**

1. Benda yang diam (statis)

Contoh: bangunan gedung, jembatan, dan pelabuhan.

2. Benda yang bergerak lurus beraturan (dinamis)

Contoh: gerak meteor di ruang hampa, gerak kereta api, dan gerak elektron mengelilingi inti atom.

Adapun keseimbangan benda tegar dibedakan menjadi dua, yaitu keseimbangan partikel dan keseimbangan benda.

1. Keseimbangan partikel

Partikel adalah benda yang ukurannya dapat diabaikan dan hanya mengalami gerak translasi (tidak mengalami gerak rotasi).

Syarat keseimbangan partikel adalah:

$$\begin{aligned} \Sigma F = 0 &\rightarrow \Sigma F_x = 0 \text{ (sumbu } X) \\ &\Sigma F_y = 0 \text{ (sumbu } Y) \end{aligned}$$

2. Keseimbangan benda

Syarat keseimbangan benda adalah:

$$\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0, \Sigma \tau = 0$$

Momen gaya merupakan besaran vektor yang nilainya sama dengan hasil kali antara gaya dengan jarak dari titik poros arah tegak lurus garis kerja gaya. Momen gaya dirumuskan sebagai berikut.

$$\tau = F \cdot d$$

Putaran momen gaya yang searah dengan putaran jarum jam disebut momen gaya positif, sedangkan yang berlawanan putaran jarum jam disebut momen gaya negatif.

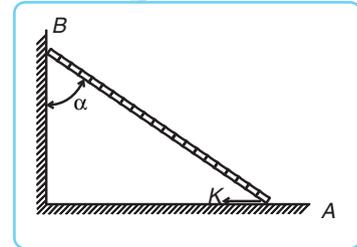
Momen gaya yang diakibatkan pasangan dua gaya yang sama besarnya dan arahnya berlawanan tetapi tidak segaris kerja disebut momen kopel. Benda yang dikenai momen kopel akan bergerak rotasi terus-menerus. Untuk menguji pemahamanmu, kerjakan soal berikut!



## Kerja Mandiri 2

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

Suatu batang homogen  $AB$  memiliki massa 30 kg dan panjang 5 meter. Batang tersebut bertumpu pada lantai di  $A$  dan pada tembok vertikal di  $B$ . Jarak dari  $B$  ke lantai 3 meter. Batang  $AB$  menyilang tegak lurus garis potong antara lantai dan tembok vertikal. Berapa besarnya gaya  $K$  mendarat yang harus diberikan pada batang di  $A$  supaya batang tetap setimbang? Hitung juga gaya tekan pada  $A$  dan  $B$ !



$$\frac{\sum m_1 X_1 + m_2 X_2 + m_3 X_3 + \dots}{\sum m_1 + m_2 + m_3 + \dots}$$

### 1. Titik Berat

**Titik berat** adalah titik pusat atau titik tangkap gaya berat dari suatu benda atau sistem benda. Titik berat menurut bentuk benda dibedakan menjadi:

### Titik Berat

#### a. Benda berbentuk partikel massa

Apabila sistem benda terdiri atas beberapa benda partikel titik yang digabung menjadi satu maka koordinat titik beratnya dirumuskan:

$$X_o = \frac{\sum m \cdot X}{\sum m} =$$

$$Y_o = \frac{\sum m \cdot Y}{\sum m} =$$

Jadi  $z_o (X_o, Y_o)$

**b. Benda berbentuk garis atau kurva**

Benda yang berbentuk garis atau kurva antara lain kabel, lidi, benang, dan sedotan. Apabila sistem benda terdiri atas beberapa benda garis yang digabung menjadi satu maka koordinat titik beratnya dirumuskan:

$$\left. \begin{aligned} X_o &= \frac{\sum l \cdot X}{\sum l} = \\ Y_o &= \frac{\sum l \cdot Y}{\sum l} = \end{aligned} \right\} \text{Jadi } z_o (X_o, Y_o)$$

**c. Benda berbentuk bidang atau luasan**

Benda yang terdiri atas bidang gabungan maka koordinat titik beratnya dirumuskan:

$$\left. \begin{aligned} X_o &= \frac{\sum A \cdot X}{\sum A} = \\ Y_o &= \frac{\sum A \cdot Y}{\sum A} = \end{aligned} \right\} \text{Jadi } z_o (X_o, Y_o)$$

**d. Benda berbentuk volume atau ruang**

Benda berbentuk volume atau ruang antara lain kubus, balok, bola, kerucut, dan tabung. Apabila sistem benda terdiri atas beberapa bidang gabungan benda maka koordinat titik beratnya dirumuskan sebagai berikut.

- 1) Benda terbuat dari bahan-bahan yang sama (homogen)

$$\left. \begin{aligned} X_o &= \frac{\sum V \cdot X}{\sum V} = \\ Y_o &= \frac{\sum V \cdot Y}{\sum V} = \end{aligned} \right\} \text{Jadi } z_o (X_o, Y_o)$$

- 2) Benda terbuat dari bahan-bahan yang berbeda (heterogen)

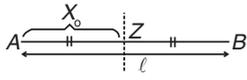
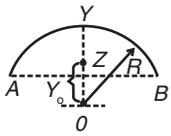
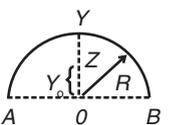
$$\left. \begin{aligned} X_o &= \frac{\sum W \cdot X}{\sum W} = \\ Y_o &= \frac{\sum W \cdot Y}{\sum W} = \end{aligned} \right\} \text{Jadi } z_o (X_o, Y_o)$$

**Keterangan:**

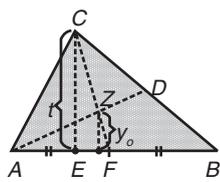
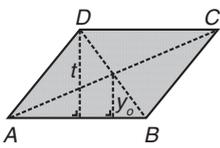
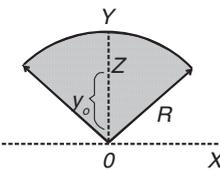
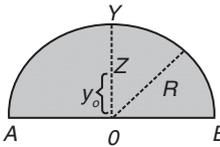
$W : mg = \rho \cdot V \cdot g$  karena  $S = \rho \cdot g \rightarrow W = S \cdot V$   
 $\rho$  : massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $S$  : berat jenis ( $\text{N/m}^3$ )

Berikut ini adalah tabel berbagai titik berat benda teratur.

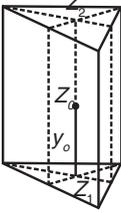
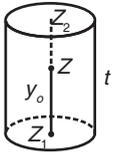
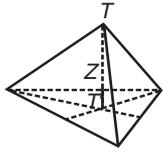
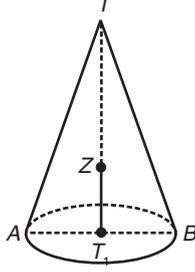
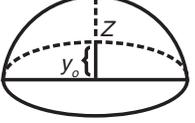
**Tabel 6.3 Titik Berat Bentuk Teratur Linear**

Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat	Keterangan
1. Garis lurus		$x_0 = \frac{l}{2}$	$z =$ titik tengah garis
2. Busur lingkaran		$y_0 = \frac{2R \sin \alpha}{\pi}$	$R =$ jari-jari lingkaran
3. Busur setengah lingkaran		$y_0 = \frac{2R}{\pi}$	

**Tabel 6.4 Titik Berat Benda Teratur Berbentuk Luas Bidang Homogen**

Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat	Keterangan
1. Bidang segitiga		$y_0 = \frac{2}{3} t$	$t =$ tinggi $z =$ perpotongan garis-garis berat AD & CF
2. Jajargenjang Belah ketupat Bujur sangkar Persegi panjang		$y_0 = \frac{t}{2}$	$t =$ tinggi $z =$ perpotongan diagonal AC dan BD
3. Bidang juring lingkaran		$y_0 = \frac{2R \sin \alpha}{3\alpha}$	$R =$ jari-jari lingkaran
4. Bidang setengah lingkaran		$y_0 = \frac{4R}{3\pi}$	$R =$ jari-jari lingkaran

**Tabel 6.5 Titik Berat Benda Teratur Berbentuk Bidang Ruang Homogen**

Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat	Keterangan
1. Bidang kulit prisma		z pada titik tengah garis $z_1z_2$ $y_0 = \frac{l}{3}$	$z_1$ = titik berat bidang alas $z_2$ = titik berat bidang atas $l$ = panjang sisi tegak
2. Bidang kulit silinder (tanpa tutup)		$y_0 = t$ $A = 2\pi R \cdot t$	$t$ = tinggi silinder $R$ = jari-jari lingkaran alas $A$ = luas kulit silinder
3. Bidang kulit limas		$Tz = \frac{1}{4} TT'$	$TT'$ = garis tinggi ruang
4. Bidang kulit kerucut		$zT = \frac{1}{4} TT'$	$TT'$ = tinggi kerucut $T'$ = pusat lingkaran alas
5. Bidang kulit setengah bola		$y_0 = \frac{3R}{8}$	$R$ = jari-jari



## Kerja Kelompok 2

*Kerjakan bersama kelompokmu!*

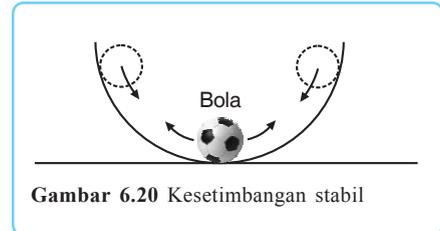
1. Buatlah benda luasan berbentuk segitiga siku-siku! Sisi siku-sikunya adalah 18 cm dan 24 cm. Kamu dapat membuatnya dari karton atau triplek.
2. Tentukan letak titik berat benda!
3. Laporkan hasil kerja kelompokmu kepada guru, kemudian diskusikan dengan teman-teman sekelasmu.

## 2. Macam-macam Kesetimbangan

Kesetimbangan dibedakan menjadi 3, yaitu kesetimbangan stabil, kesetimbangan labil, dan kesetimbangan indiferen.

### a. Kesetimbangan stabil atau mantap

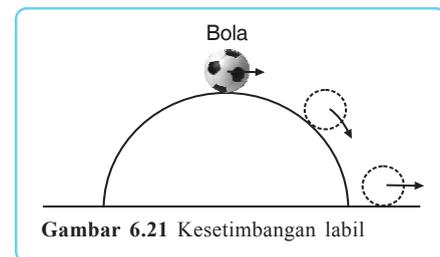
Kesetimbangan stabil adalah kesetimbangan suatu benda di mana setelah gangguan yang diberikan pada benda dihentikan, benda akan kembali ke posisi kesetimbangan semula. Perhatikan gambar 6.20 di samping! Kesetimbangan stabil dapat dipandang sebagai kesetimbangan yang dimiliki benda jika gangguan yang dialaminya menaikkan titik beratnya (energi potensialnya).



Gambar 6.20 Kesetimbangan stabil

### b. Kesetimbangan labil atau goyah

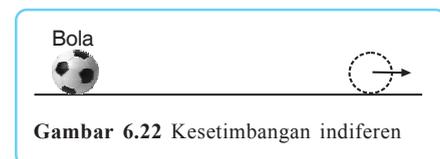
Kesetimbangan labil adalah kesetimbangan pada suatu benda di mana setelah gangguan yang diberikan atau dialami benda dihentikan, benda tidak kembali ke posisi kesetimbangan semula, bahkan memperbesar gangguan tersebut. Perhatikan gambar 6.21 di samping! Kesetimbangan pada benda dipandang sebagai kesetimbangan yang dimiliki benda itu jika gangguan yang dialaminya menurunkan titik beratnya (energi potensialnya).



Gambar 6.21 Kesetimbangan labil

### c. Kesetimbangan indiferen atau netral

Kesetimbangan indiferen adalah kesetimbangan pada suatu benda di mana gangguan yang diberikan tidak mengubah posisi benda. Perhatikan gambar 6.22 di samping! Kesetimbangan indiferen dapat dipandang sebagai kesetimbangan yang dimiliki benda jika gangguan yang dialaminya tidak menyebabkan perubahan titik beratnya (energi potensialnya).



Gambar 6.22 Kesetimbangan indiferen



## Rangkuman

1. Momen gaya disebut juga sebagai momen putar atau torsi dan diberi lambang  $\tau$  (baca: tau). Momen gaya dirumuskan dengan:

$$\tau = F \cdot d$$

2. Pada sistem kesetimbangan resultan momen gaya selalu bernilai nol, sehingga dirumuskan:

$$\Sigma \tau = 0$$

3. Momen inersia atau momen kelembaman benda terhadap sumbu putar yaitu penjumlahan hasil kali massa tiap partikel dalam suatu benda tegar dengan kuadrat jaraknya dari sumbu.

$$I = \sum m_i \cdot R_i^2$$

4. Momentum sudut ( $L$ ) adalah hasil kali momen kelembaman  $I$  dan kecepatan anguler  $\omega$ . Momentum sudut dapat dirumuskan:

$$L = I \cdot \omega$$

5. Hukum kekekalan momentum sudut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 = I_1' \omega_1' + I_2' \omega_2'$$

6. Energi kinetik total benda dirumuskan sebagai berikut.

$$E_k = mv^2 + I \cdot \omega^2$$

7. Hukum kekekalan energi total atau energi mekanik adalah:

$$E = E_k + E_p = \text{konstan}$$

$$mv^2 + I \omega^2 + mgh = \text{konstan}$$

8. Syarat kesetimbangan partikel adalah:  $\frac{1}{2}$

$$\begin{aligned} \Sigma F = 0 &\rightarrow \Sigma F_x = 0 \text{ (sumbu } X) \\ &\Sigma F_y = 0 \text{ (sumbu } Y) \end{aligned}$$

9. Syarat kesetimbangan benda adalah:

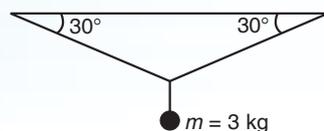
$$\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0, \Sigma \tau = 0$$



## Soal-soal Uji Kompetensi

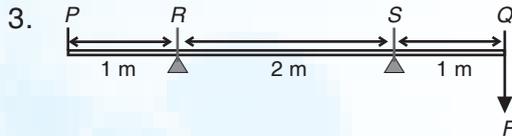
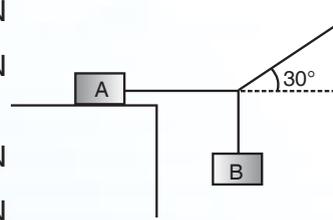
### A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Sebuah benda bermassa 3 kg diikat dengan tali pada langit-langit. Berapakah tegangan pada tali tersebut? ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ )
- 30,0 N
  - 29,4 N
  - 17,0 N



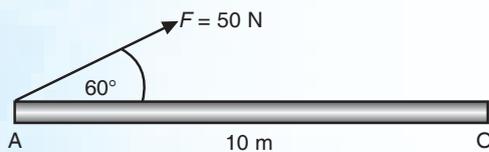
- 14,7 N
  - 8,5 N
2. Sistem pada gambar berada dalam keadaan setimbang. Berat balok A adalah 600 N dan koefisien gesek statis antara balok A dan meja adalah 0,2. Berat balok B adalah . . . .

- a. 20 N
- b. 20 N
- c. 40 N
- d. 40 N
- e. 40 N



Perhatikan gambar di atas!  $PQ$  adalah sebuah batang homogen dengan panjang 4 m. Batang itu diam pada penopang di  $R$  (1 m dari  $P$ ) dan  $S$  (1 m dari  $Q$ ). Jika berat batang 150 N, berapakah minimum gaya ke bawah  $F$  yang dikerjakan di  $Q$  yang akan mengangkat batang lepas dari penopang di  $R$ ?

- a. 50 N
  - b. 75 N
  - c. 100 N
  - d. 125 N
  - e. 150 N
4. Dalam waktu 2 sekon, sebuah roda yang berotasi murni, mengalami perubahan kecepatan dari 4 rad/s menjadi 20 rad/s secara beraturan. Sebuah titik terletak 30 cm dari poros roda. Besar percepatan tangensial yang dialami titik tersebut adalah ... m/s<sup>2</sup>.
- a. 240
  - b. 26,7
  - c. 4,8
  - d. 2,4
  - e. 0,27
5. Gambar berikut adalah sebuah batang yang ditarik dengan gaya. Momen gaya terhadap titik  $O$  adalah ...

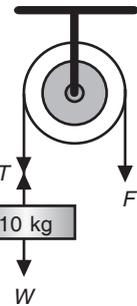


- a. 75 N
- b. 50 N
- c. 100 N
- d. 100 N
- e. 250 N

6. Sebuah bola pejal menggelinding tanpa selip dengan kelajuan tangensial  $v$ , jika massa bola pejal 5 kg maka energi kinetik bola pejal saat menggelinding tersebut adalah ...  $v^2$

- a. 1,0
- b. 2,5
- c. 3,5
- d. 5,0
- e. 7,5

7. Massa katrol adalah 2 kg dan besar  $F = 122$  newton. Gaya tegangan tali  $T$  adalah ... newton.

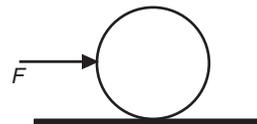


- a. 100
- b. 120
- c. 122
- d. 220
- e. 242

8. Sebuah tangga homogen sepanjang 10 m, massa 10 kg, bersandar pada dinding licin dan lantai kasar. Ujung atas tangga berada 8 meter dari lantai. Bila tangga tepat akan menggeser, besarnya koefisien gesek statis lantai dengan tangga adalah ...

- a. 0,80
- b. 0,75
- c. 0,60
- d. 0,375
- e. 0,30

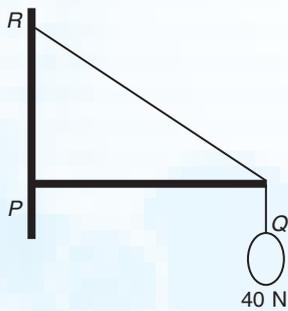
9. Sebuah silinder pejal dengan diameter 1 meter berada pada bidang datar kasar. Selanjutnya, silinder didorong tepat pada pusat massanya dengan gaya  $F = 6$  kali massa benda. Jika silinder menggelinding tanpa selip maka percepatan tangensialnya adalah ... (gaya dan massa bersatuan sesuai SI).



- a. 1 m/s<sup>2</sup>
- b. 2 m/s<sup>2</sup>
- c. 3 m/s<sup>2</sup>
- d. 4 m/s<sup>2</sup>
- e. 5 m/s<sup>2</sup>

10. Batang  $PQ$  horizontal beratnya 60 N menggunakan engsel pada titik  $P$ . Pada ujung  $Q$  diikat tali bersudut  $30^\circ$

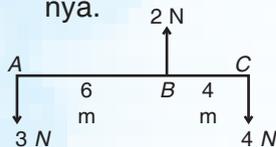
ke dinding. (Lihat gambar di bawah!)  
Jika pada titik  $Q$  digantungkan beban 40 N maka besar gaya tegangan tali  $QR \dots$



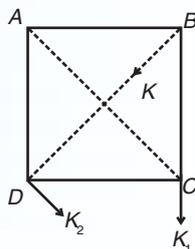
- a. 30 N                      d. 120 N  
b. 35 N                      e. 140 N  
c. 70 N

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

- Pada sebuah batang horizontal  $AC$  yang panjangnya 10 m bekerja tiga buah gaya 3 N, 2 N, dan 4 N seperti terlihat pada gambar. Tentukan:
  - resultan dari gaya-gaya tersebut,
  - momen gaya yang bekerja pada sumbu-sumbu yang melalui  $A$ ,  $B$ , dan  $C$ ,
  - letak titik tangkap gaya resultannya.

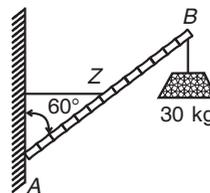


- Sebuah papan berbentuk empat persegi panjang  $ABCD$  (beratnya diabaikan) dapat berputar pada bidangannya di sekeliling titik  $A$  sebagai engsel,  $AB = 4$  meter;  $AD = 3$  meter. Persegi panjang itu setimbang karena gaya-gaya yang bekerja pada bidang persegi panjang itu adalah:  $K_1 = 30$  N pada titik  $C$  dengan arah  $BC$ ;  $K_2 = 150$  N pada titik  $D$  dengan arah sejajar  $AC$ ;  $K$  pada titik  $B$  dengan arah  $BD$ .

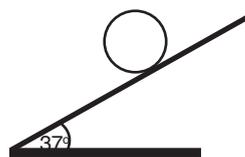


Hitunglah:

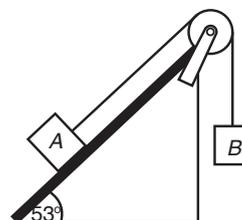
- besar gaya  $K$ ,
  - besar dan arah gaya engsel.
- Sebuah batang lurus homogen  $AB$  massanya 10 kg. Ujung  $A$  dihubungkan pada tembok vertikal oleh sebuah engsel, sehingga batang  $AB$  dapat berputar pada bidang yang tegak lurus pada tembok. Tengah-tengah batang  $AB$  dihubungkan dengan tali pada tembok. Tali tersebut tegak lurus pada tembok dan kencang. Jika batang membentuk sudut  $60^\circ$  terhadap tembok dan pada ujung  $B$  diberi beban 30 kg, tentukan:
    - diagram gaya-gaya,
    - gaya tegangan tali,
    - besar dan arah gaya engsel.



- Sebuah bola pejal bermassa 5 kg berada di atas bidang miring kasar, mula-mula dalam keadaan diam, kemudian menggelinding tanpa selip (jika  $\text{tg } 37^\circ = \frac{3}{4}$ ) hitung energi kinetik setelah bergerak selama 7 sekon!



- Massa  $A =$  massa  $B = 5$  kg, jika  $\text{tg } 53^\circ = \frac{4}{3}$  dan koefisien gesek antara benda  $A$  dan bidang miring 0,2, massa katrol 4 kg. Hitung percepatan sistem!



# BAB 7

## FLUIDA

Kali ini kita akan mempelajari fluida. Fluida terbagi menjadi dua, yaitu fluida statik dan fluida dinamik.

Kita awali dengan belajar tentang fluida statik, yaitu fluida yang diam dan tidak mengalir. Hukum-hukum yang terkait di dalam fluida statik adalah hukum Pascal dan hukum Archimedes.

Selain itu ada juga hukum Stokes dan tegangan permukaan.

Selanjutnya kita mempelajari fluida dinamik, yaitu fluida yang bergerak atau mengalir.

Asas kontinuitas dan hukum Bernoulli menjadi dasar pembahasan fluida mengalir.

Jangan lupa! Kita pelajari juga penerapannya. Alat venturimeter, pipa pitot, dan pesawat terbang menggunakan dasar hukum Bernoulli.

Jadi, setelah mempelajari bab ini kita dapat memahami fluida beserta hukum-hukum yang terkait di dalamnya.



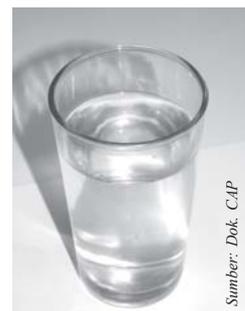
Gambar 7.1 Pemanfaatan sistem hidrolis pada alat pengangkat mobil

Pernahkah kamu melihat alat hidrolis pengangkat mobil di tempat pencucian mobil? Mobil dapat dinaikkan di atas pengisap yang didorong oleh gaya hidrostatis. Gaya ini merupakan hasil kali dari tekanan dengan luas penampang pengisap yang dipakai landasan mobil. Dalam bab ini kamu akan mempelajari fluida statik dan fluida dinamik beserta hukum-hukum yang terkait di dalamnya serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

**Kata Kunci:** Kohesi dan Adhesi – Tegangan Permukaan – Hukum Pascal – Hukum Utama Hidrostatis – Hukum Archimedes – Tenggelam – Melayang – Terapung – Balon Udara – Hukum Stokes – Fluida Dinamik – Debit – Persamaan Kontinuitas – Hukum Bernoulli – Venturimeter

## A. Fluida Statik

Fluida merupakan istilah untuk zat alir. Zat alir adalah zat yang mengalirkan seluruh bagian-bagiannya ke tempat lain dalam waktu yang bersamaan. Zat alir mencakup zat dalam wujud cair dan gas. Berdasarkan pergerakannya fluida ada dua macam, yaitu fluida dinamik dan fluida statik. Sebelum mempelajari fluida dinamik kita pelajari fluida statik terlebih dahulu. Fluida statik adalah fluida yang tidak bergerak. Contoh fluida statik misalnya air di gelas, air di kolam renang, dan air danau. Fluida menurut sifat-sifatnya dibedakan menjadi dua, yaitu:



Gambar 7.2 Air dalam gelas termasuk fluida statik

## 1. Fluida ideal

Fluida ideal adalah fluida yang memiliki ciri-ciri sebagai berikut.

- tidak kompresibel (volumenya tidak berubah karena perubahan tekanan)
- berpindah tanpa mengalami gesekan (viskositasnya nol)

## 2. Fluida sejati

Fluida sejati memiliki ciri-ciri sebagai berikut.

- kompresibel
- berpindah dengan mengalami gesekan (viskositasnya tertentu)

Kita telah mempelajari konsep fluida statik dan ciri-ciri dari fluida ideal dan fluida sejati. Untuk lebih memahami konsep fluida statik, berikut ini kita akan membahas konsep kohesi dan adhesi.

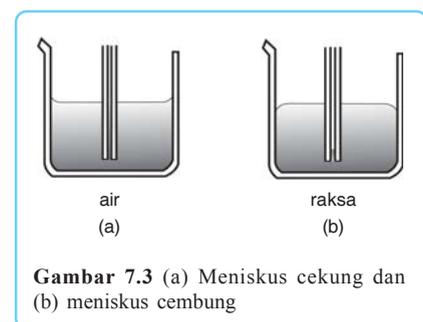
## 1. Kohesi dan Adhesi

Mengapa setetes air yang jatuh di kaca bentuknya berbeda dengan air yang jatuh di sehelai daun talas? Hal ini terjadi karena adanya gaya tarik-menarik antarmolekul. Gaya tarik-menarik antarmolekul ada dua macam, yaitu gaya **kohesi** dan gaya **adhesi**. Gaya kohesi adalah gaya tarik-menarik antarmolekul sejenis. Sedangkan gaya adhesi adalah gaya tarik-menarik antarmolekul yang tidak sejenis. Pada saat air bersentuhan dengan suatu benda maka molekul-molekul bagian luarnya akan tarik-menarik dengan molekul-molekul luar benda tersebut. Setetes air yang jatuh di kaca bentuknya melebar karena gaya kohesi antarmolekul air lebih kecil daripada gaya adhesi antara molekul air dengan molekul kaca. Sedangkan setetes air yang jatuh di atas daun talas bentuknya menyerupai bola karena gaya kohesi antarmolekul air lebih besar daripada gaya adhesi antara molekul air dengan molekul daun talas.

Gaya kohesi maupun gaya adhesi memengaruhi bentuk permukaan zat cair dalam wadahnya. Misalnya dua buah tabung reaksi masing-masing diisi air dan air raksa. Apa yang terjadi? Permukaan air dalam tabung reaksi berbentuk cekung yang disebut meniskus cekung. Sedangkan permukaan air raksa dalam tabung reaksi berbentuk cembung disebut meniskus cembung. Hal ini terjadi karena gaya adhesi antara molekul air dengan molekul kaca lebih besar daripada gaya kohesi antarmolekul air. Sedangkan gaya adhesi antara molekul air raksa dengan molekul kaca lebih kecil daripada gaya kohesi antarmolekul air raksa.

Meniskus cembung maupun meniskus cekung menyebabkan sudut kontak antara bidang wadah (tabung) dengan permukaan zat cair berbeda besarnya. Meniskus cembung menimbulkan sudut kontak tumpul ( $> 90^\circ$ ), sedangkan meniskus cekung menimbulkan sudut kontak lancip ( $< 90^\circ$ ).

## Kohesi dan Adhesi



**Gambar 7.3** (a) Meniskus cekung dan (b) meniskus cembung

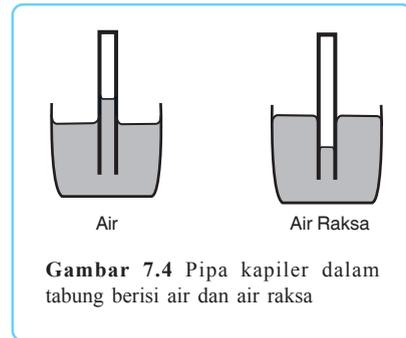
Gaya kohesi dan gaya adhesi juga berpengaruh pada gejala kapilaritas. Sebuah pipa kapiler kaca jika dicelupkan pada tabung berisi air maka air dapat naik ke dalam pembuluh kaca pipa kapiler. Sebaliknya, jika pembuluh pipa kapiler dicelupkan pada tabung berisi air raksa maka air raksa di dalam pembuluh kaca pipa kapiler lebih rendah permukaannya dibandingkan permukaan air raksa dalam tabung.

Naiknya air dalam pembuluh pipa kapiler dikarenakan adhesi, sedangkan turunnya air raksa dalam pembuluh pipa kapiler dikarenakan kohesi.

Perhatikan gambar 7.4!

Pada pembuluh pipa kapiler yang berisi air permukaannya lebih tinggi karena gaya adhesinya lebih kuat daripada gaya kohesinya.

Sedangkan pada pembuluh pipa kapiler yang berisi air raksa permukaannya lebih rendah karena kohesi air raksa lebih besar daripada gaya adhesi antara air raksa dengan kaca.



**Gambar 7.4** Pipa kapiler dalam tabung berisi air dan air raksa

## 2. Tegangan Permukaan

Gaya tarik-menarik antarmolekul zat cair tidak hanya menimbulkan gaya kohesi dan gaya adhesi saja, tetapi juga dapat menimbulkan **tegangan permukaan**. Tegangan permukaan adalah kecenderungan permukaan zat cair untuk meregang sehingga permukaannya seperti ditutupi oleh suatu lapisan elastis. Molekul-molekul yang berada pada lapisan ini selalu berusaha memperkecil luas permukaannya. Tegangan permukaan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya tegangan permukaan dan panjang permukaan.

### Tegangan Permukaan

$$\gamma = \frac{F}{\ell}$$

... (7.1)

#### Keterangan:

$\gamma$  : tegangan permukaan (N/m)

$F$  : gaya tegangan permukaan (N)

$\ell$  : panjang permukaan (m)

Besarnya tegangan permukaan suatu zat cair dipengaruhi oleh keadaan permukaan zat cair, misalnya suhu. Semakin tinggi suhu zat cair semakin kecil tegangan permukaannya. Hal inilah yang menyebabkan baju yang dicuci dengan air hangat lebih mudah dibersihkan daripada baju yang dicuci dengan air dingin. Berikut ini merupakan contoh tegangan permukaan pada beberapa benda.

#### a. Tegangan Permukaan pada Kawat yang Dibengkokkan

Sebuah kawat yang dibengkokkan apabila diletakkan di atas permukaan zat cair tidak selalu tenggelam. Kawat tersebut dapat mengambang di atas permukaan zat cair karena adanya gaya tegangan permukaan zat cair.

Gaya yang digunakan untuk menahan kawat supaya kawat dalam keadaan setimbang adalah:

$$F = W_1 + W_2$$

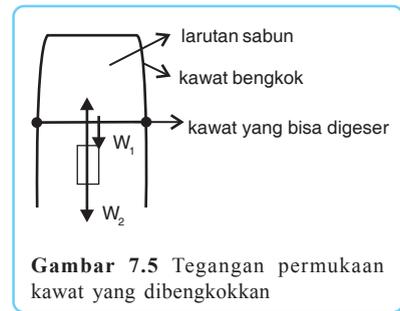
Perhatikan gambar 7.5! Jika kawat digeser sejauh  $s$  maka ada tambahan luas  $= \ell \cdot s$ . Untuk menambah luas tersebut perlu dilakukan usaha dari luar sebesar  $W = F \cdot s$ . Dengan demikian usaha yang dilakukan per satuan luas adalah:

$$= =$$

Usaha yang dilakukan per satuan luas adalah tegangan permukaan. Sehingga besar tegangan permukaan pada kawat yang dibengkokkan adalah:

$$\gamma = = \dots (7.2)$$

Agar lebih mudah memahami tegangan permukaan, lakukan kegiatan praktik di bawah ini bersama kelompokmu!



Gambar 7.5 Tegangan permukaan kawat yang dibengkokkan



## Praktikum

$$\frac{WF \cdot s}{2\ell}$$

### Tegangan Permukaan

#### A. Tujuan

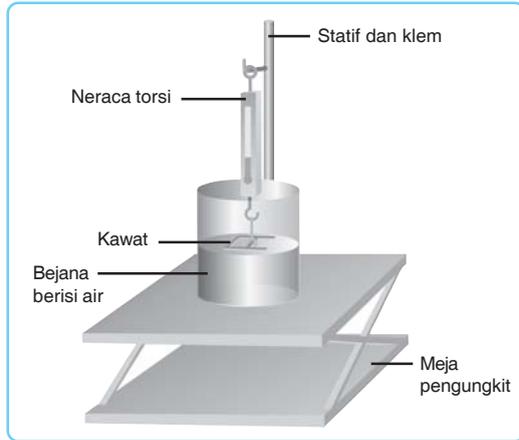
Menentukan besarnya tegangan permukaan air dan larutan sabun.

#### B. Alat dan Bahan

- |                            |            |
|----------------------------|------------|
| 1. Neraca torsi            | 1 buah     |
| 2. Bejana                  | 2 buah     |
| 3. Statif dan klem         | 1 set      |
| 4. Kawat yang dibengkokkan | 1 buah     |
| 5. Meja pengungkit         | 1 buah     |
| 6. Kepingan kaca           | 1 buah     |
| 7. Pengait                 | 1 buah     |
| 8. Penggaris               | 1 buah     |
| 9. Air                     | secukupnya |
| 10. Larutan sabun          | secukupnya |

### C. Langkah Kerja

1. Ukurlah luas kawat yang dibengkokkan!
2. Susunlah alat seperti gambar berikut!
3. Turunkan meja pengungkit perlahan-lahan hingga kawat akan lepas dari permukaan air!
4. Catatlah angka yang terbaca pada neraca torsi ketika kawat akan lepas dari permukaan air!
5. Ulangi langkah 1 – 4 dengan menggunakan larutan sabun!
6. Ulangi langkah 1 – 5 dengan menggunakan kepingan kaca!
7. Hitunglah besar tegangan permukaan air dan larutan sabun dengan rumus berikut.
  - a. Bila digunakan alat kawat yang dibengkokkan maka digunakan rumus:

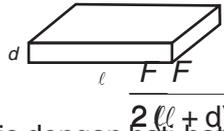


$$\gamma =$$



- b. Bila digunakan keping kaca maka menggunakan rumus:

$$\gamma =$$



8. Lakukan setiap langkah kerja dengan hati-hati dan cermat! Setelah kamu selesai melaksanakan praktikum, jangan lupa untuk mengembalikan peralatan dengan baik ke tempat semula! Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!



### Kerja Berpasangan 1

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

1. Sebuah kawat berbentuk segitiga sama sisi diletakkan perlahan-lahan di atas permukaan zat cair. Tegangan permukaan zat cair 74 dyne/cm. Jika gaya oleh tegangan permukaan 1,776 dyne, tentukan tinggi segitiga tersebut!
2. Sebuah pisau silet yang berukuran 3 cm × 1,5 cm, diletakkan di atas permukaan zat cair. Tegangan permukaan zat cair 72 dyne/cm. Tentukan berat minimum silet tersebut agar tidak tenggelam!
3. Untuk mengangkat sebuah jarum yang panjangnya 5 cm dari permukaan zat cair, diperlukan gaya sebesar  $F$  Newton. Jika tegangan permukaan zat cair 63,1 dyne/cm, tentukan besar  $F$ !

## b. Tegangan Permukaan Zat Cair dalam Pipa Kapiler

Tegangan permukaan zat cair pada pipa kapiler dipengaruhi oleh adhesi dan kohesi. Adhesi menyebabkan zat cair yang dekat dengan dinding naik. Sedangkan kohesi menyebabkan zat cair yang ada di tengah ikut naik. Naiknya zat cair dalam pipa diimbangi oleh berat air itu sendiri. Jika gaya yang menarik ke atas  $2 \pi r \gamma \cos \theta$  dan berat air  $\pi r^2 \rho g y$ , besar tegangan permukaan zat cair dalam pipa kapiler adalah sebagai berikut.

$$F_{\text{atas}} = W$$
$$2 \pi r \gamma \cos \theta = \pi r^2 \rho g y$$
$$\gamma =$$

### Keterangan:

$\rho$  : massa jenis zat cair (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

$y$  : ketinggian zat cair (m)

$r$  : jari-jari pipa kapiler (m)

$\theta$  : sudut kontak

Untuk memudahkan pemahamanmu mengenai tegangan permukaan, simaklah contoh soal berikut ini!

### Contoh Soal

Ketinggian etil alkohol naik 25 mm dari sebuah pipa gelas yang berdiameter 0,4 mm. Diketahui massa jenis etil alkohol 0,79 g/cm<sup>3</sup>. Berapakah tegangan permukaan pada suhu tersebut, jika sudut kontak antara etil alkohol dengan gelas 30°!

### Penyelesaian:

Diketahui:  $y = 25 \text{ mm} = 0,25 \text{ cm}$

$d = 0,4 \text{ mm} = 0,04 \text{ cm}$

$\rho = 0,79 \text{ g/cm}^3$

$\theta = 30^\circ$

$r = 0,2 \text{ mm} = 0,02 \text{ cm}$

$g = 980 \text{ cm/s}^2$

Ditanyakan:  $\gamma = \dots ?$

Jawab:

$$\gamma =$$

$$\gamma =$$

$$\gamma = \frac{3,871}{1,73}$$

$$\gamma = 2,238 \text{ dyne/cm}$$

### 3. Tekanan Hidrostatik

Setiap benda yang terletak pada suatu bidang akan melakukan tekanan pada bidang tersebut. Zat cair yang berada di dalam suatu bejana juga melakukan tekanan terhadap dasar bejana itu.

Tekanan yang dilakukan zat cair demikian disebut tekanan hidrostatik. Sebelum kita membahas tekanan hidrostatik lebih lanjut, kita bahas dulu konsep tekanan secara umum sebagai berikut.

Tekanan adalah gaya per satuan luas yang bekerja pada arah tegak lurus suatu permukaan. Dengan demikian, rumus tekanan adalah:

$$P =$$

**Keterangan:**

$P$ : tekanan ( $\text{N/m}^2$ )

$F$ : gaya (N)

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

Gaya berat fluida  $F = w = m \cdot g$ .

Jika  $m = \rho \cdot V$  maka  $w = \rho \cdot V \cdot g$ .

Tekanan hidrostatik di dasar bejana

$$P_h = P_o +$$

$$P_h = P_o + \quad , V = A \cdot h$$



maka

$$P_h = P_o + \frac{\rho \cdot (A \cdot h) \cdot g}{A}$$

$$P_h = P_o + \rho \cdot g \cdot h$$

$P_o$  menyatakan tekanan atmosfer di permukaan fluida.

$P_o = 1$  atmosfer ( $1 \text{ atm} = 76 \text{ cm Hg} = 10^5 \text{ N/m}^2$ ).

Jika tekanan atmosfer di permukaan fluida diabaikan maka tekanan hidrostatik di dasar bejana adalah:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \quad \dots (7.3)$$

Tiap titik di dalam fluida tidak memiliki tekanan yang sama besar, melainkan berbeda-beda sesuai dengan ketinggian titik tersebut dari suatu titik acuan. Dasar bejana akan mendapat tekanan sebesar:

$$P_h = P_o + \frac{\text{Gaya berat fluida}}{\text{Luas penampang dasar bejana}}$$

$$P_h = P_o +$$

$$P_h = P_o + \frac{\rho \cdot g \cdot A \cdot h}{A}$$

$$P_h = P_o + \rho \cdot g \cdot h$$

Jadi tekanan hidrostatik ( $P_h$ ) dirumuskan:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \quad \dots (7.4)$$

**Keterangan:**

$P_h$  : tekanan hidrostatik (N/m<sup>2</sup>)

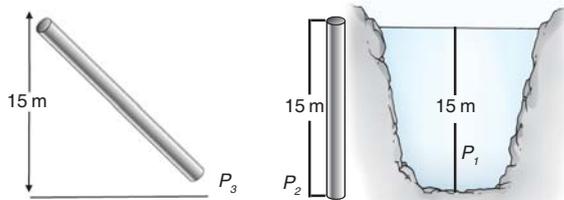
$\rho$  : massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

$h$  : tinggi (m)

Berdasarkan persamaan (7.4) maka tekanan hidrostatik dipengaruhi oleh massa jenis fluida ( $\rho$ ), percepatan gravitasi ( $g$ ) dan kedalaman zat cair diukur di permukaan ( $h$ ). Tekanan hidrostatik tidak dipengaruhi oleh bentuk bejana. Dengan demikian tiap titik konversi satuan tekanan adalah: 1 atm = 76 cm Hg dan 1 atm = 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> = 10<sup>6</sup> dyne/cm<sup>2</sup>.

Tiap titik yang memiliki kedalaman yang sama diukur dari permukaan zat cair akan memiliki tekanan hidrostatik yang sama.



**Gambar 7.7** Pada kedalaman yang sama tekanan hidrostatik bernilai sama asal zat cair sejenis  $P_1 = P_2 = P_3$

Untuk memantapkan pemahamanmu, pelajilah contoh soal berikut ini kemudian kerjakan latihan di bawahnya!

**Contoh soal**

Seekor ikan berada di dasar kolam air tawar sedalam  $h = 5$  meter. Hitunglah tekanan hidrostatik yang dialami ikan!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\rho_{air} = 1000 \text{ g/cm}^3$

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

$h = 5 \text{ m}$

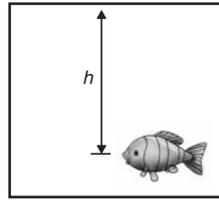
Ditanyakan:  $P_h = \dots ?$

Jawab:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h$$

$$P_h = 1000 \cdot 10 \cdot 5$$

$$P_h = 5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$



## Kerja Mandiri 1

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Apabila sebuah kapal selam menyelam sedalam 60 m, berapa besar tekanan yang dialami kapal selam tersebut (massa jenis air laut =  $1,03 \text{ g/cm}^3$ )?
2. Sebuah bejana yang berukuran panjang 40 cm, lebar 30 cm, dan tinggi 25 cm berisi minyak sebanyak 19,2 kg. Jika massa jenis minyak =  $0,8 \text{ g/cm}^3$ ,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , dan tekanan udara luar = 76 cmHg, tentukan:
  - a. tekanan total dan gaya total yang dialami dasar bejana,
  - b. tekanan hidrostatik dan gaya hidrostatik yang dialami oleh dinding bejana.

## 4. Hukum Pascal

Kita telah mempelajari konsep tekanan hidrostatik. Berdasarkan konsep tersebut, besar tekanan yang ditimbulkan fluida pada dasar bejana tergantung pada massa jenis, percepatan gravitasi, dan kedalaman fluida. Bagaimana sifat tekanan hidrostatik fluida tersebut apabila ditempatkan pada pipa U. Kita akan mempelajari konsep tersebut melalui hukum Pascal.

Simaklah bunyi hukum Pascal berikut!

Te<sup>kanan yang bekerja pada fluida di dalam ruang tertutup akan diteruskan oleh fluida tersebut ke segala arah dengan sama besar.</sup>

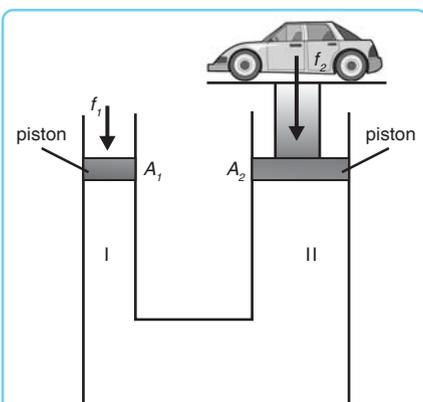
Contoh alat yang berdasarkan hukum Pascal antara lain dongkrak hidrolik, pompa hidrolik, dan alat pengangkat mobil. Perhatikan gambar 7.8!

Permukaan fluida pada kedua kaki bejana berhubungan sama tinggi. Bila kaki I yang luas penampangnya  $A_1$  mendapat gaya  $F_1$  dan kaki II yang luas penampangnya  $A_2$  mendapat gaya  $F_2$  maka menurut hukum Pascal berlaku:

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \quad \text{atau} \quad F_1 : F_2 = A_1 : A_2 \quad \dots (7.5)$$

### Hukum Pascal



Gambar 7.8 Pinsip bejana berhubungan dimanfaatkan pada mesin pengangkat mobil

## 5. Hukum Utama Hidrostatik

Kamu tentunya memiliki botol air bukan? Mari kita isi botol tersebut dengan air kira-kira setengah botol! Mula-mula botol kita letakkan pada permukaan meja. Kita melihat bahwa permukaan air dalam botol adalah mendatar. Sekarang botol kita miringkan, ternyata permukaan air tetap mendatar. Mengapa demikian? Untuk memahami sifat permukaan air tersebut, berikut ini kita bahas hukum utama hidrostatik. Perhatikan gambar 7.9 berikut.



Gambar 7.9 Skema hukum utama hidrostatik

Pada gambar 7.9 tersebut terdapat empat bejana yang berbeda bentuk dan saling berhubungan. Ketika bejana-bejana tersebut diisi fluida statik yang jenisnya sama ternyata dalam keadaan setimbang ketinggian fluida pada tiap bejana sama. Berdasarkan konsep tekanan hidrostatik, tekanan pada masing-

masing dasar bejana adalah sama. Keadaan fluida seperti gambar 7.9 dikenal dengan hukum utama hidrostatik.

Hukum utama hidrostatik berbunyi:

**Tekanan hidrostatik pada sembarang titik yang terletak pada bidang mendatar di dalam wadah suatu jenis zat cair sejenis dalam keadaan seimbang adalah sama.**

Hukum utama hidrostatika juga berlaku pada pipa U (bejana berhubungan) yang diisi lebih dari satu macam zat cair yang tidak bercampur. Percobaan pipa U ini biasanya digunakan untuk menentukan massa jenis zat cair.

Berdasarkan tekanan hidrostatik maka kita dapat menentukan besar gaya hidrostatik yang bekerja pada dasar bejana tersebut. Contoh penerapan hukum utama hidrostatik misalnya pada penggunaan *water pass*.

Hukum utama hidrostatik tidak berlaku bila:

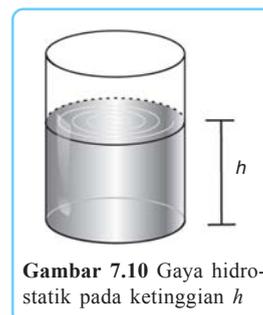
- fluida tidak setimbang,
- bejana diisi fluida yang berbeda,
- salah satu bejana ditutup.

### Gaya Hidrostatik ( $F_h$ )

Besarnya gaya hidrostatik ( $F_h$ ) yang bekerja pada bidang seluas  $A$  adalah:

$$F_h = P_h \cdot A = \rho \cdot g \cdot h \cdot A$$
$$F_h = \rho \cdot g \cdot V$$

... (7.6)



Gambar 7.10 Gaya hidrostatik pada ketinggian  $h$

## Hukum Utama Hidrostatik



## Kerja Berpasangan 2

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

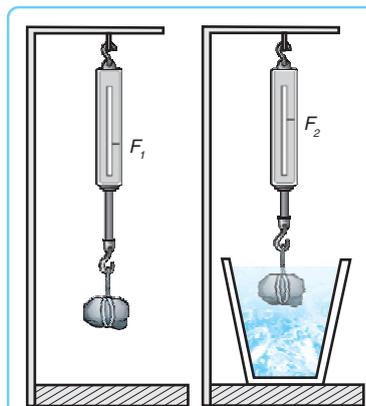
1. Dalam pipa U terdapat Hg (massa jenisnya  $13,6 \text{ g/cm}^3$ ). Pada kaki kiri dituangkan air setinggi 20 cm kemudian minyak (massa jenisnya  $0,9 \text{ g/cm}^3$ ) setinggi 8 cm. Pada kaki kanan ditambahkan alkohol (massa jenisnya  $0,8 \text{ g/cm}^3$ ) sehingga permukaan minyak dan permukaan alkohol sebidang. Berapa beda tinggi Hg pada kedua kaki pipa?
2. Kaki kiri dan kanan sebuah pipa U masing-masing berdiameter 3 cm dan 1,5 cm, mula-mula diisi air raksa ( $\rho_{\text{Hg}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$ ). Kemudian kaki kiri diisi alkohol (massa jenis  $0,8 \text{ g/cm}^3$ ), kaki kanan diisi bensin (massa jenisnya  $0,7 \text{ g/cm}^3$ ) setinggi 2 cm, sehingga tinggi air raksa di kaki kanan naik 1 cm. Hitunglah volume alkohol yang dituangkan!
3. Gaya sebesar 5 N pada pengisap yang kecil dari suatu pompa hidrolik dapat mengangkat beban yang beratnya 600 N pada pengisap yang besar. Jika pengisap yang kecil berpenampang  $400 \text{ cm}^2$ , berapakah luas penampang pengisap yang besar?

## 6. Hukum Archimedes

Jika suatu benda berada dalam bejana yang terisi zat cair diam maka gaya-gaya dengan arah horizontal akan saling menghapuskan sehingga resultan gaya = 0. Sedangkan gaya-gaya dengan arah vertikal yang bekerja pada benda antara lain gaya berat benda, gaya berat zat cair, gaya tekan ke atas (gaya Archimedes), dan gaya Stokes.

Di laboratorium sekolahmu tentunya terdapat neraca pegas bukan! Perhatikan gambar 7.11! Coba kamu gantungkan beban (misal bongkahan batu) pada ujung neraca pegas! Amati berat beban tersebut. Setelah itu celupkan ke dalam air dengan beban tetap tergantung pada neraca pegas! Amati lagi berat yang terbaca pada neraca pegas! Bandingkan dengan hasil pengamatan sebelumnya!

Ternyata  $F_1$  lebih besar dari  $F_2$  bukan! Mengapa ini terjadi?  $F_2$  lebih kecil dari  $F_1$  karena balok mendapat gaya ke atas yang dilakukan oleh zat cair. Besarnya gaya ke atas ini dirumuskan dalam Hukum Archimedes.



Gambar 7.11 Zat cair memberikan gaya ke atas pada batu

Hukum Archimedes menyatakan bahwa semua benda yang dimasukkan sebagian atau seluruhnya ke dalam zat cair akan mendapat gaya ke atas dari zat cair tersebut sebesar berat zat cair yang dipindahkan.

Untuk memahami hukum Archimedes tersebut, perhatikan gambar 7.12 di bawah!

Volume zat cair yang terdesak sama dengan volume benda yang tercelup =  $V_c$ .

Berat zat cair yang terdesak:

$$w_c = m_c \cdot g$$

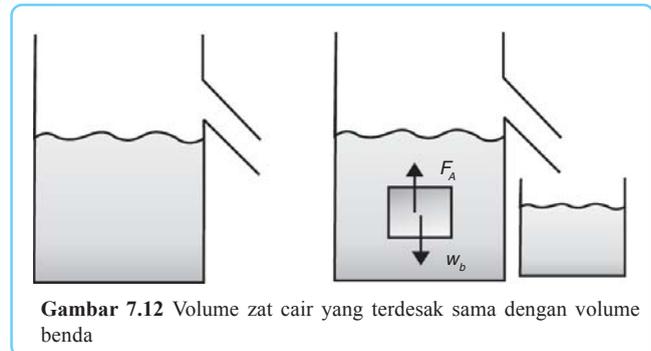
$$= \rho_c \cdot V_c \cdot g$$

Gaya ke atas  $F_A$  sama dengan berat zat cair yang terdesak:

$$\text{Jadi } F_A = w_c$$

$$F_A = \rho_c \cdot V_c \cdot g$$

Melanjutkan pembahasan kita mengenai hukum Archimedes, kita akan mempelajari keadaan benda yang dimasukkan ke dalam zat cair.



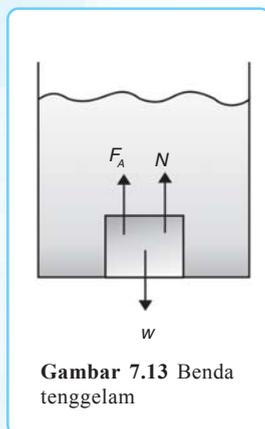
Gambar 7.12 Volume zat cair yang terdesak sama dengan volume benda

Tiga keadaan benda yang berada dalam zat cair yaitu sebagai berikut.

a. Tenggelam

Tenggelam

Perhatikan gambar berikut!



Gambar 7.13 Benda tenggelam

Dalam keadaan setimbang  $\Sigma F = 0$ , sehingga

$$F_A + N - w = 0, N = \text{gaya normal}$$

$$F_A = w - N \text{ sehingga } F_A < w$$

Benda tercelup seluruhnya maka  $V_b = V_c$  dari

$$F_A < w, w = m_b \cdot g = \rho_b \cdot g \cdot V_b$$

$$\rho_c \cdot g \cdot V_c < \rho_b \cdot g \cdot V_b$$

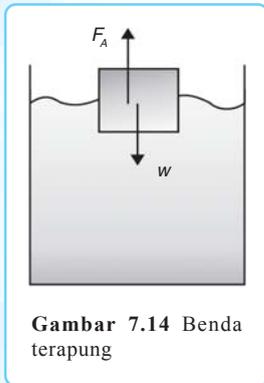
$$\rho_c < \rho_b$$

Jadi, benda tenggelam dalam zat cair jika massa jenis benda ( $\rho_b$ ) lebih besar daripada massa jenis zat cair ( $\rho_c$ ).

**Keterangan:**

- $\rho_b$  : massa jenis benda ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_c$  : massa jenis zat cair ( $\text{kg/m}^3$ )
- $w$  : berat benda di udara (N)
- $w_c$  : berat benda di dalam zat cair (N)
- $F_A$  : gaya ke atas (N)
- $V_b$  : volume benda ( $\text{m}^3$ )
- $V_c$  : volume zat cair ( $\text{m}^3$ )

## b. Benda Terapung



Gambar 7.14 Benda terapung

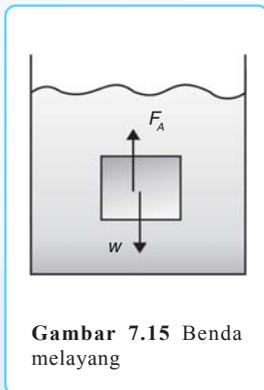
Benda tercelup sebagian, volume zat cair yang terdesak ( $V_c$ ) < volume benda ( $V_b$ ). Pada keadaan setimbang maka  $\Sigma F = 0$ .

$$\begin{aligned} F_A - w &= 0 \\ F_A &= w \\ \rho_c \cdot g \cdot V_c &= \rho_b \cdot g \cdot V_b \end{aligned}$$

Karena  $V_c < V_b$  maka  $\rho_c < \rho_b$

Jadi, benda terapung dalam zat cair jika massa jenis zat cair = massa jenis benda.

## c. Benda Melayang



Gambar 7.15 Benda melayang

Benda tercelup seluruhnya dalam zat cair volume zat cair terdesak ( $V_c$ ) = volume benda ( $V_b$ ).

Pada keadaan setimbang  $\Sigma F = 0$ .

$$\begin{aligned} F_A - w &= 0 \\ F_A &= w \\ \rho_c \cdot g \cdot V_c &= \rho_b \cdot g \cdot V_b \end{aligned}$$

Karena  $V_c = V_b$  maka  $\rho_c = \rho_b$

Jadi, benda melayang dalam zat cair jika  $\rho_b = \rho_c$ .

## Balon Udara

Kita baru saja membahas konsep hukum Archimedes. Contoh penerapan hukum Archimedes antara lain: jembatan ponton, kapal laut, kapal selam, dan hidrometer. Selain penerapan hukum Archimedes di atas, hukum Archimedes juga diterapkan pada sistem balon udara. Untuk memahami prinsip kerja balon udara maka perhatikan gambar di samping!

Pada keadaan setimbang  $\Sigma F = 0$ .

$$\begin{aligned} F_A - w_{gas} - w_{balon} &= 0 \\ F_A &= w_{gas} + w_{balon} + w_{beban} \\ F_A &= \rho_u \cdot g \cdot V_{balon} \end{aligned}$$

di mana

$$w_{gas} = \rho_{gas} \cdot g \cdot V_{gas}$$

## Terapung

## Melayang

## Balon Udara



Gambar 7.16 Balon udara memanfaatkan gaya ke atas oleh udara

Sebuah balon udara dapat naik karena adanya gaya ke atas yang dilakukan oleh udara. Balon udara diisi dengan gas yang lebih ringan dari udara misalnya  $H_2$  dan He sehingga balon terapung di udara. Balon akan naik jika gaya ke atas  $F_A > w_{tot}$ . Besarnya gaya naik balon adalah:

$$F = F_A - w_{tot}$$

$$F_A = \rho_{ud} \cdot g \cdot V_{balon} \quad \text{dan} \quad w_{tot} = w_{balon} + w_{gas} + w_{beban}$$

Maka:

$$w_{gas} = \rho_{gas} \cdot g \cdot V_{balon} \quad \dots (7.7)$$

**Keterangan:**

$F_A$  : gaya ke atas (N)

$F$  : gaya naik (N)

$\rho_{gas}$  : massa jenis gas pengisi balon ( $kg/m^3$ )

$\rho_{ud}$  : massa jenis udara =  $1,3 \text{ kg/m}^3$

$w$  : berat (N)

$V$  : volume ( $m^3$ )

Setelah mempelajari teori di atas, latihan berikut ini akan membantumu memahami hukum Archimedes.



## Kerja Kelompok

*Kerjakan soal-soal berikut bersama kelompokmu!*

1. Sepotong logam beratnya di udara 4 N. Bila logam ini dibenamkan dalam zat cair, beratnya tinggal 2,5 N. Berapakah gaya tekan ke atas yang diderita benda?
2. Sebatang kayu yang massa jenisnya  $0,6 \text{ g/cm}^3$  terapung di dalam air. Jika bagian kayu yang ada di atas permukaan air  $0,2 \text{ m}^3$ , tentukan volume kayu seluruhnya!
3. Sebuah kubus dari kayu (massa jenisnya  $0,8 \text{ g/cm}^3$ ), mula-mula dibenamkan ke dalam bejana kemudian dilepas sehingga naik ke permukaan gliserin (massa jenisnya  $1,25 \text{ g/cm}^3$ ) dan ternyata  $200 \text{ cm}^3$  dari kayu tersebut berada di permukaan gliserin. Tentukan:
  - a. gaya ke atas kayu pada saat masih berada seluruhnya dalam gliserin,
  - b. gaya naik,
  - c. gaya ke atas setelah benda setimbang,
  - d. rusuk kubus.
4. Sebuah balon udara mengalami gaya naik 2.450 N. Berat total balon 4.050 N. Tentukan gaya ke atas dan diameter balon udara tersebut!

## 7. Hukum Stokes

Gaya gesek antara permukaan benda padat yang bergerak dengan fluida akan sebanding dengan kecepatan relatif gerak benda ini terhadap fluida. Hambatan gerak benda di dalam fluida disebabkan oleh gaya gesek antara bagian fluida yang melekat ke permukaan benda dengan bagian fluida di sebelahnya. Gaya gesek itu sebanding dengan koefisien viskositas ( $\eta$ ) fluida. Menurut Stokes, gaya gesek adalah:

$$F_s = 6 \pi r \eta v \quad \dots (7.8)$$

**Keterangan:**

$F_s$  : gaya gesek (N)

$r$  : jari-jari benda (m)

$v$  : kecepatan jatuh dalam fluida (m/s)

Persamaan di atas dikenal sebagai **hukum Stokes**. Penentuan  $\eta$  dengan menggunakan hukum Stokes dapat dilakukan dengan percobaan kelereng jatuh.

Sewaktu kelereng dijatuhkan ke dalam bejana kaca yang berisi cairan yang hendak ditentukan koefisien viskositasnya, kecepatan kelereng semakin lama semakin cepat. Sesuai dengan hukum Stokes, makin cepat gerakannya, makin besar gaya geseknya. Hal ini menyebabkan gaya berat kelereng tepat setimbang dengan gaya gesek dan kelereng jatuh dengan kecepatan tetap sebesar  $v$  sehingga berlaku persamaan:

$$\begin{aligned} w &= F_s \\ m \cdot g &= 6 \pi r \eta v \end{aligned} \quad \frac{4}{3} \quad \dots (7.9)$$

Pada kelereng juga bekerja gaya Archimedes sebesar berat cairan yang dipindahkan, yaitu:

$$F_A = \rho_c g V = \rho_c g \pi r^3$$

**Keterangan:**

$V$  : volume kelereng ( $m^3$ )

$\rho_c$  : massa jenis cairan ( $kg/m^3$ )

Ketika di SMP kamu telah mengetahui bahwa massa benda dapat dinyatakan dalam volume dan massa jenis, yaitu:

$$m = \rho_b V = \rho_b \cdot \pi r^3$$

### Hukum Stokes

Dengan mensubstitusikan persamaan di atas ke persamaan 7.9 kita peroleh:

$$w = F_s + F_A$$

$$w - F_A = F_s$$

$$m \cdot g - \rho_c \cdot g \cdot \pi r^3 = 6 \pi r \eta v$$

$$\rho_b \cdot \pi r^3 \cdot g - \rho_c \cdot g \cdot \pi r^3 = 6 \pi r \eta v$$

$$\pi r^3 \cdot g (\rho_b - \rho_c) = 6 \pi r \eta v$$

$$r^2 \cdot g (\rho_b - \rho_c) = 6 \eta v$$

$$\eta = \frac{r^2 g (\rho_b - \rho_c)}{6 v} \quad \dots (7.10)$$

Persamaan 7.10 disebut persamaan viskositas fluida. Sedangkan persamaan kecepatannya adalah sebagai berikut.

$$v = \frac{r^2 g (\rho_b - \rho_c)}{6 \eta} \quad \dots (7.11)$$

Penerapan persamaan viskositas fluida biasa digunakan untuk menentukan kekentalan minyak pelumas. Pemakaian minyak pelumas dengan kekentalan yang sesuai akan menjadikan mesin lebih awet.

## B. Fluida Dinamik

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa ada dua macam fluida, yaitu fluida statik dan fluida dinamik. Fluida statik telah kita pelajari pada pembahasan sebelumnya. Sedangkan fluida dinamik akan kita pelajari berikut ini.

**Fluida dinamik** adalah fluida yang bergerak. Tiga hal yang mendasar untuk menyederhanakan pembahasan fluida dinamik adalah sebagai berikut.

1. Fluida dianggap tidak kompresibel.
2. Fluida dianggap bergerak tanpa gesekan walaupun ada gerakan materi (tidak mempunyai kekentalan).
3. Aliran fluida adalah aliran stasioner, yaitu kecepatan dan arah gerak partikel fluida yang melalui suatu titik tertentu selalu tetap.

**Fluida  
Dinamik**

Dalam fluida dinamik dikenal istilah-istilah berikut.

## 1. Debit

Fluida dinamik selalu mengalir dengan kecepatan tertentu. Misalnya suatu fluida dinamik mengalir dalam pipa yang luas penampangnya  $A$  dengan kecepatan  $v$ . Volume fluida tiap satuan waktu yang mengalir dalam pipa disebut **debit**. Secara matematis dinyatakan dengan rumus berikut.

### Debit

$$Q = \dots (7.12)$$

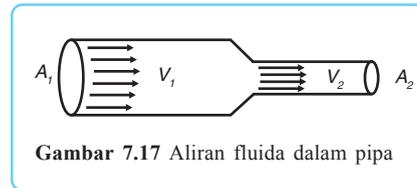
Karena  $V = A \cdot s$  maka persamaan debit menjadi:

$$Q = \dots \text{ dan } v = \dots \text{ maka } Q = A \cdot v \dots (7.13)$$

Penentuan debit suatu fluida, misalnya air terjun, biasa digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Air. Dengan mengetahui debit air terjun, dapat diketahui besar energi kinetiknya. Energi kinetik tersebut kemudian diubah menjadi energi listrik yang dialirkan ke rumah-rumah penduduk.

## 2. Persamaan Kontinuitas

Perhatikan gambar 7.17 di samping! Fluida pada gambar 7.17 mengalir dalam pipa yang luas penampang kedua ujungnya berbeda.

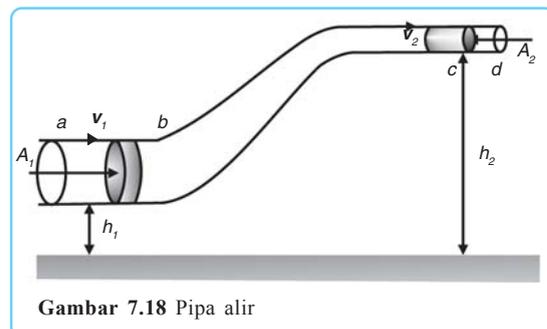


Gambar 7.17 Aliran fluida dalam pipa

Partikel fluida yang semula di  $A_1$  setelah  $\Delta t$  berada di  $A_2$ . Karena  $\Delta t$  kecil dan alirannya stasioner maka banyaknya fluida yang mengalir di tiap tempat dalam waktu yang sama akan sama pula.

$$\begin{aligned} m_{A_1} &= m_{A_2} \\ \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t &= \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \\ A_1 \cdot v_1 &= A_2 \cdot v_2 \end{aligned}$$

Bagaimana dengan pipa yang memiliki penampang berbeda dan terletak pada ketinggian yang berbeda? Perhatikan gambar 7.18 di samping!  $A_1$  adalah penampang lintang tabung alir di  $a$ .  $A_2$  adalah penampang lintang di  $c$ .  $v_1$  adalah kecepatan alir fluida di  $a$  dan  $v_2$  adalah kecepatan alir fluida di  $c$ .



Gambar 7.18 Pipa alir

Partikel-partikel yang semula di  $a$ , dalam waktu  $\Delta t$  sekon berpindah ke  $b$ . Demikian pula partikel yang semula di  $c$  berpindah ke  $d$ . Apabila  $\Delta t$  sangat kecil maka jarak  $a - b$  sangat kecil, sehingga luas penampang di  $a$  dan  $b$  boleh dianggap sama, yaitu  $A_1$ . Demikian pula jarak  $c - d$

sangat kecil, sehingga luas penampang di  $c$  dan  $d$  dapat dianggap sama, yaitu  $A_2$ . Banyaknya fluida yang masuk ke tabung alir dalam waktu  $\Delta t$  sekon adalah  $\rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t$  dan dalam waktu yang sama sejumlah fluida meninggalkan tabung alir sebanyak  $\rho \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$ . Jumlah ini sama dengan jumlah fluida yang masuk ke tabung alir, sehingga:

$$\rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$$

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad \dots (7.14)$$

Persamaan 7.14 dinamakan **persamaan kontinuitas**.

$A \cdot v$  yang merupakan debit fluida sepanjang tabung alir selalu konstan (tetap sama nilainya), walaupun  $A$  dan  $v$  masing-masing berbeda dari tempat yang satu ke tempat yang lain. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa:

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{konstan}$$

Bila  $A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \cdot \rho = m$  maka selama  $\Delta t$  massa sebanyak  $m$  dianggap telah berpindah dari  $A_1$  ke  $A_2$ . Kecepatannya berubah dari  $v_1$  menjadi  $v_2$  jika ketinggiannya berubah dari  $h_1$  menjadi  $h_2$ . Oleh karena itu elemen massa  $m$  telah mengalami tambahan energi sebesar:

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$\Delta E = m(v_2^2 - v_1^2) + mg(h_2 - h_1)$$

$$\Delta E = m v_2^2 - m v_1^2 + mgh_2 - mgh_1 \quad \dots (7.15)$$

Hal ini merupakan akibat dari adanya gaya dorong di  $A_1$  dari zat cair yang ada di sebelah kiri dengan arah ke kanan. Walaupun ada juga gaya penghambat dari sebelah kanan  $A_2$ . Kerja total dari gaya-gaya ini adalah:

$$W = F_1 s_1 - F_2 s_2$$

$$W = P_1 A_1 v_1 \Delta t - P_2 A_2 v_2 \Delta t$$

$$W = \rho A_1 v_1 \Delta t - \rho A_2 v_2 \Delta t$$

$$W = m - m$$

$$W = (P_1 - P_2) \quad \dots (7.16)$$

## Persamaan Kontinuitas

### 3. Hukum Bernoulli

Hukum Bernoulli merupakan persamaan pokok fluida dinamik dengan arus tetap atau *streamline*. Di sini berlaku hubungan antara tekanan, kecepatan alir, dan tinggi tempat dalam satu garis lurus. Hubungan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

### Hukum Bernoulli

Perhatikan kembali gambar 7.18! Jika tekanan  $P_1$  ke kanan pada penampang  $A_1$  dari fluida di sebelah kirinya maka gaya yang dilakukan terhadap penampang di  $a$  adalah  $P_1 A_1$ . Sedangkan penampang di  $c$  mendapat gaya dari fluida di kanannya sebesar  $P_2 A_2$ , dengan  $P_2$  adalah tekanan terhadap penampang di  $c$  ke kiri. Dalam waktu  $\Delta t$  sekon dapat dianggap bahwa fluida di penampang  $a$  tergeser sejauh  $v_1 \Delta t$  dan fluida di penampang  $c$  tergeser sejauh  $v_2 \Delta t$  ke kanan.

Jadi usaha yang dilakukan terhadap  $a$  adalah:  $P_1 A_1 v_1 \Delta t$  sedangkan usaha yang dilakukan pada  $c$  sebesar:  $-P_2 A_2 v_2 \Delta t$ .

Usaha total yang dilakukan gaya-gaya tersebut besarnya:

$$\begin{aligned} W_{tot} &= (P_1 A_1 v_1 - P_2 A_2 v_2) \Delta t \\ W_{tot} &= P_1 A_1 v_1 \Delta t - P_2 A_2 v_2 \Delta t \\ W_{tot} &= \rho A_1 v_1 \Delta t - \rho A_2 v_2 \Delta t \\ W_{tot} &= m - m \end{aligned} \quad \dots (7.17)$$

Dalam waktu  $\Delta t$  sekon fluida dalam tabung alir  $a - b$  bergeser ke  $c - d$  dan mendapat tambahan energi sebesar:

$$\begin{aligned} E_m &= \Delta E_k + \Delta E_p \quad \left( \frac{\rho}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \right) \\ E_m &= \quad \quad \quad + (mgh_2 - mgh_1) \\ E_m &= \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + mg (h_2 - h_1) \end{aligned} \quad \dots (7.18)$$

Dari hukum kekekalan energi diketahui bahwa perubahan energi mekanik sama dengan usaha.

$$\begin{aligned} E_m &= W \\ m v_2^2 - m v_1^2 + mgh_2 - mgh_1 &= m - m \end{aligned}$$

Apabila setiap ruas dibagi dengan  $m$  kemudian dikalikan dengan  $\rho$  akan diperoleh persamaan:

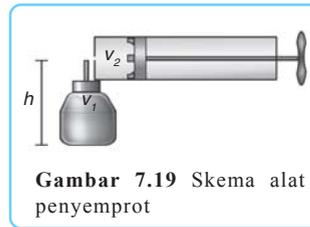
$$\begin{aligned} v_2^2 - v_1^2 + g h_2 - g h_1 &= - \\ + v_2^2 + g h_2 &= + v_1^2 + g h_1 \\ \rho v_2^2 + \rho g h_2 &= \rho v_1^2 + \rho g h_1 \end{aligned}$$

atau  $P + \rho v^2 + \rho g h = \text{konstan} \quad \dots (7.19)$

Persamaan 7.19 dikenal sebagai hukum Bernoulli. Contoh penggunaan hukum Bernoulli antara lain sebagai berikut.

**a. Alat Penyemprot Nyamuk**

Persamaan Bernoulli dapat diterapkan pada prinsip alat semprot obat pembasmi nyamuk cair. Perhatikan gambar 7.19 di samping!



Gambar 7.19 Skema alat penyemprot

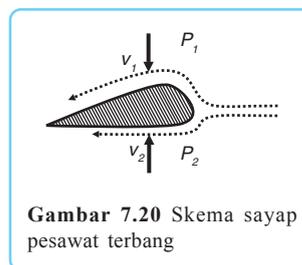
Obat nyamuk cair mula-mula diam sehingga  $v_1 = 0$ , sedangkan udara bergerak dengan kecepatan  $v_2$  karena didorong oleh pengisap. Tekanan  $P_1$  sama dengan  $P_2$  yaitu tekanan udara luar. Sehingga persamaan Bernoulli menjadi:

$$\begin{aligned}
 P_1 + \rho v_1^2 + \rho g h_1 &= P_2 + \rho v_2^2 + \rho g h_2 \\
 0 + \rho g h_1 &= \rho v_2^2 + \rho g h_2 \\
 g h_1 &= v_2^2 + g h_2 \\
 g (h_1 - h_2) &= v_2^2 \\
 g h &= v_2^2 \quad \dots (7.20)
 \end{aligned}$$

Dengan demikian cairan obat nyamuk akan naik setinggi  $h$  dan tersemprot karena pengaruh kecepatan  $v_2$ .

**b. Gaya Angkat Sayap Pesawat Terbang**

Pernahkah kamu bertanya-tanya mengapa pesawat terbang dapat terbang? Mengapa bentuk sayap pesawat selalu seperti itu? Selain karena gaya dorong mesin, sebuah pesawat dapat terbang karena adanya penerapan hukum Bernoulli pada sayap pesawat. Bentuk sayap pesawat terbang sedemikian rupa sehingga garis arus aliran udara yang melalui sayap adalah tetap (*streamline*).



Gambar 7.20 Skema sayap pesawat terbang

Penampang sayap pesawat terbang mempunyai bagian belakang yang lebih tajam dan sisi bagian yang atas lebih melengkung daripada sisi bagian bawahnya. Bentuk ini menyebabkan kecepatan aliran udara di bagian atas lebih besar daripada di bagian bawah ( $v_2 > v_1$ ).

Dari persamaan Bernoulli kita dapatkan:

$$P_1 + \rho \cdot v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \rho \cdot v_2^2 + \rho g h_2$$

Ketinggian kedua sayap dapat dianggap sama ( $h_1 = h_2$ ), sehingga  $\rho g h_1 = \rho g h_2$ . Dengan demikian, persamaan di atas dapat ditulis:

$$P_1 + \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \rho \cdot v_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot v_2^2 - \rho \cdot v_1^2$$

$$P_1 - P_2 = \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Pada persamaan di atas dapat dilihat bahwa jika  $v_2 > v_1$  kita dapatkan  $P_1 > P_2$  untuk luas penampang sayap  $F_1 = P_1 A$  dan  $F_2 = P_2 A$ , kita dapatkan bahwa  $F_1 > F_2$ . Selisih gaya pada bagian bawah dan bagian atas sayap ( $F_1 - F_2$ ) menghasilkan gaya angkat pada pesawat terbang. Dengan demikian, gaya angkat pesawat terbang dirumuskan sebagai:

$$F_1 - F_2 = \rho A (v_2^2 - v_1^2) \quad \dots (7.21)$$

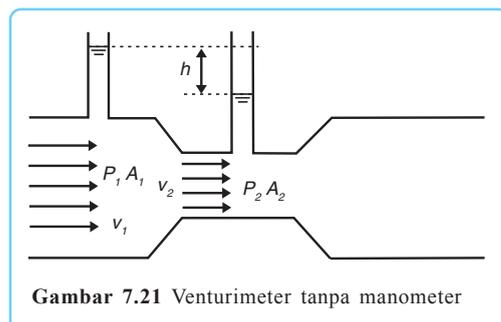
### c. Venturimeter

**Venturimeter** adalah alat yang digunakan untuk menentukan kecepatan aliran zat cair. Dengan memasukkan venturimeter ke dalam aliran fluida, kecepatan aliran fluida dapat dihitung menggunakan persamaan Bernoulli berdasarkan selisih ketinggian air atau selisih ketinggian raksa.

Venturimeter ada dua macam, yaitu venturimeter tanpa manometer dan venturimeter dengan manometer. Mari kita bahas satu persatu!

#### 1) Venturimeter tanpa Manometer

Perhatikan gambar 7.21 di samping! Air dengan massa jenis  $\rho$  mengalir memasuki pipa berpenampang besar dengan kecepatan  $v_1$  menuju pipa berpenampang kecil dengan kecepatan  $v_2$  dimana  $v_2 > v_1$ . Ketika air dialirkan, terjadi perbedaan ketinggian air ( $h$ ) pada kedua pipa vertikal. Dalam hal ini berlaku  $h_1 = h_2$  sehingga  $\rho g h_1 = \rho g h_2$ .



Gambar 7.21 Venturimeter tanpa manometer

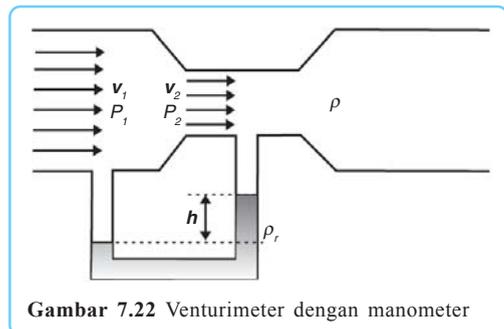
Persamaan Bernoulli pada venturimeter adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P_1 + \rho v_1^2 + \rho g h_1 &= P_2 + \rho v_2^2 + \rho g h_2 \\
 P_1 + \rho v_1^2 &= P_2 + \rho v_2^2 \\
 P_1 - P_2 &= \rho v_2^2 - \rho v_1^2 \\
 \Delta P &= \rho (v_2^2 - v_1^2) \\
 \rho g h &= \rho (v_2^2 - v_1^2) \\
 g h &= (v_2^2 - v_1^2) \dots (7.22)
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan kontinuitas  $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$  untuk mendapatkan hubungan antara  $v_2$  dan  $v_1$  maka  $v_1$  dapat dihitung.

## 2) Venturimeter dengan Manometer

Perhatikan gambar 7.22! Sebuah manometer air raksa dipasang pada kedua pipa venturimeter. Air dengan massa jenis  $\rho$  mengalir memasuki pipa berpenampang besar dengan kecepatan  $v_1$  menuju pipa berpenampang kecil dengan kecepatan  $v_2$  di mana  $v_2 > v_1$ . Ketika air dialirkan terjadi perbedaan ketinggian ( $h$ ) raksa dengan massa jenis  $\rho_r$  pada kedua pipa manometer. Dalam hal ini berlaku  $h_1 = h_2$  sehingga  $\rho g h_1 = \rho g h_2$ .



Gambar 7.22 Venturimeter dengan manometer

Pada venturimeter tersebut berlaku persamaan Bernoulli sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P_1 + \rho v_1^2 + \rho g h_1 &= P_2 + \rho v_2^2 + \rho g h_2 \\
 P_1 + \rho v_1^2 &= P_2 + \rho v_2^2 \\
 P_1 - P_2 &= \rho v_2^2 - \rho v_1^2 \\
 \Delta P &= \rho (v_2^2 - v_1^2) \\
 (\rho_r - \rho) g h &= \rho (v_2^2 - v_1^2) \dots (7.23)
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan kontinuitas  $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$  maka  $v_1$  dapat dihitung.

**d. Pipa Pitot**

Pipa pitot digunakan untuk mengukur kecepatan aliran fluida dalam pipa. Biasanya pipa ini digunakan untuk mengukur laju fluida berbentuk gas. Pipa pitot dilengkapi dengan manometer yang salah satu kakinya tegak lurus aliran fluida sehingga  $v_2 = 0$ . Ketika air mengalir terjadi perbedaan ketinggian ( $h$ ) raksa dengan massa jenis  $\rho_r$  pada kedua pipa manometer. Dalam hal ini berlaku  $h_1 = h_2$  sehingga  $\rho g h_1 = \rho g h_2$ . Persamaan Bernoulli pada pipa pitot adalah sebagai berikut.

$$P_1 + \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$P_1 + \rho v_1^2 = P_2$$

$$P_1 + \rho v_1^2 = P_1 + \rho_r g h$$

$$\rho v_1^2 = \rho_r g h$$

Dengan demikian kecepatan aliran fluida dalam pipa pitot adalah:

$$v_1 = \sqrt{\frac{\rho_r g h}{\rho}} \dots (7.24)$$

**e. Menara Air**

Menara air merupakan bak penampungan air dengan keran air yang dapat memancarkan air melalui sebuah lubang, baik di dasar maupun di ketinggian tertentu. Kecepatan air di permukaan ( $v_1$ ) sama dengan nol karena air diam tidak mengalir.  $P_1 = P_2 =$  tekanan udara luar. Selisih ketinggian air di permukaan ( $h_1$ ) dengan air di dasar ( $h_2$ ) =  $h$ .

Persamaan Bernoulli pada menara air sebagai berikut.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$0 + \rho g h_1 = \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

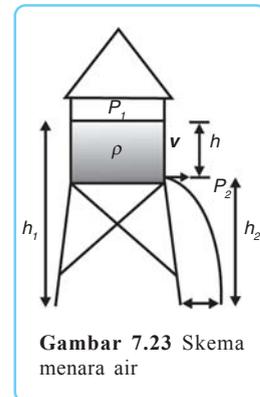
$$g h_1 = v_2^2 + g h_2$$

$$g h_1 - g h_2 = v_2^2$$

$$v_2^2 = g (h_1 - h_2)$$

$$v_2^2 = g h$$

$$v_2 = \sqrt{g h} \dots (7.25)$$



Persamaan tersebut tidak lain adalah persamaan gerak jatuh bebas. Jarak jatuhnya fluida diukur dari titik proyeksi lubang air dihitung menggunakan persamaan gerak lurus beraturan, yaitu:

$$X = v_2 \cdot t$$

Sedangkan waktu jatuh fluida:

$$h = g t^2$$

$$t =$$

Agar lebih mudah memahami fluida dinamik, pelajarylal dengan cermat contoh soal di bawah ini!

### Contoh Soal

1. Sebuah tangki terbuka berisi air setinggi  $H$ . Pada jarak  $h$  dari permukaan air dibuat sebuah lubang kecil, sehingga air memancar dari lubang itu. Berapa jauh air yang keluar dari tangki mengenai tanah?

**Penyelesaian:**

Persamaan Bernoulli:

$$P_1 + \rho v_1^2 + \rho g H = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g (H - h)$$

$$\rho g H = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g (H - h)$$

$$\rho v_2^2 = \rho g H - \rho g (H - h)$$

$$v_2^2 = g H - g (H - h)$$

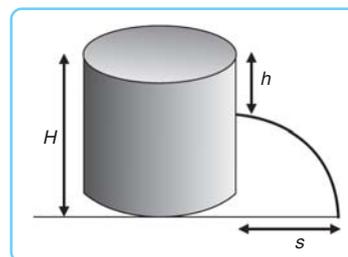
$$v_2^2 = g (H - H + h)$$

$$v_2 =$$

Gerak jatuh bebas:

$$h = g t^2$$

$$t =$$



Gerak lurus beraturan arah mendatar:

$$s = v \cdot t$$

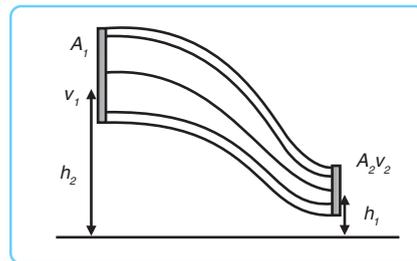
$$s = \sqrt{2gh}$$

$$s = \sqrt{4h(H-h)}$$

2. Air mengalir melalui sebuah pipa yang berbentuk corong. Garis tengah lubang corong tempat air masuk 30 cm, sedangkan garis tengah lubang corong tempat air keluar 15 cm. Letak pusat lubang pipa yang kecil lebih rendah 60 cm daripada pusat lubang yang besar. Kecepatan aliran air dalam pipa itu 140 liter/s, sedangkan tekanannya pada lubang yang besar 77,5 cm Hg. Berapakah tekanannya pada lubang yang kecil?

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $r_1 = 15 \text{ cm}$   
 $r_2 = 7,5 \text{ cm}$   
 $(h_1 - h_2) = 60 \text{ cm}$   
 $P_1 = 77,5 \text{ cm Hg}$   
 $Q_2 = 140 \text{ L/s}$



Ditanyakan:  $P_2 = \dots$

Jawab:

$$Q_2 = A_2 v_2$$

$$140 = \pi (7,5)^2 v_2$$

$$v_2 = \frac{140 \cdot 1000}{\pi (7,5)^2} = 793 \text{ cm/s}$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\pi (15)^2 v_1 = \pi (7,5)^2 793$$

$$v_1 = 198 \text{ cm/s}$$

$$P_1 + \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$P_2 = P_1 + \rho v_1^2 + \rho g h_1 - \rho v_2^2 - \rho g h_2$$

$$P_2 = P_1 + \rho (v_1^2 - v_2^2) + \rho g (h_1 - h_2)$$

$$P_2 = 77,5 + (198^2 - 793^2) + 980 (60)$$

$$P_2 = 59,9 \text{ cm Hg}$$

### 3. Viskositas

Fluida yang riil memiliki gesekan internal yang besarnya tertentu dan disebut viskositas. Viskositas ada pada zat cair maupun gas, dan pada intinya merupakan gaya gesek antara lapisan-lapisan yang bersisian pada fluida pada waktu lapisan-lapisan tersebut bergerak antarkeduaanya.

Pada zat cair, viskositas tersebut disebabkan oleh gaya kohesi, yaitu gaya tarik-menarik antarmolekul-molekul sejenis. Pada gas, viskositas muncul dari tumbukan antarmolekul. Terutama dalam arus turbulen, viskositas ini naik sangat cepat.

Ketika seorang penerjun jatuh kecepatannya bertambah. Keadaan tersebut berimplikasi pada bertambahnya gaya viskositas udara yang arahnya ke atas. Pada suatu saat, gaya tahan ke atas ini akan menjadi sama dengan beratnya, sehingga penerjun mencapai kecepatan yang konstan yang bergantung pada berat dan ukuran parasutnya. Kecepatan ini disebut kecepatan terminal.

Adapun besar gaya viskositas dan kecepatan terminal dirumuskan:

$$F_s = 6 \pi r v \eta \quad \text{dan} \quad v = \frac{2r^2(\rho_b - \rho_f)g}{9\eta}$$

**Keterangan:**

$F_s$  : gaya hambat (N)

$\eta$  : koefisien viskositas (Pa.s)

$r$  : jari-jari bola (m)

$v$  : kecepatan konstan atau terminal (m/s)

$g$  : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

$\pi$  : 3,14 atau

$\rho_b$  : massa jenis benda (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_f$  : massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)

$$\frac{2 \cdot (10^{-2})^2 \cdot 10}{9 \cdot 1,4}$$

Untuk memantapkan pemahamanmu, pelajailah contoh soal di bawah ini kemudian kerjakan latihan di bawahnya!

**Contoh Soal**

Sebuah kelereng dengan massa jenis 7.000 kg/m<sup>3</sup> dan berjari-jari 1 cm dijatuhkan dalam gliserin yang memiliki massa jenis 5.000 kg/m<sup>3</sup> dengan koefisien viskositas 1,4 Pa.s. Bila percepatan gravitasi 10 m/s<sup>2</sup>, maka tentukan kecepatan terminal kelereng!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\rho_b = 7.000 \text{ kg/m}^3$

$\rho_f = 5.000 \text{ kg/m}^3$

$\eta = 1,4 \text{ Pa.s}$

$r = 1 \text{ cm} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

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

Ditanyakan:  $v = \dots ?$

Jawab:

$$v = \frac{2r^2(\rho_b - \rho_f)g}{9\eta} = \frac{2 \cdot (10^{-2})^2 \cdot 10}{9 \cdot 1,4} = (7.000 - 5.000) = 0,317 \text{ m/s}$$

**Viskositas**



Gambar 7.24 Kelereng yang bergerak dalam tabung yang berisi oli



## Kerja Mandiri 2

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

Sebuah bola gotri dengan massa jenis  $12.000 \text{ kg/m}^3$  dan berdiameter 4 cm dimasukkan dalam gliserin yang memiliki massa jenis  $5.000 \text{ kg/m}^3$  dengan koefisien viskositas  $1,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Bila percepatan gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$ , tentukan kecepatan terminal bola gotri tersebut!



## Rangkuman

1. Tekanan adalah gaya tiap satuan luas penampang, dirumuskan:

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

2. Tekanan hidrostatis adalah tekanan pada kedalaman tertentu zat cair yang tidak mengalir, besarnya adalah:

$$P_h = \rho g h$$

3. Hukum Pascal berbunyi bahwa tekanan yang diderita oleh zat cair akan diteruskan oleh zat cair itu ke segala arah dengan ~~sama~~ besarnya.

=

$\frac{A_1}{A_2}$

4. Gaya hidrostatis dirumuskan sebagai berikut.

$$F_h = P_h \cdot A = \rho \cdot g \cdot h \cdot A = \rho \cdot g \cdot V$$

5. Pipa U dapat digunakan untuk menghitung massa jenis suatu zat cair.
6. Hukum Archimedes menyatakan bahwa suatu benda yang dicelupkan ke dalam zat cair akan mendesak zat cair seberat benda yang dicelupkan.
7. Gaya ke atas yang dialami benda besarnya:

$$F_A = \rho_c \cdot V_b \cdot g$$

8. Gaya tekan ke atas sebesar selisih berat benda di udara dengan berat benda di dalam zat cair adalah:

$$F_A = w_u - w_c$$

9. Gaya gesek fluida dikenal sebagai hukum Stokes.

$$F_s = 6 \pi r \eta v$$

10. Persamaan viskositas fluida adalah sebagai berikut.

$$\eta = r^2 g$$

11. Persamaan kecepatan terminal adalah sebagai berikut:

$$v = \frac{2}{9} r^2 g$$

12. Persamaan kontinuitas adalah  $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$

13. Hukum Bernoulli adalah sebagai berikut:

atau 
$$P_1 + \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$P + \rho v^2 + \rho g h = \text{konstan}$$

$$\left( \frac{2\rho_B = \rho_E}{\eta} \right)$$



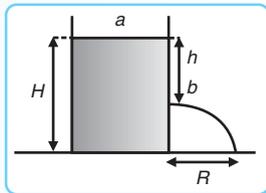
## Soal-soal Uji Kompetensi

### A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Sebatang jarum yang panjangnya 10 cm diletakkan pelan-pelan di atas permukaan bensin. Jarum terapung di permukaan bensin dan tepat akan tenggelam. Massa jenis jarum  $\rho = 3,92 \text{ g/cm}^3$ , tegangan muka bensin pada suhu tersebut  $= \gamma = 0,0314 \text{ N/m}$ . Jika  $\pi = 3,14$  dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$  maka radius jarum adalah . . . .

- 3 mm
- 4 mm
- 5 mm
- 6 mm
- 1 mm

2. Pada sebuah tangki air terdapat sebuah lubang pada jarak  $h$  di bawah permukaan air dalam tangki, seperti ditunjukkan oleh gambar. Kecepatan air memancar keluar dari titik  $b$  adalah . . . .



- 
- 
- 
- 
- 

3. Sebuah bola dari logam dijatuhkan ke dalam suatu zat cair kental. Sesuai dengan hukum Stokes maka bola akan mendapat gaya gesek ke atas yang besarnya dirumuskan sebagai  $F = 6 \pi \eta r v$ . Dimensi koefisien kekentalan  $\eta$  adalah . . . .

- $\text{ML}^{-1} \text{T}^2$
- $\text{ML}^{-1} \text{T}$
- $\text{ML}^{-1} \text{T}^{-1}$
- $\text{ML}^2 \text{T}^{-1}$
- $\text{ML}^2 \text{T}^{-2}$

4. Sebuah pipa kapiler dimasukkan tegak lurus dalam air. Diameter pipa = 0,5 mm. Bila permukaan air naik 6 cm di dalam pipa, berapakah tegangan permukaan air?  $g = 980 \text{ cm/s}^2$ .

- 75,3 dyne/cm
- 73,5 dyne/cm
- 72,5 dyne/cm
- 72 dyne/cm
- 71 dyne/cm

5. Sebuah gelembung sabun terbentuk pada pipa yang dihubungkan dengan sebuah manometer air. Bila tegangan permukaan gelembung sabun = 25 dyne/cm dan garis tengah gelembung = 2 mm, berapakah selisih tinggi permukaan air di dalam manometer?  $g = 980 \text{ cm/s}^2$ .

$$\sqrt{\frac{2\gamma}{\rho g h}}$$

- 1 mm
- 1,01 mm
- 1,02 mm
- 1,03 mm
- 1,04 mm

6. Sebuah pipa horizontal yang penampang lintangnya  $25 \text{ cm}^2$  mempunyai penguncupan yang penampang lintangnya  $5 \text{ cm}^2$ . Jika air yang melalui pipa besar mempunyai kecepatan 1,75 m/s maka kecepatan air yang melalui penguncupan adalah . . . .

- 8 m/s
- 8,5 m/s
- 8,75 m/s
- 9 m/s
- 9,5 m/s

7. Sebuah pesawat terbang yang beratnya 350 kgf mempunyai sayap yang luasnya 11 m<sup>2</sup>. Untuk menahan pesawat itu dalam penerbangannya mendatar, di kedua sisi sayapnya diperlukan selisih tekanan . . . .

- 0,001 kgf/cm<sup>2</sup>
- 0,002 kgf/cm<sup>2</sup>
- 0,003 kgf/cm<sup>2</sup>
- 0,004 kgf/cm<sup>2</sup>
- 0,005 kgf/cm<sup>2</sup>

8. Minyak yang massa jenisnya 0,8 g/cm<sup>3</sup> melalui sebuah pipa yang berbentuk corong. Penampang lintang lubang corong masuk 500 cm<sup>2</sup> dan penampang lintang lubang corong keluar 100 cm<sup>2</sup>. Letak pusat lubang corong yang kecil 50 cm lebih rendah daripada pusat lubang yang besar. Kecepatan aliran dalam pipa 100 liter/s. Jika tekanan pada lubang yang besar 77 cm Hg maka tekanan pada lubang yang kecil . . . .

- 50 cm Hg
- 50,5 cm Hg
- 51 cm Hg
- 51,1 cm Hg
- 52 cm Hg

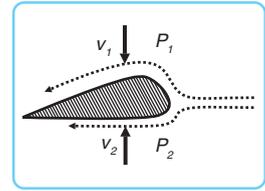
9. Permukaan air di dalam sebuah tangki berada 1,2 m di atas pusat sebuah lubang pada dinding tangki. Luas penampang lubang itu 5 cm<sup>2</sup>, tetapi waktu meninggalkan lubang itu arus

menguncup menjadi      dari ukuran

lubang sendiri. Banyaknya air yang keluar tiap sekon . . . .

- 1 liter
- 1,2 liter
- 1,5 liter
- 1,6 liter
- 1,7 liter

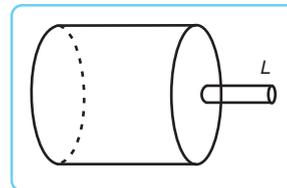
10. Perhatikan gambar berikut. Agar sayap pesawat terbang dapat mengangkat pesawat maka syaratnya . . . .



- $P_1 = P_2$  dan  $V_1 = V_2$
- $P_1 < P_2$  dan  $V_1 > V_2$
- $P_1 < P_2$  dan  $V_1 < V_2$
- $P_1 > P_2$  dan  $V_1 > V_2$
- $P_1 > P_2$  dan  $V_1 < V_2$

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

1. Perhatikan gambar berikut!



Berapa kecepatan air yang dipancarkan melalui lubang  $L$ , jika tekanan terhadap air  $10^6$  Pa, tekanan udara luar  $10^5$  Pa, dan kecepatan air dalam reservoir boleh diabaikan?

2. Sebuah pipa panjang memiliki penampang berbeda pada empat bagian. Luas penampang pipa berturut-turut pada bagian 1, bagian 2, dan bagian 3 adalah 150 cm<sup>2</sup>, 100 cm<sup>2</sup>, dan 50 cm<sup>2</sup>. Laju aliran air pada bagian 1 adalah 8 m/s. Sedangkan pada bagian 4 adalah 4,8 m/s. Tentukanlah:

- debit air melalui keempat penampang itu,
- luas penampang pada bagian 4,
- laju air pada bagian 2 dan 3.

3. Air mengalir dalam suatu pipa. Di suatu tempat, laju air adalah 3 m/s, sedangkan di tempat lain yang terletak 1 meter lebih tinggi, laju air adalah 4 m/s. Hitung:

$\frac{2}{3}$

- a. tekanan air di tempat yang tinggi bila tekanan air di tempat yang rendah  $2 \cdot 10^4$  Pa,
  - b. tekanan air di tempat yang tinggi bila air dalam pipa berhenti dan tekanan air di tempat yang rendah  $1,8 \cdot 10^4$  Pa.
4. Tiap sayap sebuah pesawat terbang memiliki luas penampang  $25 \text{ m}^2$ . Jika kelajuan udara bagian bawah sayap adalah  $50 \text{ m/s}$  dan pada bagian atasnya  $70 \text{ m/s}$ , tentukanlah berat

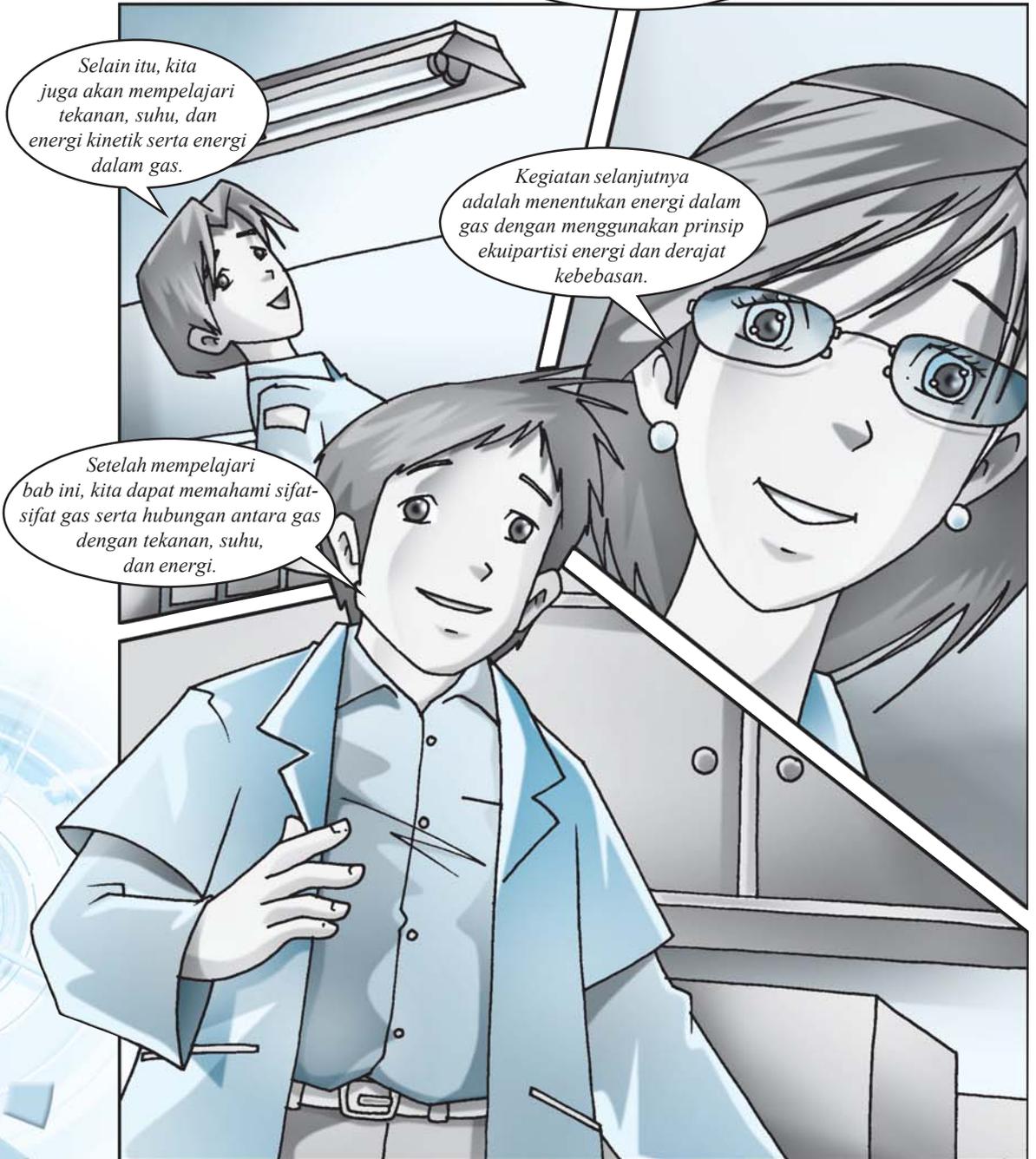
pesawat itu! (anggap pesawat terbang mendarat pada kelajuan tetap pada ketinggian di mana massa jenis udara sama dengan 1)

5. Debit air yang melalui sebuah pipa air adalah  $5.000 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Kelajuan air pipa utama dan pipa menyempit venturimeter masing-masing  $3 \text{ m/s}$  dan  $5 \text{ m/s}$ . Jika massa jenis air  $1 \text{ g/cm}^3$ , dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , tentukan beda tekanan air antara kedua pipa tersebut!

# BAB

# 8

## TEORI KINETIK GAS





Gambar 8.1 Balon berisi gas

**M**engapa balon bisa meletus? Balon bisa meletus karena dua hal, yaitu adanya kenaikan suhu dan kenaikan tekanan gas dalam balon. Apabila balon kita letakkan di bawah sinar matahari dalam jangka waktu yang cukup lama maka balon akan meletus. Hal ini disebabkan oleh suhu gas dalam balon meningkat, sehingga tekanan gas dalam balon juga meningkat. Hal yang sama juga akan terjadi apabila kita memompa balon terus-menerus. Gas akan menekan dinding balon terus-menerus seiring dengan kenaikan tekanannya, sehingga volume balon terus meningkat. Pada saat dinding balon tidak dapat lagi menahan tekanan gas, balon akan meletus. Berikut ini akan kita pelajari lebih lanjut tentang tekanan, suhu, dan volume gas.

**Kata Kunci:** Gas Ideal – Hukum Boyle-Gay Lussac – Tekanan – Suhu – Energi Kinetik Gas

## A. Teori Gas Ideal

Peristiwa meletusnya balon di atas terkait dengan hubungan tekanan, suhu, dan volume gas. Untuk mempermudah pemahaman, mari kita gunakan pendekatan dengan teori kinetik gas.

Teori kinetik adalah teori yang menjelaskan perilaku sistem-sistem fisis dengan menganggap bahwa sistem-sistem fisis tersebut terdiri atas sejumlah besar molekul yang bergerak sangat cepat. **Teori kinetik gas** adalah teori kinetik yang digunakan untuk menjelaskan sifat-sifat atau

**Teori  
Kinetik Gas**

kelakuan suatu gas. Teori kinetik gas tidak mengutamakan kelakuan sebuah partikel, tetapi meninjau sifat zat secara keseluruhan sebagai hasil rata-rata kelakuan partikel tersebut.

Partikel-partikel gas dapat bergerak sangat bebas dan dapat mengisi seluruh ruangan yang ditempatinya. Hal ini menimbulkan kesulitan dalam mempelajari sifat-sifat gas. Untuk menyederhanakan permasalahan ini diambil pengertian tentang gas ideal. Dalam kehidupan nyata gas ideal tidak pernah ada. Sifat-sifat gas pada tekanan rendah dan suhu kamar mendekati sifat-sifat gas ideal, sehingga gas tersebut dapat dianggap sebagai gas ideal. **Sifat-sifat gas ideal** adalah sebagai berikut.

1. Gas terdiri atas partikel dalam jumlah banyak yang disebut molekul.
2. Partikelnya bergerak secara acak atau sembarang.
3. Tidak ada gaya tarik-menarik antara partikel satu dengan partikel lain.
4. Jika partikel menumbuk dinding atau partikel lain, tumbukan dianggap lenting (elastis) sempurna.
5. Selang waktu tumbukan antara satu partikel dengan partikel lain berlangsung sangat singkat.
6. Jarak antarpartikel lebih besar daripada ukuran partikel.
7. Hukum Newton tentang gerak tetap berlaku.

Kondisi suatu gas ditentukan oleh faktor tekanan, suhu, dan volume. Dalam proses isotermik (suhu tetap), tekanan gas ideal berbanding terbalik dengan volumenya atau perkalian antara tekanan dengan volume adalah konstan (tetap).

Pernyataan tersebut dikenal dengan **hukum Boyle** dan dirumuskan sebagai berikut.

$$P \cdot V = \text{konstan (suhu tidak berubah)}$$

atau

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad \dots (8.1)$$

**Keterangan:**

$P_1$  : tekanan mutlak awal gas dalam ruang ( $\text{N/m}^2$  atau  $P_a$ )

$P_2$  : tekanan mutlak akhir gas dalam ruang ( $\text{N/m}^2$  atau  $P_a$ )

$V_1$  : volume mula-mula gas dalam ruang ( $\text{m}^3$ )

$V_2$  : volume akhir dalam ruang ( $\text{m}^3$ )

Pada keadaan standar 1 mol gas menempati volume sebesar  $22.400 \text{ cm}^3$ . Sedangkan jumlah molekul dalam 1 mol =  $6,02 \times 10^{23}$  molekul yang disebut bilangan Avogadro ( $N_A$ ). Pada keadaan standar jumlah molekul dalam tiap-tiap  $\text{cm}^3$  adalah:

$$\frac{6,02 \times 10^{23}}{22.400} = 2,68 \times 10^{19} \text{ molekul/cm}^3$$

## Sifat-sifat Gas Ideal

## Hukum Boyle

Banyaknya mol untuk suatu gas tertentu adalah hasil bagi antara jumlah molekul dalam gas itu dengan bilangan Avogadro. Secara matematis banyaknya mol suatu gas dapat dirumuskan:

$$n = \frac{N}{N_A} \quad \dots (8.2)$$

**Keterangan:**

$n$  : jumlah mol gas (mol)

$N$  : jumlah molekul

$N_A$  : bilangan Avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$  molekul/mol)

Jika terdapat  $n$  mol gas, persamaan untuk gas ideal menjadi:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \dots (8.3)$$

**Keterangan:**

$R$  : konstanta umum gas, nilainya  $8,3144$  joule/mol =  $0,0821$  atm.liter/mol.K

Dari persamaan 8.2 dan 8.3 diperoleh:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = N \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T \quad \dots (8.4)$$

Berdasarkan persamaan 8.4 didapatkan persamaan gas ideal yang dinyatakan dalam jumlah partikel. Secara matematis persamaan gas ideal dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$P \cdot V = N \cdot k \cdot T \quad \dots (8.5)$$

**Keterangan:**

$k$  : tetapan Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$  : suhu mutlak (K)

Jumlah mol suatu gas juga dapat diperoleh dari perbandingan antara massa gas itu ( $m$ ) dengan massa molekulnya ( $M_r$ ). Secara matematis jumlah mol suatu gas dapat dirumuskan:

$$n = \frac{m}{M_r} \quad \dots (8.6)$$

## Persamaan Gas Ideal

Dengan mensubstitusikan persamaan 8.6 ke persamaan 8.3 diperoleh:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

atau

$$P = \frac{m}{M} \cdot \frac{R \cdot T}{V} \quad \dots (8.7)$$

Karena  $m$  merupakan massa jenis ( $\rho$ ) maka persamaan 8.7 menjadi:

$$P = \rho \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

$$P = \rho \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T} \quad \dots (8.8)$$

Dari persamaan 8.8, terlihat jelas bahwa rapat gas atau massa jenis gas tergantung dari tekanan, suhu, dan massa molekulnya.

Gas dengan massa tertentu menjalani suatu proses sehingga perbandingan antara hasil kali tekanan dan volume dengan suhu mutlaknya adalah konstan. Jika proses berlangsung dari keadaan I ke keadaan II maka dapat dinyatakan bahwa

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{M \cdot T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{M \cdot T_2}$$

... (8.9)

Persamaan ini sering disebut dengan **hukum Boyle-Gay Lussac**.

Pada pembahasan di atas, kita telah mengenal istilah tekanan konstan dan volume konstan. Hal-hal tersebut mempunyai istilah lain yang lebih ringkas. Istilah **isobarik** digunakan untuk tekanan konstan, **isokhorik** atau **isometrik** untuk volume konstan, dan **isotermik** atau **isotermal** untuk suhu konstan. Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh soal berikut! Selanjutnya kerjakan soal di bawahnya bersama kelompokmu!

### Hukum Boyle-Gay Lussac

#### Contoh Soal

- Sebuah tangki berisi 8 kg gas oksigen berada pada tekanan 5 atm. Bila oksigen dipompa keluar lalu diganti dengan 5,5 kg gas karbon dioksida pada suhu yang sama, berapa tekanannya?

**Penyelesaian:**

$$\text{Diketahui: } M_{\text{O}_2} = 8 \text{ kg}$$

$$P_1 = 5 \text{ atm}$$

$$M_{\text{CO}_2} = 5,5 \text{ kg}$$

$$M_{O_2} = 32$$

$$M_{CO_2} = 44$$

Ditanyakan:  $P_2 = \dots ?$

Jawab:

$$M_{O_2} = 32 \rightarrow n_{O_2} = \frac{8.000}{32} = 250 \text{ mol}$$

$$M_{CO_2} = 44 \rightarrow n_{CO_2} = \quad = 125 \text{ mol}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_1 V_1 = n_1 R T_1 \\ P_2 V_2 = n_2 R T_2 \end{array} \right\} T_1 = T_2 \text{ dan } V_1 = V_2$$

Sehingga

=

$$P_2 = P_1 \cdot$$

$$P_2 = 5 \cdot$$

$$P_2 = 2,5 \text{ atm}$$

2. Satu mol air mempunyai massa 10 kg. Berapakah jarak rata-rata antarmolekul pada tekanan  $1,01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  dan pada suhu 500 K?

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $m = 10 \text{ kg}$

$$M_r = 18$$

$$P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T = 500 \text{ K}$$

Ditanyakan:  $r = \dots ?$

Jawab:

Langkah 1: Menentukan volume air

$$P V = n R T$$

$$V = \quad = \quad = 2,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Langkah 2: Menentukan volume tiap molekul

$$V_m = \frac{2,28 \cdot 10^{-3} \cdot 18.000}{6,02 \cdot 10^{23}} = 6,82 \cdot 10^{-26} \text{ m}^3$$

Langkah 3: Menentukan jarak antarmolekul jika molekul dianggap seperti bola

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$6,82 \cdot 10^{-26} = \frac{4}{3} \cdot 3,14 r^3$$

$$r^3 = 1,6275 \cdot 10^{-23}$$

$$r = 2,53 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$



## Kerja Kelompok

*Kerjakan bersama kelompokmu!*

1. Udara kering  $100 \text{ cm}^3$  pada tekanan  $1 \text{ atm}$  dan suhu  $27^\circ \text{C}$  dimampatkan pada tekanan  $5 \text{ atm}$ , kemudian dipanaskan pada suhu  $77^\circ \text{C}$ . Berapakah volume udara kering sekarang?
2. Dalam eksperimen untuk menentukan massa jenis karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ),  $411 \text{ cm}^3$  gas  $\text{CO}_2$  dikumpulkan. Ternyata massa gas hanya  $0,78 \text{ gram}$ . Berapakah massa jenis gas  $\text{CO}_2$ ?
3. Tentukan volume  $4,0 \text{ gram}$  gas oksigen ( $M = 32 \text{ kg/kmol}$ ) pada keadaan normal  $1 \text{ atm}$ ,  $25^\circ \text{C}$ !
4. Sebuah tabung bervolume  $40 \text{ cm}^3$  berisi setetes nitrogen cair bermassa  $2 \text{ mg}$  pada suhu yang rendah. Tabung kemudian ditutup rapat. Jika tabung dipanaskan sampai  $27^\circ \text{C}$ , berapakah tekanan nitrogen dalam tabung? Nyatakan dalam atmosfer! ( $M$  nitrogen =  $28 \text{ kg/kmol}$ )
5. Sebuah tangki yang volumenya  $0,056 \text{ m}^3$  berisi  $\text{O}_2$  yang tekanan mutlaknya  $16 \times 10^7 \text{ dyne/cm}^2$  dan suhunya  $27^\circ \text{C}$ .
  - a. Berapa massa  $\text{O}_2$  di dalam tangki tersebut?
  - b. Berapakah volume gas tersebut jika mengembang hingga tekanannya menjadi  $10^6 \text{ dyne/cm}^2$  dan suhunya menjadi  $50^\circ \text{C}$ ?

## B. Tekanan, Suhu, dan Energi Kinetik Gas

Perhatikan ban sepeda pada gambar 8.2 di samping! Mengapa ban sepeda setelah dipompa dapat mengembang? Ban sepeda mengembang karena diisi dengan gas. Molekul-molekul gas selalu bergerak dan memenuhi ruang. Akibatnya dinding dalam ban mendapat tekanan dari gas.



Gambar 8.2 Gas di dalam ban menjadikan ban mengembang

### 1. Tekanan Gas

Tekanan gas dihasilkan karena pergerakan molekul gas. Misalnya molekul gas bermassa  $m$  bergerak dengan kecepatan  $v$  menumbuk dinding. Momentum yang dimiliki molekul sebelum tumbukan adalah:

$p = m \cdot v$

Gas dianggap sebagai gas ideal, sehingga tumbukan yang terjadi adalah tumbukan lenting sempurna. Besar momentum molekul setelah tumbukan adalah:

$p = -m \cdot v$

Tanda negatif ( $-$ ) menunjukkan perubahan arah molekul setelah terjadi tumbukan.

Perubahan momentum molekul sebelum dan setelah tumbukan dinyatakan sebagai berikut.

$$\Delta p = p_{\text{akhir}} - p_{\text{awal}} = -m \cdot v - m \cdot v = -2m \cdot v$$

Waktu yang diperlukan molekul untuk menempuh jarak  $r$  dari dinding satu ke dinding lain adalah:

$$\Delta t = \frac{2r}{v}$$

Dari pembelajaran sebelumnya diketahui bahwa impuls = perubahan momentum. Secara matematis pernyataan tersebut dapat dituliskan:

$$F \cdot \Delta t = \Delta p$$
$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Di kelas X kita telah mempelajari tekanan. Kamu tentu ingat bahwa tekanan adalah gaya tiap satu-satuan luas yang dirumuskan:

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

Dengan memasukkan persamaan  $F = \dots$  ke dalam persamaan di atas diperoleh besar tekanan gas ideal sebagai berikut.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot v^2}{r^3} \dots (8.10)$$

**Keterangan:**

$V$  : volume ruang ( $m^3$ )

Persamaan 8.10 hanya digunakan untuk satu molekul. Jika dalam ruang tertutup terdapat  $N$  jumlah molekul maka untuk mempermudah perumusan digunakan koordinat kartesius tiga dimensi. Dengan demikian, kecepatan molekul dinyatakan sebagai berikut.

$$\vec{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \dots (8.11)$$

Kita tinjau kecepatan pada arah  $X$ . Misalnya jika komponen kecepataannya  $v_{jx}$  maka kecepatan rata-rata pada arah  $X$  adalah:

$$\dots (8.12)$$

Kecepatan rata-rata molekul pada arah  $X, Y,$  dan  $Z$  dirumuskan sebagai berikut.

$$v_{rms}^2 = (v_x^2)_{rms} + (v_y^2)_{rms} + (v_z^2)_{rms} \dots (8.13)$$

Teori ekuipartisi menyatakan bahwa besar kecepatan rata-rata pada arah  $X, Y,$  dan  $Z$  adalah sama.

$$(v_x^2)_{rms} = (v_y^2)_{rms} = (v_z^2)_{rms} \dots (8.14)$$

Dengan demikian persamaan 8.13 menjadi:

$$v_{rms}^2 = (v_x^2)_{rms} + (v_y^2)_{rms} + (v_z^2)_{rms} = 3(v_x^2)_{rms} \dots (8.15)$$

Jika kita meninjau pada arah  $X$  maka persamaan 8.12 menjadi:

$$(v_x^2)_{rms} = \dots (8.16)$$

Dari persamaan 8.10 dan 8.16 diperoleh persamaan tekanan gas untuk  $N$  molekul adalah:

$$P = \dots \cdot m \cdot \dots (8.17)$$

## 2. Energi Kinetik Gas



Gambar 8.3 Angin yang dihasilkan kipas akan mendorong balon

Pernahkah kamu melihat orang berlomba memasukkan balon ke gawang menggunakan kipas? Angin yang dihasilkan oleh kipas akan mendorong balon menuju gawang. Semakin kuat dorongan yang kita berikan, balon akan melaju semakin cepat. Dari peristiwa ini diperoleh hubungan antara tekanan dengan kecepatan gas yang memengaruhi energi kinetik gas.

Energi kinetik rata-rata molekul gas adalah sebagai berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{rms}}^2 \quad \dots (8.18)$$

Besar tekanan gas apabila dinyatakan dengan energi kinetik adalah:

$$P = \frac{2}{3} n \cdot m \cdot v_{\text{rms}}^2 \cdot \frac{1}{3}$$

$$P = \frac{2}{3} n \cdot 2E_k \cdot \frac{1}{3}$$

$$P = \frac{2}{3} n \cdot E_k$$

$$\left( \frac{2}{3} n \cdot E_k \right) \quad (8.19)$$

## 3. Hubungan Antara Energi Kinetik dengan Suhu dan Kecepatan Rata-rata

Hubungan antara energi kinetik gas dan suhu dapat diperoleh dari persamaan 8.5 dan 8.19. Secara matematis hubungan tersebut dapat dituliskan:

$$P \cdot V = N \cdot k \cdot T$$

$$\frac{2}{3} n \cdot E_k \cdot V = N \cdot k \cdot T$$

$$\frac{2}{3} E_k = k \cdot T$$

$$E_k = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_k}{k}$$

... (8.20)

## Energi Kinetik Gas

### Sebaiknya Tahu

#### Hebatnya Tekanan Udara



Gambar 8.4 Bola logam

Suatu peristiwa monumental pernah dilakukan untuk membuktikan hebatnya tekanan udara luar. Pasangan bola logam berongga berbentuk setengah bola ditangkupkan sambil dipanaskan. Tujuannya agar ruang di dalam bola logam hampa udara. Apa yang terjadi? Belahan bola logam tidak dapat dilepas.

Hal itu disebabkan udara luar menekan dinding logam untuk mengisi bagian dalam bola yang bertekanan sangat rendah. Tekanan udara luar sebesar 1 atmosfer terlalu besar bagi ruang dalam bola yang hampir hampa udara.

Suhu gas dinyatakan dalam energi kinetik rata-rata partikel adalah:

## Suhu Gas

$$T = \frac{2}{3} \frac{m \cdot v_{rms}^2}{k} \quad \dots (8.21)$$

Dari persamaan 8.18 dan 8.20 diperoleh kecepatan rata-rata molekul sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \frac{2}{3} \cdot m \cdot v_{rms}^2 &= \frac{2}{3} \cdot k \cdot T \\ m \cdot v_{rms}^2 &= 3 \cdot k \cdot T \\ v_{rms}^2 &= \frac{3kT}{m} \\ v_{rms} &= \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \dots (8.22) \end{aligned}$$

atau

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \dots (8.23)$$

Pada suhu yang sama, kecepatan dua macam gas dapat dinyatakan dengan rumus:

$$v_{rms1} : v_{rms2} = \sqrt{\frac{1}{M_{r1}}} : \sqrt{\frac{1}{M_{r2}}} \quad \dots (8.24)$$

**Keterangan:**

$v_{rms1}$  : kecepatan molekul gas 1 (m/s)

$v_{rms2}$  : kecepatan molekul gas 2 (m/s)

$M_{r1}$  : massa molekul gas 1 (kg)

$M_{r2}$  : massa molekul gas 2 (kg)

$$\frac{v_{rms1}}{v_{rms2}} = \sqrt{\frac{M_{r2}}{M_{r1}}}$$

Sedangkan pada gas yang sama dengan suhu yang berbeda, perbandingan kecepatan kedua gas dinyatakan dengan rumus:

$$v_{rms1} : v_{rms2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} :$$

## 4. Energi Dalam Gas Ideal

Energi dalam gas ideal berasal dari energi kinetik molekul gas. Energi dalam adalah jumlah energi kinetik translasi, energi kinetik rotasi, dan energi getaran molekul. Untuk menentukan energi dalam gas, kita harus memahami prinsip ekuipartisi energi dan derajat kebebasan.

## Energi Dalam

### a. Prinsip ekuipartisi energi

Dari persamaan sebelumnya kita ketahui bahwa energi kinetik rata-rata molekul adalah:

$$E_k = \frac{1}{2} k T$$

Persamaan di atas berlaku untuk semua gas. Misalnya kita mempunyai satu wadah yang berisi berbagai macam gas. Energi kinetik rata-rata molekul di dalam wadah adalah sama, meskipun jenis molekul gasnya berbeda. Hal ini merupakan salah satu gambaran mengenai **prinsip ekuipartisi energi**.

Pada pembahasan tekanan gas, telah kita pelajari bahwa besar kecepatan rata-rata pada arah X, Y, dan Z adalah sama. Secara matematis dapat dirumuskan:

$$(v_x^2)_{\text{rms}} = (v_y^2)_{\text{rms}} = (v_z^2)_{\text{rms}}$$

Seperti telah disebutkan sebelumnya, besar kecepatan rata-rata molekul adalah:

$$v_{\text{rms}}^2 = 3(v_x^2)_{\text{rms}} = 3(v_y^2)_{\text{rms}} = 3(v_z^2)_{\text{rms}}$$

$$(v_x^2)_{\text{rms}} = v_{\text{rms}}^2$$

Jika kita tinjau energi kinetik rata-rata molekul pada arah X, besar kecepatan pada arah X adalah  $(v_x^2)_{\text{rms}}$ , sehingga besar energi kinetiknya adalah:

$$E_k = m (v_x^2)_{\text{rms}} = m \cdot$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{rms}}^2 \quad \dots (8.25)$$

Hal ini menunjukkan bahwa energi kinetik rata-rata molekul pada masing-masing komponen arah kecepatan adalah sepertiga dari total energi kinetik rata-rata.

### b. Derajat Kebebasan

Apa yang dimaksud dengan **derajat kebebasan**? Untuk memahami derajat kebebasan perlu kita ingat kembali pelajaran sebelumnya tentang energi kinetik rata-rata molekul pada masing-masing komponen arah. Energi kinetik ini disebut juga energi kinetik translasi, karena diperoleh dari gerak translasi molekul. Besar energi kinetik translasi adalah:

$$E_k = \frac{1}{2} k \cdot T = 3 \quad \dots (8.26)$$

$\left(\frac{1}{2} k \cdot T\right)$  adalah energi kinetik masing-masing komponen.

Dari persamaan 8.26 muncul faktor pengali 3 yang berasal dari gerak translasi molekul pada arah X, Y, dan Z. Faktor pengali ini merupakan nilai derajat kebebasan gas monoatomik.

Dengan demikian, dapat kita simpulkan bahwa derajat kebebasan ( $f$ ) adalah kuantitas yang menentukan energi mekanik suatu molekul. Energi mekanik merupakan penjumlahan dari energi kinetik dan energi potensial. Pada gas ideal, energi potensial molekul diabaikan ( $E_p = 0$ ), sehingga energi mekanik gas ideal sama dengan energi kinetiknya.

$$\begin{aligned} E_m &= E_k + E_p \\ E_m &= E_k + 0 \\ E_m &= E_k \end{aligned} \quad \dots (8.27)$$

Selain gas monoatomik, kita juga mengenal gas diatomik dan poliatomik. Derajat kebebasan di antara gas-gas tersebut berbeda-beda. Gas monoatomik mempunyai 3 derajat kebebasan yang berasal dari gerak translasinya. Gas diatomik mempunyai 5 derajat kebebasan yang berasal dari 3 gerak translasi dan 2 gerak rotasi. Gas poliatomik mempunyai 6 derajat kebebasan yang berasal dari 3 gerak translasi dan 3 gerak rotasi.

Dengan demikian, persamaan 8.26 menjadi:

Pada gas diatomik:

$$E_k = 5 \left( \frac{1}{2} k \cdot T \right)$$

Pada gas poliatomik:

$$E_k = 6 \left( \frac{1}{2} k \cdot T \right)$$

Secara umum, energi kinetik dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$E_k = f \left( \frac{1}{2} k \cdot T \right) \quad \dots (8.28)$$

**Keterangan:**

$f$  : derajat kebebasan

### c. Energi Dalam

Telah kita ketahui bahwa energi dalam suatu gas ( $U$ ) berasal dari penjumlahan energi kinetik translasi, energi kinetik rotasi, dan energi kinetik getaran molekul. Dengan menggunakan persamaan 8.28, besar energi dalam gas untuk  $N$  molekul adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} U &= N \cdot E_k \\ U &= N \cdot f \left( \frac{1}{2} k \cdot T \right) \end{aligned} \quad \dots (8.29)$$

Pada gas monoatomik:

$$U = N \cdot 3 \left( \frac{1}{2} k \cdot T \right)$$

$$U = \frac{3}{2} N \cdot k \cdot T \quad \dots (8.30)$$

Pada gas diatomik:

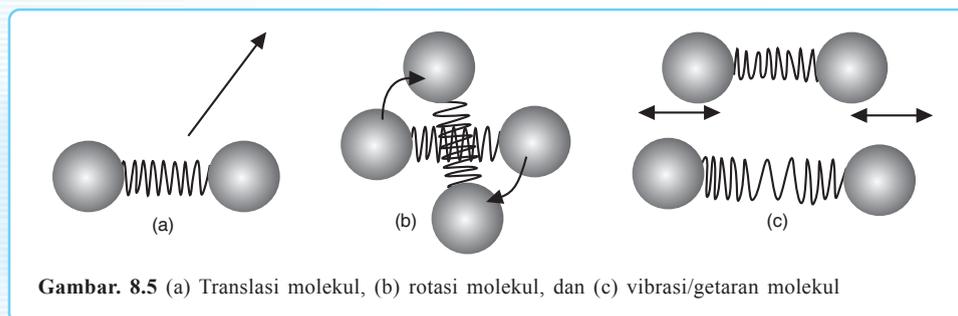
$$U = N \cdot 5$$

$$U = \frac{5}{2} N \cdot k \cdot T \quad \dots (8.31)$$

Pada gas poliatomik:

$$U = N \cdot 6$$

$$U = \frac{6}{2} N \cdot k \cdot T \quad \dots (8.32)$$



Gambar. 8.5 (a) Translasi molekul, (b) rotasi molekul, dan (c) vibrasi/getaran molekul

Untuk lebih memahami penjelasan di atas, perhatikan contoh soal berikut, kemudian kerjakan soal di bawahnya!

### Contoh Soal

Berapakah kecepatan rata-rata molekul gas oksigen pada  $0^\circ\text{C}$ , jika berat atom oksigen 16 dan massa sebuah atom oksigen  $1,66 \cdot 10^{-27}$  kg?

**Penyelesaian:**

$$\text{Diketahui: } k = 1,83 \cdot 10^{-23}$$

$$T = 273 \text{ K}$$

$$M_r O_2 = 32$$

$$m = 32 \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Ditanyakan:  $v_{\text{rms}} = \dots ?$

Jawab:

$$v =$$

$$=$$

$$v = 5,3 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$



## Kerja Berpasangan

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

- Gas hidrogen ( $M = 2 \text{ kg/kmol}$ ) dan gas oksigen ( $M = 32 \text{ kg/kmol}$ ) berada dalam suhu yang sama. Tentukan perbandingan berikut!
  - Energi kinetik hidrogen : energi kinetik oksigen.
  - Kecepatan rms hidrogen : kecepatan rms oksigen.
- Sebuah tangki yang memiliki volume  $0,3 \text{ m}^3$  mengandung 2 mol gas helium pada  $27^\circ\text{C}$ . Jika kita anggap helium sebagai gas ideal maka hitunglah:
  - energi dalam total dari sistem,
  - energi kinetik rata-rata per molekul

Petunjuk: energi dalam total =  $\frac{3}{2} NkT$  dengan  $N$  adalah banyak molekul atau partikel. Energi kinetik per molekul =  $kT$ .
- Pada suhu  $27^\circ\text{C}$  amonia bermassa 20 gram diubah menjadi energi kinetik. Carilah besar energi kinetik tersebut bila massa molekul dari gas amonia adalah  $17,03 \text{ gram/mol}$ !
- Hitunglah massa dan energi kinetik translasi dari gas helium yang bertekanan  $10^5 \text{ N/m}^2$  dan bertemperatur  $30^\circ\text{C}$  di dalam sebuah balon bervolume  $100 \text{ m}^3$ ! Massa molekul gas helium adalah  $4,003 \text{ gram/mol}$ .
- Berapakah momentum total dalam satu gram gas helium dalam tabung bersuhu  $27^\circ\text{C}$ ?  $M$  helium =  $4 \text{ g/mol}$ .



## Rangkuman

1. Hukum Boyle dirumuskan sebagai berikut.

$$P \cdot V = \text{konstan (suhu tidak berubah)}$$

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

2. Persamaan gas ideal:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

3. Hukum Boyle-Gay Lussac dirumuskan sebagai berikut.

$$P_1 \cdot T_1 = P_2 \cdot T_2$$

4. Tekanan gas ideal untuk satu molekul adalah:

$$P = \frac{m \cdot v^2}{V}$$

Tekanan gas ideal untuk  $N$  molekul dinyatakan sebagai berikut.

$$P = \frac{1}{3} \cdot \frac{N \cdot m \cdot v_{\text{rms}}^2}{V}$$

5. Energi kinetik rata-rata molekul gas adalah  $\frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{rms}}^2 \left( \frac{N}{V} \right)$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\text{rms}}^2$$

6. Kecepatan rata-rata molekul gas dapat ditentukan dengan persamaan:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}} \quad \text{atau} \quad v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_r}}$$

7. Energi dalam suatu gas berasal dari penjumlahan energi kinetik translasi, energi kinetik rotasi, dan energi kinetik getaran molekul.

Pada gas monoatomik

$$U = \frac{3}{2} N \cdot k \cdot T$$

Pada gas diatomik

$$U = N \cdot k \cdot T$$

Pada gas poliatomik

$$U = N \cdot k \cdot T$$



## Soal-soal Uji Kompetensi

### A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Suatu gas ideal pada tekanan atmosfer  $p$  dan suhu  $27^\circ\text{C}$  dimampatkan sampai volumenya setengah kali dari semula. Jika suhunya dinaikkan menjadi  $54^\circ\text{C}$ , berapakah tekanannya?
  - a.  $0,25 p$
  - b.  $0,54 p$
  - c.  $1 p$
  - d.  $2 p$
  - e.  $2,18 p$
2. Pada hukum Boyle  $P \cdot V = k$ ,  $k$  mempunyai dimensi . . . .
  - a. daya
  - b. usaha
  - c. momentum linear
  - d. suhu
  - e. konstanta pegas
3. Rapat massa (perbandingan massa dan volume) suatu gas ideal pada suhu  $T$  dan tekanan  $p$  adalah  $\rho$ . Jika tekanan gas tersebut dijadikan  $2p$  dan suhunya diturunkan menjadi  $0,5T \sqrt{2}$  maka rapat massa gas menjadi . . . .
  - a. 4
  - b. 2
  - c. 0,50
  - d. 0,25
  - e. 0,12
4. Suatu gas ideal pada 300 K dipanaskan dengan volume tetap, sehingga energi kinetik rata-rata dari molekul gas menjadi dua kali lipat. Pernyataan berikut ini yang tepat adalah . . .
  - a. Kecepatan rms rata-rata dari molekul menjadi dua kali.
  - b. Suhu berubah menjadi 600 K.
  - c. Momentum rata-rata dari molekul menjadi dua kali.
  - d. Suhu berubah menjadi 300 K.
  - e. Kecepatan rata-rata molekul menjadi dua kali.
5. Untuk melipatgandakan kecepatan rms molekul-molekul dalam suatu gas ideal pada 300 K, suhu sebaiknya dinaikkan menjadi . . . .
  - a. 327 K
  - b. 424 K
  - c. 600 K
  - d. 1.200 K
  - e. 90.000 K
6. Massa sebuah molekul nitrogen adalah empat belas kali massa sebuah molekul hidrogen. Dengan demikian, molekul-molekul nitrogen pada suhu 294 K mempunyai laju rata-rata yang sama dengan molekul-molekul hidrogen pada suhu . . . .
  - a. 10,5 K
  - b. 42 K
  - c. 21 K
  - d. 4116 K
  - e. 2058 K
7. Suatu gas bervolume  $0,5 \text{ m}^3$  perlahan-lahan dipanaskan pada tekanan tetap hingga volumenya menjadi  $2 \text{ m}^3$ . Jika usaha luar gas tersebut  $3 \times 10^5$  joule maka tekanan gas adalah . . . .
  - a.  $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
  - b.  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
  - c.  $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
  - d.  $8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
  - e.  $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
8. Besar energi dalam 4 mol gas monoatomik pada suhu  $127^\circ\text{C}$  adalah . . . ( $R = 8,31 \text{ J/mol K}$ ).
  - a. 6,332 J
  - b. 19,944 J
  - c. 24,825 J
  - d. 33,240 J
  - e. 34,327 J
9. Agar kecepatan efektif partikel gas menjadi 3 kali semula, suhunya harus ditingkatkan menjadi . . . semula.
  - a. sama
  - b. 1,5 kali
  - c. 6 kali
  - d. 9 kali
  - e. 12 kali

10. Sebuah tabung berisi gas monoatomik. Ke dalam tabung tersebut dipompakan gas yang sama sehingga tekanannya menjadi 3 kali semula. Besarnya perubahan energi dalam gas tersebut jika suhunya tetap adalah . . . .
- nol
  - 1,5 kali semula
  - 3 kali semula
  - 6 kali semula
  - 9 kali semula

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

- Dua liter gas pada suhu  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atm dimampatkan hingga volumenya menjadi 1 liter dan dipanaskan pada  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Berapakah tekanan akhir gas jika dinyatakan dalam atm?
- Berapakah energi kinetik dari translasi molekul-molekul dalam 10 gram amonia pada suhu  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Massa molekul amonia adalah  $17,03\text{ gram/mol}$ .

3. Suatu tabung berisi 4 liter  $\text{O}_2$  bertekanan 5 atm dan bersuhu  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jika  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  molekul/mol,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/k,  $1\text{ atm} = 10^5\text{ Pa}$ , dan  $A_r \text{O}_2 = 16$ .

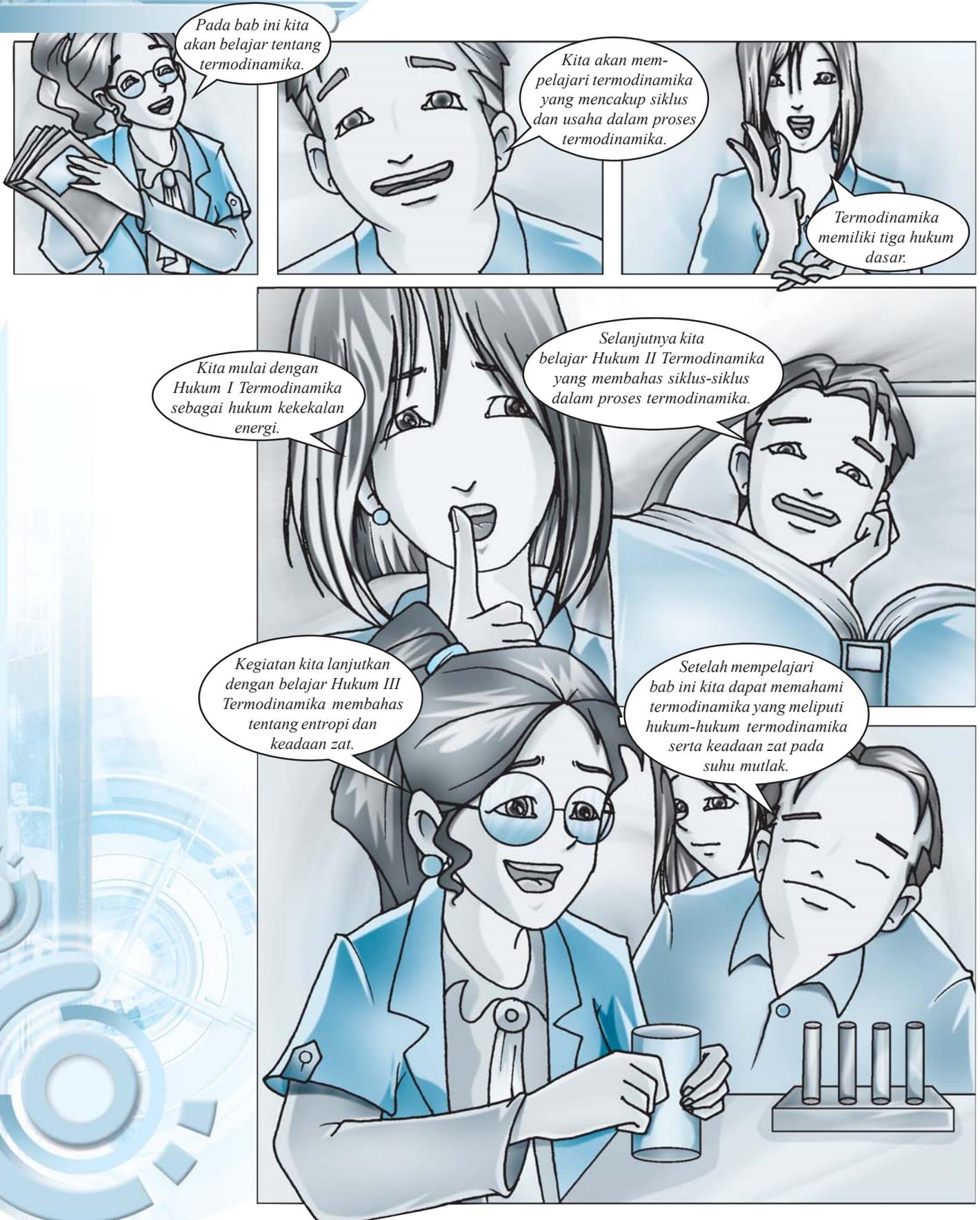
Hitung:

- banyaknya molekul gas dalam tabung,
  - massa gas  $\text{O}_2$  dalam tabung.
- Jarak rata-rata antartumbukan molekul-molekul karbon dioksida pada kondisi standar adalah  $6,29 \times 10^{-4}\text{ cm}$ . Berapakah selang waktu tumbukan molekul-molekul di atas? Massa jenis karbon dioksida pada keadaan standar adalah  $1,977\text{ kg/m}^3$ .
  - Pada suhu berapakah kecepatan molekul zat asam sama dengan molekul hidrogen pada suhu  $27^{\circ}\text{C}$ ? Massa molekul zat asam  $32\text{ gram/mol}$  dan massa molekul hidrogen  $2\text{ gram/mol}$ .

# BAB

# 9

# TERMODINAMIKA





Gambar 9.1 Lemari es

Tahukah kamu, mengapa lemari es atau kulkas dapat mendinginkan minuman atau makanan yang disimpan di dalamnya? Minuman dan makanan dalam lemari es menjadi dingin karena mesin pendingin pada lemari es menyerap kalor dari minuman atau makanan itu. Lalu, ke manakah kalor yang terserap tersebut disalurkan? Mengapa sisi-sisi luar lemari es terasa hangat? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut akan kita bahas pada bab ini.

**Kata Kunci:** Hukum-hukum Termodinamika – Usaha pada Proses Termodinamika – Siklus Termodinamika

### A. Usaha dan Hukum I Termodinamika

Lemari es seperti pada ilustrasi di atas bekerja dengan memanfaatkan prinsip termodinamika. Termodinamika merupakan ilmu yang mempelajari hubungan kalor dan bentuk lain dari energi. Kalor secara alami bergerak dari materi yang lebih panas ke materi yang lebih dingin. Namun begitu, kalor dapat dipaksa mengalir ke arah yang berlawanan. Sebagai contoh, dalam lemari es, panas secara terus-menerus diambil dari ruangan dalam yang dingin dan dibuang ke udara luar yang lebih panas. Itulah mengapa permukaan luar lemari es, yaitu bagian samping dan belakang biasanya hangat.

Dalam termodinamika dikenal istilah **sistem** dan **lingkungan**. Sistem merupakan benda atau sekumpulan benda-benda yang akan diteliti. Adapun lingkungan merupakan semua yang ada di sekitar benda atau benda-benda lainnya yang ada di alam. Lemari es merupakan contoh sistem. Adapun lingkungannya adalah udara luar. Untuk lebih memahami konsep termodinamika, mari kita pelajari uraian berikut!

## 1. Usaha yang Dilakukan Gas

Pada bagian ini kita akan membahas usaha yang dilakukan oleh sistem (gas) terhadap lingkungannya. Pada bab 8 telah dijelaskan bahwa keadaan gas bergantung pada tekanan, volume, dan suhu. Perubahan pada salah satu komponen, akan menyebabkan perubahan pada komponen yang lain. Perubahan inilah yang dapat kita manfaatkan untuk menghasilkan bentuk energi yang lain, misalnya gerak. Untuk menghasilkan bentuk energi tersebut diperlukan usaha.

Usaha dapat kita peroleh dengan mengubah keadaan suatu gas. Pada bab ini kita akan mempelajarinya. Perhatikan gambar 9.2 di samping! Ketika gas memuai, gas akan menekan dinding piston sebesar:

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

Akibat tekanan tersebut piston bergeser sejauh  $s$ .

Usaha yang dilakukan gas adalah:

$$W = F \cdot s$$

$$W = P \cdot A \cdot s$$

Jika  $A$  adalah luas penampang silinder maka  $A \cdot s = \Delta V$ . Jika persamaan tersebut kita substitusikan ke dalam persamaan  $W = P \cdot A \cdot s$  maka diperoleh:

$$W = P \cdot \Delta V$$

**Keterangan:**

$W$  : usaha (J)

$P$  : tekanan ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa}$ )

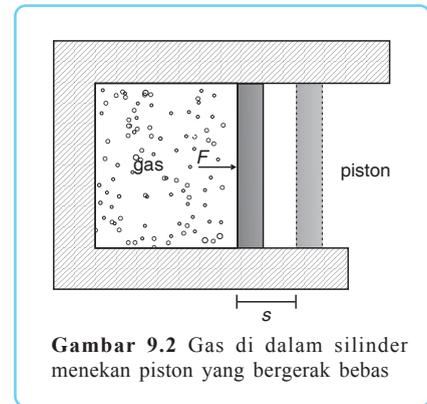
$\Delta V$  : perubahan volume ( $\Delta V$ )

Pada perubahan volume yang sangat kecil, besarnya usaha dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$W = P dV$$

Usaha yang dilakukan sistem bernilai positif jika sistem melepaskan energi pada lingkungannya. Apabila lingkungan mengadakan usaha pada sistem hingga sistem menerima sejumlah energi maka usaha yang dilakukan sistem adalah negatif.

Usaha yang dilakukan pada proses termodinamika berasal dari usaha berbagai macam gaya. Berikut ini adalah usaha pada proses-proses termodinamika.



**Gambar 9.2** Gas di dalam silinder menekan piston yang bergerak bebas

$$\int_{V_1}^{V_2}$$

**a. Proses Isotermik atau Isotermal (Temperatur Tetap)**

Dari penjelasan sebelumnya, telah kita ketahui bahwa besar usaha yang dilakukan gas adalah:

$$W = P \cdot A \cdot s$$

$$W = P \cdot V \quad \dots (9.1)$$

Besar usaha suatu proses dapat ditentukan dengan menghitung luas daerah di bawah kurva. Kurva usaha pada proses isotermik dinyatakan dengan gambar 9.3. Misalnya kita ambil sebuah elemen volume  $dV$  dari gambar 9.3. Usaha yang dilakukan pada perubahan volume  $dV$  adalah:

$$dW = P \cdot dV \quad \dots (9.2)$$

Dalam termodinamika berlaku hukum Boyle – Gay Lussac, yaitu:

$$= \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Karena pada proses isotermik suhu awal sama dengan suhu akhir,  $T_1 = T_2$  maka:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Dari bab 8 telah kita ketahui bahwa persamaan gas ideal adalah sebagai berikut.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad \dots (9.3)$$

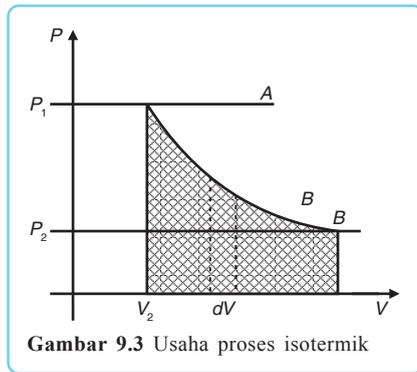
Usaha keseluruhan yang dilakukan sistem merupakan integral dari besar usaha pada perubahan volume  $dV$ . Dengan memasukkan persamaan 9.3 ke dalam persamaan 9.1 diperoleh:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} dW$$

$$W = P \cdot dV$$

$$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{n \cdot R \cdot T}{V} dV$$

**Proses Isotermik**



$$W = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \dots (9.4)$$

Dari pelajaran matematika kita tahu bahwa:

$$\ln x = {}^e \log x =$$

$$\ln x = 2,3 \log x$$

Dengan demikian, persamaan 9.3 dapat dinyatakan:

$$W = 2,3 n \cdot R \cdot T \dots (9.5)$$

**Keterangan:**

$V_1$ : volume sebelum proses ( $m^3$ )

$V_2$ : volume setelah proses ( $m^3$ )

$W$ : usaha (joule)

Usaha luar yang dilakukan sistem akan bernilai positif (+) jika  $V_1 < V_2$  dan bernilai negatif (-) jika  $V_1 > V_2$ .

Agar lebih memudahkan pemahamanmu, pelajirlah contoh soal berikut ini!

### Contoh Soal

Tiga mol gas yang berada dalam tangki yang volumenya 20 L dan suhunya 37 °C mempunyai tekanan 1 atm. Tentukan tekanan 8 mol gas tersebut dalam tangki yang volumenya 50 L dan suhunya 97 °C!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $n_1 = 3 \text{ mol}$

$V_1 = 20 \text{ L}$

$T_1 = 37 \text{ }^\circ\text{C} = 310 \text{ K}$

$P_1 = 1 \text{ atm}$

$n_2 = 8 \text{ mol}$

$V_2 = 50 \text{ L}$

$T_2 = 97 \text{ }^\circ\text{C} = 370 \text{ K}$

Ditanyakan:  $P_2 = \dots?$

Jawab:

$$P_2 \cdot V_2 = n_2 \cdot R \cdot T_2$$

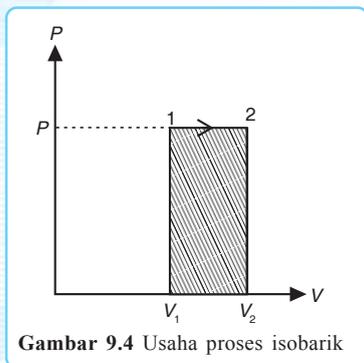
$$P_2 =$$

$$P_2 = \frac{8 \cdot 0,0821 \cdot 370}{50}$$

$$P_2 = \frac{243,016}{50}$$

$$P_2 = 4,86 \text{ atm}$$

## b. Proses Isobarik (Tekanan Tetap)



Gambar 9.4 Usaha proses isobarik

Kurva usaha pada proses isobarik ditunjukkan dengan gambar 9.4 di samping. Besarnya usaha pada proses ini dapat ditentukan dengan mencari luas daerah di bawah kurva. Misalnya kita akan menghitung usaha dari  $V_1$  ke  $V_2$  pada gambar 9.4.

### Proses Isobarik

Berdasarkan hukum Boyle-Gay Lussac:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Pada proses isobarik tekanan gas selalu tetap,  $P_1 = P_2$ , sehingga persamaan hukum Boyle-Gay Lussac menjadi:

$$\frac{V_1}{T_1} =$$

Dengan menggunakan persamaan 9.1 diperoleh besar usaha pada proses isobarik adalah:

$$W = P \cdot \Delta V$$

$$W = P (V_2 - V_1)$$

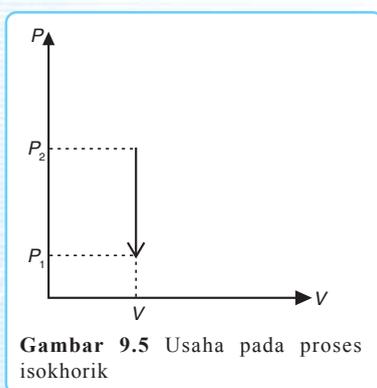
$$\frac{P_2 \cdot V_1}{T_2 T_1} \dots (9.6)$$

Keterangan:

$V_1$  : volume gas pada keadaan awal ( $m^3$ )

$V_2$  : volume gas pada keadaan akhir ( $m^3$ )

## c. Proses Isokhorik (Volume Tetap)



Gambar 9.5 Usaha pada proses isokhorik

Kurva usaha pada proses isokhorik ditunjukkan dengan gambar 9.5 di samping.

Misalnya kita akan menghitung besarnya usaha pada gambar 9.5. Pada proses isokhorik berlaku hukum Boyle-Gay Lussac, yaitu:

### Proses Isokhorik

$$= \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

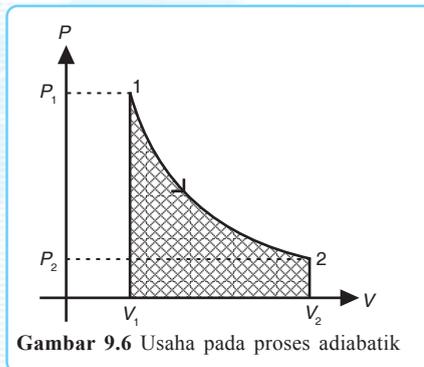
Karena pada proses isokhorik volume awal sama dengan volume akhir,  $V_1 = V_2$  maka:

$$\frac{P_1}{T_1} =$$

Pada proses isokhorik tidak terjadi perubahan volume ( $\Delta V = 0$ ). Dengan demikian, usaha yang dilakukan pada proses isokhorik adalah:

$$\begin{aligned} W &= P \cdot \Delta V \\ W &= P \cdot 0 \\ W &= 0 \end{aligned} \quad \dots (9.7)$$

#### d. Proses Adiabatik ( $Q = 0$ )



Kurva usaha pada proses adiabatik ditunjukkan dengan gambar 9.6.

Misalnya kita akan menentukan besar usaha pada gambar 9.6. Pada proses adiabatik berlaku persamaan berikut.

$$P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma \quad \dots (9.8)$$

Apabila dalam proses adiabatik terjadi perubahan keadaan gas, persamaan 9.8 menjadi:

$$\begin{aligned} P_1 \cdot V_1^\gamma &= P_2 \cdot V_2^\gamma \\ P_1 \cdot V_1^\gamma &= \frac{P_2 \cdot V_2^\gamma \cdot R \cdot T_2}{c_v \cdot V_2} \\ T_1 \cdot V_1^\gamma &= T_2 \cdot V_2^\gamma \end{aligned} \quad \dots (9.9)$$

#### Keterangan:

$P_1$  : tekanan sebelum proses (Pa)

$P_2$  : tekanan setelah proses (Pa)

$T_1$  : suhu sebelum proses (K)

$T_2$  : suhu setelah proses (K)

$\gamma$  : konstanta Laplace =

$c_p$  : kalor jenis gas pada tekanan tetap (J/kg. $^{\circ}$ C atau J/kg.K)

$c_v$  : kalor jenis gas pada volume tetap (J/kg. $^{\circ}$ C atau J/kg.K)

Usaha yang dilakukan pada proses adiabatik hanya digunakan untuk mengubah energi dalam. Secara matematis usaha tersebut dinyatakan sebagai berikut.

$$W = - \Delta U \quad \dots (9.10)$$

### Adiabatik

Dengan menggunakan persamaan 9.10, kita dapat menentukan usaha pada gas monoatomik, diatomik, dan poliatomik.

Usaha pada gas monoatomik dirumuskan:

$$W = - n \cdot R \cdot \Delta T$$

$$W = - n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W = n \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \quad \dots (9.11)$$

Usaha pada gas diatomik dirumuskan:

$$W = - n \cdot R \cdot \Delta T$$

$$W = - n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W = n \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \quad \dots (9.12)$$

Usaha pada gas poliatomik dirumuskan:

$$W = - n \cdot R \cdot \Delta T \quad \frac{6}{2}$$

$$W = - n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W = n \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \quad \dots (9.13)$$

Untuk lebih jelasnya, pelajari contoh soal berikut!

### Contoh Soal

Suatu sistem yang berisi empat mol gas diatomik mengalami proses adiabatik pada suhu 527 K hingga 753 K. Jika  $R = 8,317 \text{ J/mol.K}$ , tentukan usaha yang dilakukan oleh sistem tersebut!

#### Penyelesaian:

Diketahui:  $n = 4 \text{ mol}$   
 $T_1 = 527 \text{ K}$   
 $T_2 = 753 \text{ K}$   
 $R = 8,317 \text{ J/mol.K}$

Ditanyakan:  $W = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned}W &= n \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \\ &= 4 \cdot 8,317 \cdot (527 - 753) \\ &= 83,17 \cdot (-226) \\ &= -18.796,42 \text{ J}\end{aligned}$$

## 2. Kapasitas Kalor dan Kalor Jenis Gas

Pada pembahasan ini kita akan mempelajari hubungan antara kalor yang kita berikan terhadap perubahan suhu gas. Di sini kita akan mengenal konsep kapasitas kalor dan kalor jenis gas.

**Kapasitas kalor** gas adalah banyaknya kalor yang diperlukan gas untuk menaikkan suhunya sebesar 1 °C atau 1 K. Secara matematis kapasitas kalor gas dapat dituliskan:

**Kapasitas Kalor**

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad \dots (9.14)$$

**Keterangan:**

$C$  : kapasitas kalor gas (J/K atau J/°C)

$Q$  : kalor yang diperlukan (J)

$\Delta t$  : kenaikan suhu (K atau °C)

Sedangkan **kalor jenis** gas adalah banyaknya kalor yang diperlukan tiap 1 kilogram gas untuk menaikkan atau melepaskan suhunya sebesar 1 °C atau 1 K. Secara matematis kalor jenis gas dapat dituliskan:

**Kalor Jenis**

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} \quad \dots (9.15)$$

**Keterangan:**

$c$  : kalor jenis gas (J/kg.K atau J/kg.°C)

$m$  : massa gas (kg)

Kalor jenis gas juga disebut kapasitas kalor jenis. Selain kalor jenis gas, dikenal pula kalor jenis molar gas, yaitu kapasitas kalor tiap mol. Besar kalor jenis molar adalah:

$$C_m = c \cdot M \quad \dots (9.16)$$

**Keterangan:**

$C_m$  : kalor jenis molar gas (J/mol.K atau J/mol.°C)

Berikut ini akan kita pelajari kapasitas kalor dan kalor jenis pada tekanan tetap dan volume tetap.

### a. Pada proses isobarik

Kalor jenis gas pada proses isobarik (tekanan tetap) didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan tiap 1 kg gas untuk menaikkan atau melepaskan suhu tiap 1 kg gas sebesar 1 °C atau 1 K pada tekanan tetap. Kalor jenis gas pada proses isobarik dirumuskan:

$$c_p = \dots (9.17)$$

**Keterangan:**

- $c_p$  : kalor jenis gas pada tekanan tetap (J/kg.K atau J/kg.°C)
- $Q_p$  : kalor yang diperlukan (J)
- $m$  : massa gas (kg)

Sedangkan kalor jenis molar pada proses isobarik adalah:

$$c_{pm} = \frac{Q_p}{n \cdot \Delta T} \dots (9.18)$$

**Keterangan:**

- $c_{pm}$  : kalor jenis molar pada tekanan tetap (J/mol.K atau J/mol.°C)
- $n$  : mol gas (mol)

Kapasitas kalor pada proses isobarik (tekanan tetap) didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan gas untuk menaikkan suhunya sebesar 1 °C atau 1 K pada tekanan tetap. Kapasitas kalor pada proses isobarik adalah sebagai berikut.

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T} \dots (9.19)$$

**Keterangan:**

- $C_p$ : kapasitas kalor pada tekanan tetap (J/K atau J/°C)

### b. Pada proses isokhorik

Kalor jenis gas pada proses isokhorik (volume tetap) didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan 1 kg gas untuk menaikkan atau melepaskan suhu sebesar 1 °C atau 1 K pada volume tetap. Kalor jenis gas pada proses isokhorik adalah sebagai berikut.

$$c_v = \dots (9.20)$$

**Keterangan:**

- $c_v$  : kalor jenis gas pada volume tetap (J/kg.K atau J/kg.°C)
- $Q_v$  : kalor yang diperlukan (J)

Kalor jenis molar pada volume tetap adalah sebagai berikut.

$$c_{vm} = \frac{Q_v}{n \cdot \Delta T} \quad \dots (9.21)$$

**Keterangan:**

$c_{vm}$ : kalor jenis molar pada volume tetap (J/kg.K atau J/kg.°C)

Kapasitas kalor pada volume tetap didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan gas untuk menaikkan suhunya sebesar 1 °C atau 1 K pada volume tetap. Besar kapasitas kalor pada volume tetap dirumuskan:

$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta T} \quad \dots (9.22)$$

**Keterangan:**

$C_v$ : kapasitas kalor pada volume tetap (J/K atau J/°C)

Berdasarkan persamaan gas ideal bahwa  $P \cdot \Delta V = n \cdot R \cdot \Delta T$ , hubungan antara  $C_p$  dan  $C_v$  dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P \cdot \Delta V &= Q_p - Q_v \\ P \cdot \Delta V &= C_p \cdot \Delta T - C_v \cdot \Delta T \\ P \cdot \Delta V &= (C_p - C_v) \cdot \Delta T \\ C_p - C_v &= \\ C_p - C_v &= \frac{P \cdot \Delta V}{\Delta T} \\ C_p - C_v &= n \cdot R \end{aligned} \quad \dots (9.23)$$

Untuk memantapkan pemahamanmu, kerjakanlah latihan di bawah ini bersama temanmu!



### Kerja Berpasangan 1

*Kerjakan bersama teman sebangkumu!*

- Lima molekul gas neon pada tekanan  $2 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$  dan suhu  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  dimampatkan secara adiabatik sehingga volumenya menjadi  $\frac{1}{3}$  dari volume awal. Bila  $\gamma = 1,67$ ;  $c_p = 1,03 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$ ; dan  $Mr = 20,2 \text{ gram/mol}$  maka tentukan:
  - tekanan akhir pada proses ini,
  - temperatur akhir,
  - usaha luar yang dilakukan.

2. Gas oksigen dengan tekanan 76 cm Hg dimampatkan secara adiabatik sehingga volumenya menjadi  $\frac{1}{8}$  volume awal. Bila gas oksigen adalah gas diatomik dan  $R = 8,317 \text{ J/mol.K}$ , tentukanlah tekanan akhir gas tersebut!
3. Hitunglah kalor jenis gas-gas berikut ini pada volume dan tekanan tetap!
  - a. Gas neon monoatomik, bila massa molekulnya 2,018 gram/mol.
  - b. Gas hidrogen diatomik, bila massa molekulnya 2,016 gram/mol.
4. Hitunglah kapasitas kalor jenis nitrogen pada tekanan tetap, jika kalor jenisnya pada volume tetap adalah  $7,14 \times 10^2 \text{ J/kg.K}$ . Diketahui massa molekul nitrogen 28 gram/mol dan konstanta umum gas  $R = 8,317 \text{ J/mol.K}$ .
5. Hitunglah kalor jenis pada tekanan tetap dari gas oksida zat lemas berat atom dua, bila kalor jenisnya (volume tetap) adalah  $6,95 \times 10^2 \text{ J/kg.K}$  dan  $\gamma = 1,4$ .

### 3. Hukum I Termodinamika

Pada pembahasan sebelumnya kita telah mempelajari usaha pada masing-masing proses Termodinamika. Kali ini kita akan mempelajari kemampuan untuk melakukan usaha (energi) pada masing-masing proses Termodinamika dengan menggunakan hukum I Termodinamika.

**Hukum I Termodinamika** merupakan perluasan dari hukum kekekalan energi. Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan tetapi dapat berubah bentuk menjadi bentuk energi lain.

Sebelum kita mempelajari hukum I Termodinamika lebih lanjut, kita akan mempelajari tentang energi dalam. Energi dalam sering disebut energi termal atau energi dakhil ( $U$ ). Energi dalam suatu sistem adalah jumlah total energi yang terkandung dalam sistem. Energi dalam merupakan jumlah energi kinetik, energi potensial, energi kimiawi, energi listrik, energi nuklir, dan segenap bentuk energi lain yang dimiliki atom dan molekul sistem. Energi dapat berganti menjadi bentuk energi yang lain, misalnya energi listrik menjadi energi kalor.

Selama proses perubahan bentuk energi berlangsung, sistem menerima kalor sebanyak  $\Delta Q$  dan melakukan usaha sebesar  $\Delta W$ . Selisih energi sebesar  $\Delta Q - \Delta W$  digunakan untuk mengubah energi dalam sistem tersebut. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad \dots (9.24)$$

#### Hukum I Termodinamika

**Keterangan:**

$\Delta Q$  : perubahan kalor (J)

$\Delta W$  : perubahan usaha (J)

$\Delta U$  : perubahan energi dalam (J)

1 joule = 0,24 kalori; 1 kalori = 4,2 joule

$\Delta Q$  bertanda positif jika sistem menerima kalor dan bertanda negatif jika sistem melepas kalor.  $\Delta W$  bertanda positif jika sistem melakukan usaha dan bertanda negatif jika sistem dikenai usaha.  $\Delta U$  bertanda positif jika sistem mengalami penambahan energi dalam dan bertanda negatif jika sistem mengalami penurunan energi dalam.

**Penerapan hukum I Termodinamika**

Seperti telah kita ketahui, bahwa perubahan pada gas dapat melalui berbagai proses. Bagaimanakah penerapan hukum I Termodinamika pada masing-masing proses? Untuk memahami hal ini, pelajirlah pembahasan berikut!

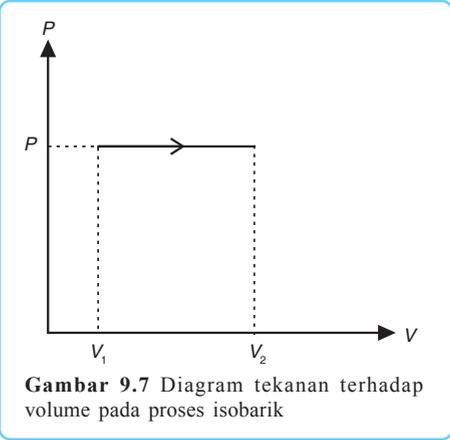
**a. Proses Isobarik**

Kurva tekanan terhadap waktu pada proses isobarik terlihat pada gambar 9.7. Berdasarkan gambar di samping, usaha yang dilakukan gas adalah:

$$\Delta W = P (V_2 - V_1) = P \cdot \Delta V$$

Dari persamaan gas ideal,  $P \cdot \Delta V = n \cdot R \cdot \Delta T$ , diperoleh:

$$\Delta W = P \cdot \Delta V$$
$$\Delta W = n \cdot R \cdot \Delta T$$



Sedangkan banyaknya kalor yang diperlukan untuk melakukan proses isobarik adalah:

$$\Delta Q_p = m c_p \Delta T \quad \text{atau} \quad \Delta Q_p = n c_p \Delta T$$

Perubahan energi dalam pada proses isobarik sama dengan banyaknya kalor yang diperlukan untuk melakukan proses isokhorik. Secara matematis ditulis:

$$\Delta U = \Delta Q_v \quad \dots (9.25)$$

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa energi dalam gas merupakan energi kinetik gas tersebut. Dari bab 8 kita ketahui bahwa  $E_k = n \cdot K \cdot \Delta T$ . Dengan menggunakan  $E_k = n \cdot K$ .

$\Delta T$  dan persamaan 9.25 diperoleh nilai kalor jenis gas monoatomik pada volume tetap adalah:

$$\Delta U = n \cdot K \cdot \Delta T$$

$$n \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot R \cdot \Delta T$$

$$c_v = R$$

Sedangkan nilai kalor jenis gas monoatomik pada tekanan tetap ditentukan dari rumus berikut.

$$\Delta Q_p = \Delta U + \Delta W$$

$$n c_p \Delta T = n c_v \Delta T + n R \Delta T$$

$$c_p = c_v + R$$

$$c_p = R + R$$

$$c_p = R$$

Analogi dengan cara di atas, diperoleh nilai kalor jenis gas diatomik pada volume dan tekanan tetap adalah:

– Suhu rendah :  $c_v = R$  ;  $c_p = R$

– Suhu sedang :  $c_v = R$  ;  $c_p = R$

– Suhu tinggi :  $c_v = R$  ;  $c_p = R$

Kalor jenis pada persamaan-persamaan di atas dinyatakan dalam satuan J/mol.K. Jika  $1 \text{ J/mol.K} = \frac{1}{M} \text{ J/kg.K}$ , dengan  $M$  adalah massa molekul gas maka persamaan-persamaan di atas menjadi sebagai berikut.

Pada gas monoatomik:

$$c_v =$$

$$c_p =$$

Pada gas diatomik:

– Suhu rendah :  $c_v =$  ;  $c_p =$

– Suhu sedang :  $c_v =$  ;  $c_p =$

– Suhu tinggi :  $c_v =$  ;  $c_p =$

### b. Proses Isokhorik

Pada proses isokhorik  $\Delta V = 0$ . Usaha yang dilakukan oleh lingkungan yang mengalami proses ini adalah  $\Delta W = P \cdot \Delta V = 0$  sehingga hukum I Termodinamika menjadi:

$$\begin{aligned} \Delta Q_v &= \Delta U + \Delta W \\ \Delta Q_v &= \Delta U + 0 \\ \Delta Q_v &= \Delta U \\ \Delta Q_v &= n c_{vm} \Delta T \text{ atau } \Delta Q_v = m c_v \Delta T \dots (9.26) \end{aligned}$$

Dari pembahasan energi dalam pada bab 8 diketahui bahwa besar energi dalam adalah sebagai berikut.

$$\Delta U = n \cdot R \cdot \Delta T \text{ (gas monoatomik dan gas diatomik suhu rendah)}$$

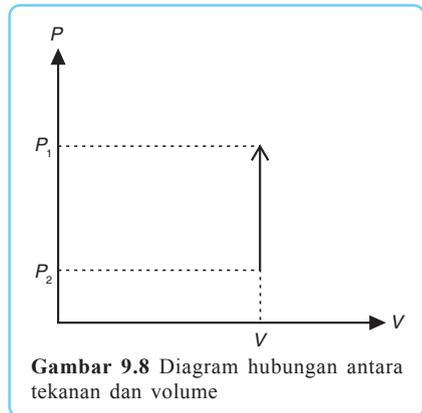
$$\Delta U = n \cdot R \cdot \Delta T \text{ (gas diatomik suhu sedang)}$$

$$\Delta U = n \cdot R \cdot \Delta T \text{ (gas diatomik suhu tinggi)}$$

$$\Delta U = n \cdot R \cdot \Delta T \text{ (gas poliatomik)}$$

Adapun besar usaha yang dilakukan oleh sistem pada proses isokhorik adalah:

$$\begin{aligned} \Delta W &= Q_p - \Delta Q_v \\ \Delta W &= n (c_{pm} - c_{vm}) \Delta T \text{ atau } \Delta W = m (c_p - c_v) \Delta T \end{aligned}$$



Gambar 9.8 Diagram hubungan antara tekanan dan volume

Analogi dengan proses isobarik, nilai kalor jenis pada volume tetap untuk gas monoatomik adalah:

$$\begin{aligned} \Delta Q_v &= \Delta U \\ c_v \Delta T &= n \cdot R \cdot \Delta T \\ c_v &= n \cdot R \end{aligned} \quad \dots (9.27)$$

Nilai kalor jenis pada tekanan tetap untuk gas monoatomik adalah:

$$\begin{aligned} \Delta Q_p &= \Delta Q_v + W \\ c_p \Delta T &= c_v \Delta T + n \cdot R \cdot \Delta T \\ c_p &= n \cdot R + n \cdot R \\ c_p &= n \cdot R \end{aligned} \quad \dots (9.28)$$

Dengan demikian, nilai kalor jenis pada volume tetap dan tekanan tetap untuk gas diatomik adalah:

- Suhu rendah :  $c_v = \frac{5}{2}R$  ;  $c_p = \frac{7}{2}R$
- Suhu sedang :  $c_v = \frac{5}{2}R$  ;  $c_p = \frac{7}{2}R$
- Suhu tinggi :  $c_v = \frac{5}{2}R$  ;  $c_p = \frac{7}{2}R$

**c. Proses Isotermik**

Pada bab 8 telah disebutkan bahwa untuk gas ideal yang mengalami proses isotermik usaha dalamnya  $\Delta U = 0$ . Akan tetapi, hal ini tidak berlaku untuk sistem-sistem lain. Sebagai contoh, jika es mencair pada  $0^\circ\text{C}$ ,  $\Delta U \neq 0$  meskipun proses pencairan berlangsung pada suhu tetap.

Pada proses isotermik gas ideal berlaku:

$$\Delta U = 0$$

$$\Delta Q = \Delta W$$

$$W = nRT \ln$$

$$W = P \cdot \Delta V = nRT$$

Apabila gas ideal mengalami proses perubahan dari  $(P_1, V_1)$  menjadi  $(P_2, V_2)$  dengan  $P_1 V_1 = P_2 V_2$  maka berlaku:

$$\Delta Q = \Delta W = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 2,30 P_1 V_1 \log \frac{V_2}{V_1} \dots (9.29)$$

$\ln$  dan  $\log$  adalah logaritma dengan bilangan dasar  $e$  dan  $10$ .

#### d. Proses Adiabatik

Pada proses adiabatik berlaku:

$$\Delta Q = 0$$

$$0 = \Delta U + \Delta W$$

$$\Delta U = -\Delta W \dots (9.30)$$

Jika sistem melakukan usaha, energi dalamnya akan turun. Namun, jika usaha dilakukan pada sistem maka energi dalamnya akan naik. Ketika gas ideal mengalami proses adiabatik maka  $(P_1, V_1, T_1)$  berubah menjadi  $(P_2, V_2, T_2)$ . Oleh karena itu berlaku:

$$\text{dan} \quad \text{dengan } \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Untuk memantapkan pemahamanmu terhadap materi di atas, kerjakan latihan berikut ini!



### Kerja Kelompok

*Kerjakan bersama kelompokmu!*

1. Satu liter air bermassa  $1 \text{ kg}$  mendidih pada suhu  $100^\circ\text{C}$  dengan tekanan  $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Selanjutnya, air diubah menjadi uap pada suhu  $100^\circ\text{C}$  dan tekanan  $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Pada keadaan ini volume uap air adalah  $1,674 \text{ liter}$ . Carilah usaha luar yang dilakukan dan hitung penambahan energi dalamnya! Panas penguapan air adalah  $2,26 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ .
2. Satu mol karbon monoksida dipanaskan dari  $15^\circ\text{C}$  menjadi  $16^\circ\text{C}$  pada tekanan tetap. Jika massa molekul karbon monoksida adalah  $28,01 \text{ gram/mol}$ ,  $c_p = 1,038 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$ , dan  $\gamma = 1,4$ , tentukanlah:

- a. penambahan energi dalam,
  - b. usaha luar yang dilakukan!
3. Gas nitrogen bermassa 5 kg dinaikkan suhunya dari 10 °C menjadi 130 °C pada volume tetap. Jika  $c_v = 7,41 \times 10^2 \text{ J/kg.K}$  dan  $c_p = 1,04 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$ , hitunglah:
    - a. usaha luar yang dilakukan,
    - b. penambahan energi dalam,
    - c. panas yang ditambahkan!
  4. Perbandingan kompresi sebuah mesin diesel kurang lebih sebesar 156. Jika pada permulaan gerak pemampatan silindernya berisi udara sebanyak 2 mol pada tekanan 15 N/m<sup>2</sup> dan suhu 247 °C, hitunglah tekanan dan suhu pada akhir gerak!
  5. Suatu volume gas nitrogen sebesar 22,4 liter pada tekanan 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> dan suhu 0 °C dimampatkan secara adiabatik sehingga volumenya menjadi volume awal. Carilah:
    - a. tekanan akhirnya,
    - b. suhu akhirnya,
    - c. usaha yang dilakukan!

Diketahui pula bahwa  $Mr = 28 \text{ gram/mol}$ ,  $\gamma = 1,4$ , dan  $c_v = 741 \text{ J/kg.K}$ .

## B. Siklus Termodinamika dan Hukum II Termodinamika

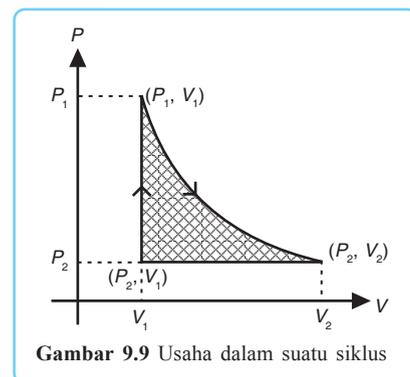
Proses-proses yang terjadi dalam Termodinamika dapat digabungkan menjadi suatu siklus tertentu. Siklus ini akan menghasilkan usaha yang lebih besar dibandingkan usaha yang dihasilkan oleh masing-masing proses Termodinamika. Berikut ini akan kita bahas lebih jauh tentang siklus Termodinamika, pelajariilah dengan saksama!

### 1. Siklus Termodinamika

Suatu mesin yang dapat mengubah seluruh kalor yang diserapnya menjadi usaha secara terus-menerus belum pernah ada. Mesin yang ada hanya mampu mengubah kalor menjadi usaha melalui satu tahap saja, misalnya proses isotermik.

Agar suatu sistem dapat bekerja terus-menerus dan mampu mengubah kalor menjadi usaha maka harus ditempuh cara-cara tertentu. Perhatikan gambar 9.9 di samping!

- a.  $(P_1, V_1)$  gas mengalami proses isotermik sampai  $(P_2, V_2)$ .

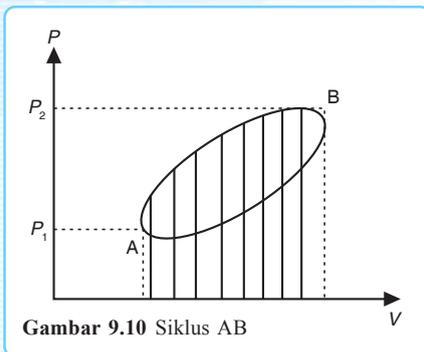


- b. Proses isobarik mengubah sistem dari  $(P_2, V_2)$  sampai  $(P_2, V_1)$ .
- c. Proses isokhorik membuat sistem kembali ke  $(P_1, V_1)$ .

Usaha yang dilakukan oleh sistem di atas sama dengan luas bagian gambar yang diarsir. Pada akhir proses sistem kembali ke keadaan semula. Ini berarti pada akhir siklus energi dalam sistem sama dengan energi dalam semula ( $\Delta U = 0$ ). Untuk melakukan usaha secara terus-menerus, sistem tersebut harus bekerja dalam suatu siklus.

Jadi, **siklus** adalah suatu rantai proses yang berlangsung sampai kembali ke keadaan semula. Luas siklus merupakan usaha *netto*. Bila siklus berputar ke kanan, usahanya positif. Bila siklus berputar ke kiri usahanya negatif.

## Siklus

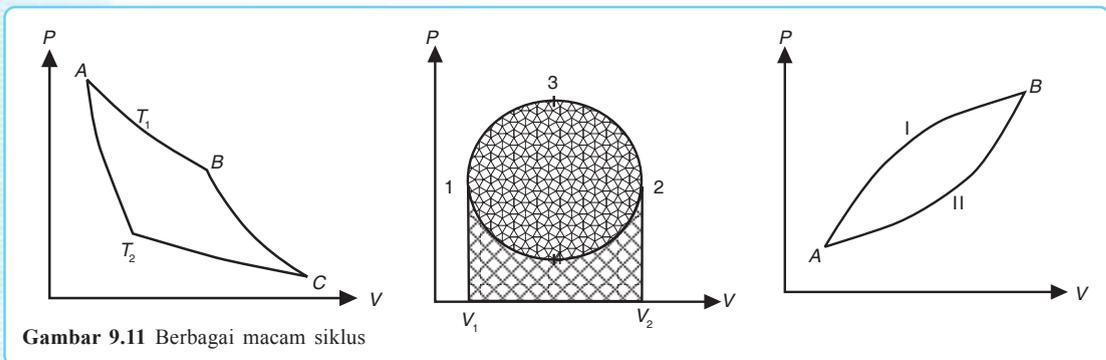


$$W_{AB} = \text{positif}$$

$$W_{BA} = \text{negatif}$$

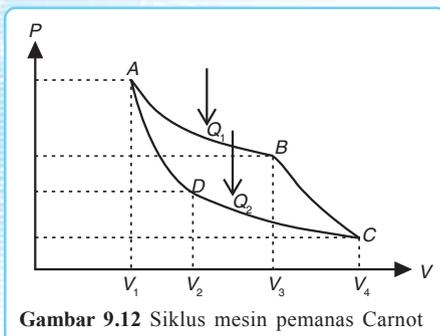
$$W_{netto} = W_{AB} - W_{BA}$$

Gambar 9.11 berikut menunjukkan kurva berbagai macam siklus Termodinamika.



Berikut ini adalah berbagai macam siklus yang ada dalam siklus Termodinamika.

### a. Siklus Carnot



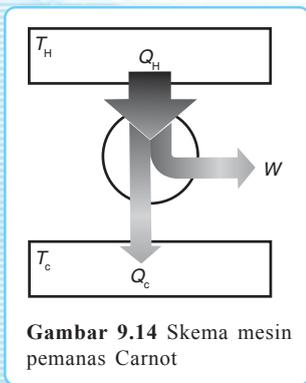
Berdasarkan sifatnya siklus dibagi menjadi dua, yaitu siklus *reversible* (dapat balik) dan siklus *irreversible* (tidak dapat balik). Siklus Carnot termasuk siklus *reversible* (dapat balik).

Siklus Carnot dibatasi oleh garis lengkung isotermik dan dua garis lengkung adiabatik. Hal ini memungkinkan seluruh panas yang diserap (*input* panas) diberikan pada satu suhu panas yang

tinggi dan seluruh panas yang dibuang (*output panas*) dikeluarkan pada satu suhu rendah. Perhatikan siklus Carnot yang ditunjukkan pada gambar 9.12 di atas!

- 1) Pada proses *A–B* terjadi pemuaian/pengembangan/ekspansi isotermik.
- 2) Pada proses *B–C* terjadi pemuaian/ekspansi adiabatik.
- 3) Pada proses *C–D* terjadi pemampatan/kompresi isotermik.
- 4) Pada proses *D–A* terjadi pemampatan/kompresi adiabatik.

Siklus Carnot bekerja dengan mengubah kalor panas (*heat*) dan membuangnya dalam bentuk kalor dingin (*cold*).



Contoh mesin yang menggunakan siklus Carnot adalah mesin pemanas ruang dalam rumah seperti di negara-negara subtropis pada musim dingin. Skema mesin pemanas Carnot seperti gambar 9.14 berikut di samping.

Kalor panas ( $Q_H$ ) dinyatakan sebagai  $Q_1$  dan kalor dingin ( $Q_C$ ) sebagai  $Q_2$ . Usaha pada mesin pemanas Carnot dapat ditulis sebagai berikut.

$$W = Q_1 - Q_2 \quad \dots (9.31)$$

Karakteristik mesin pemanas Carnot ditunjukkan oleh efisiensinya. Efisiensi mesin adalah perbandingan antara usaha yang dilakukan dengan kalor yang diserap. Mesin Carnot yang ideal efisiensinya selalu maksimum. Efisiensi mesin pemanas Carnot adalah sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\% \quad \dots (9.32)$$



## Sebaiknya Tahu



**Gambar 9.13** Sadi Carnot (1796–1832)

Sadi Carnot adalah ilmuwan Prancis yang menemukan bahwa efisiensi suatu mesin uap bergantung pada perbedaan temperatur antarsumber panas. Carnot mencapai kesimpulannya dengan membayangkan mesin ideal. Proses pemanasan uap digunakan untuk mendorong piston dengan cara mencairkan uap secara terus-menerus. Proses ini disebut siklus Carnot.

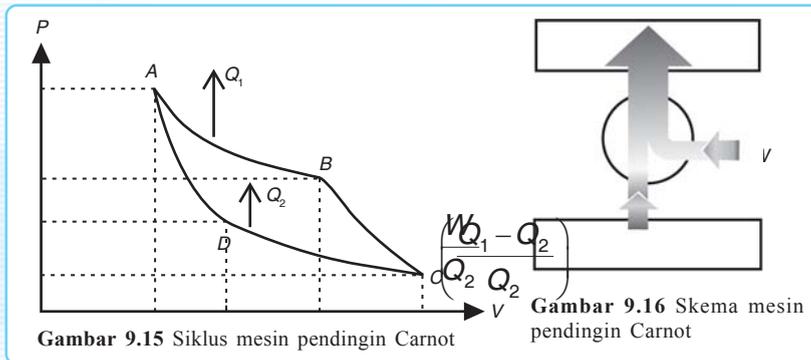
Dari pembahasan sebelumnya diketahui bahwa energi dalam pada gas ideal sebanding dengan suhu, sehingga:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \quad \dots (9.33)$$

**Keterangan:**

- $\eta$  : efisiensi mesin (%)
- $T_1$  : suhu tandon panas (K)
- $T_2$  : suhu tandon dingin (K)

Mesin pendingin Carnot seperti *air conditioner* (AC) maupun lemari es seperti ilustrasi di awal bab menggunakan proses yang berbeda dengan proses mesin pemanas yang menggunakan siklus Carnot. Mesin pendingin Carnot menyerap kalor dingin sebagai sumber dan membuangnya dalam bentuk kalor panas. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar 9.15 di bawah. Arah  $Q_1$  dan  $Q_2$  pada siklus pendingin Carnot berlawanan dengan arah  $Q_1$  dan  $Q_2$  pada siklus mesin pemanas Carnot. Skema mesin pendingin Carnot dapat ditunjukkan seperti pada gambar 9.16 berikut.



Gambar 9.15 Siklus mesin pendingin Carnot

Gambar 9.16 Skema mesin pendingin Carnot

Pada mesin pendingin Carnot, kalor panas ( $Q_H$ ) dinyatakan sebagai  $Q_1$  dan kalor dingin ( $Q_C$ ) sebagai  $Q_2$ . Usaha pada mesin pendingin Carnot dapat juga dihitung dengan rumus:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Efisiensi mesin pendingin Carnot adalah sebagai berikut.

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{Q_1}{Q_2} - 1\right) \times 100\% \quad \dots (9.34)$$

atau

$$\eta = \left( \frac{T_1}{T_2} - 1 \right) \times 100\% \quad \dots (9.35)$$

Karakteristik mesin pendingin Carnot ditunjukkan oleh koefisien *performance*, yaitu perbandingan antara kalor yang diserap dengan usaha yang dilakukan mesin. Koefisien *performance* mesin pendingin Carnot atau koefisien daya guna mesin pendingin Carnot adalah sebagai berikut.

$$K = \frac{1}{\eta}$$

$$K =$$

$$K = \dots (9.36)$$

atau

$$K = \dots (9.37)$$

Supaya kamu lebih memahami siklus Carnot, pelajilah contoh soal di bawah ini kemudian mengerjakan pelatihan di bawahnya!

### Contoh Soal

Efisiensi suatu mesin Carnot 70%. Jika suhu reservoir suhu tingginya 837 K, tentukan suhu reservoir suhu rendahnya!

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $\eta = 70\%$

$T_1 = 837 \text{ K}$

Ditanyakan:  $T_2 = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \eta &= \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) 100\% & & = 70 - 70 \\ 70\% &= & & 100\% & & = 30 \\ 70 &= 100 - & & & & 100 T_2 = 30 \cdot 837 \\ & & & & & 100 T_2 = 25.110 \\ & & & & & T_2 = 251,1 \text{ K} \end{aligned}$$



## Kerja Berpasangan 2

Kerjakan bersama teman sebangkumu!

1. Sebuah mesin Carnot yang reservoir suhu tingginya pada  $127^\circ\text{C}$  menyerap 100 kalori dan mengeluarkan 80 kalori ke reservoir suhu rendah. Tentukanlah suhu reservoir terakhir!
2. Suatu mesin menerima 200 kalori dari sebuah reservoir bersuhu 400 K dan melepaskan 175 kalori ke sebuah reservoir lain yang bersuhu 320 K. Jika mesin tersebut merupakan mesin Carnot, berapakah efisiensinya?
3. Hitunglah efisiensi ideal dari suatu mesin Carnot yang bekerja pada suhu  $100^\circ\text{C}$  dan  $400^\circ\text{C}$ .
4. Sebuah mesin Carnot menggunakan reservoir suhu rendah pada  $7^\circ\text{C}$ , efisiensinya 40 %. Jika efisiensinya diperbesar menjadi 50 %, berapakah reservoir suhu tingginya harus dinaikkan?
5. Mesin Carnot bekerja di antara dua reservoir panas yang bersuhu 400 K dan 300 K. Jika dalam tiap siklus, mesin menyerap panas sebanyak 1.200 kalori dari reservoir yang bersuhu 400 K, berapakah panas yang dikeluarkan ke reservoir yang bersuhu 300 K?

### b. Siklus Otto

Siklus mesin bakar atau biasa disebut siklus Otto ditunjukkan pada gambar 9.17 di samping. Siklus Otto dibatasi oleh dua garis lengkung adiabatik dan dua garis lurus isokhorik. Jika siklus Otto dimulai dari titik A, proses-proses yang terjadi pada siklus Otto tersebut adalah sebagai berikut.

Proses A – B : pemampatan adiabatik

$$T_A V_1^{\gamma-1} = T_B V_2^{\gamma-1}$$

Proses B – C : proses isokhorik, gas menyerap kalor sebesar

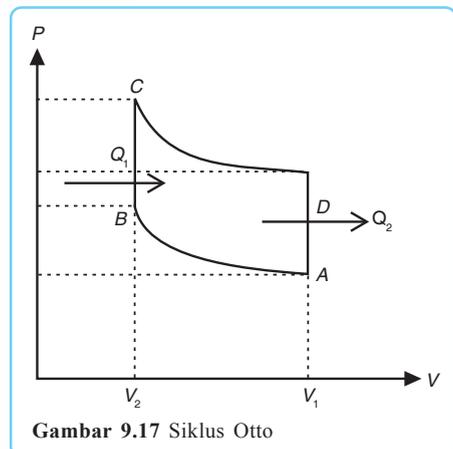
$$Q_1 = m C_V (T_C - T_B)$$

Proses C – D : pemuain adiabatik

$$T_C V_2^{-\gamma} = T_D V_1^{-\gamma}$$

Proses D – A : proses isokhorik, gas mengeluarkan kalor

$$Q_2 = m C_V (T_D - T_A)$$



Gambar 9.17 Siklus Otto

Usaha yang dilakukan sistem pada siklus Otto adalah:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Efisiensi siklus Otto adalah sebagai berikut.

$$\eta =$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad \dots (9.38)$$

atau

$$\eta = 1 - \dots (9.39)$$

### c. Siklus Diesel

Siklus pada mesin diesel dibatasi oleh dua garis lengkung adiabatik dan satu garis lurus isobarik serta satu garis lurus isokhorik (lihat gambar 9.18). Pada mesin diesel, pembakaran jauh lebih lambat sehingga gas di dalam silinder berkesempatan untuk mengembang bebas. Pengembangan selama pembakaran berlangsung pada tekanan yang hampir tetap. Sebaliknya, pendinginannya berlangsung cepat pada volume yang hampir tetap. Perhatikan gambar 9.18 di samping!

Proses A – B: pemampatan adiabatik

$$T_A = T_B V_2^{-\gamma}$$

Proses B – C: langkah daya pertama pemuai-an isobarik

$$W = P dV$$

$$W = \int P dV$$

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

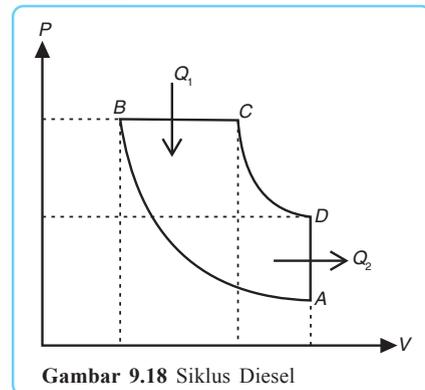
$$W = nRT \ln dV$$

Proses C – D: proses pemuai-an adiabatik

$$T_C = T_D V_2^{\gamma-1}$$

Proses D – A: proses pelepasan kalor isokhorik (pendinginan)

$W = 0$ , terjadi penurunan suhu



Gambar 9.18 Siklus Diesel



## 2. Hukum II Termodinamika

Hukum II Termodinamika dirumuskan oleh beberapa ilmuwan, antara lain berikut ini.

### a. Rudolf Clausius

Perumusan Clausius tentang hukum II Termodinamika secara sederhana dapat diungkapkan sebagai berikut. **Tidak mungkin membuat mesin pendingin yang hanya menyerap kalor dari reservoir bersuhu rendah dan memindahkan kalor itu ke reservoir yang bersuhu tinggi tanpa disertai perubahan lain.** Dengan kata lain bahwa **kalor mengalir secara spontan dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah dan tidak secara spontan kembali ke keadaan semula.**

Sebagai contoh, marilah kita lihat proses pada lemari pendingin (lemari es) yang bagannya terlihat pada gambar 9.21.

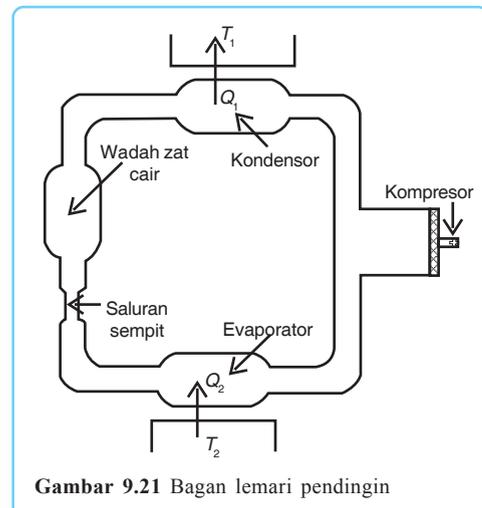
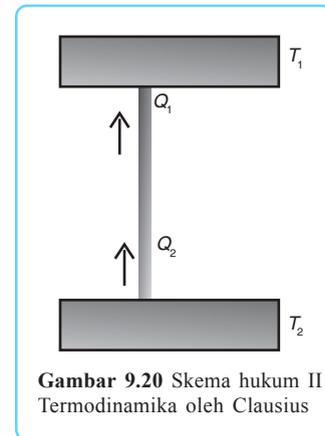
- 1) Zat cair di dalam wadahnya pada tekanan tinggi harus melalui saluran yang sempit menuju ke evaporator. Proses ini disebut proses Joule-Kelvin.
- 2) Di dalam evaporator, suhu dan tekanan zat cair berkurang dan menguap. Saat menguap tersebut zat cair memerlukan kalor yang diserap dari reservoir  $T_2$  (suhu reservoir dingin = suhu benda yang akan didinginkan).
- 3) Uap pada tekanan rendah ini masuk ke dalam kompresor, kemudian dimampatkan. Hal ini menyebabkan tekanan dan suhu naik. Suhu uap yang dihasilkan lebih tinggi dari suhu reservoir  $T_1$  (suhu tinggi) dan  $T_1 > T_2$ .
- 4) Di dalam kondensator, uap memberikan kalor pada reservoir  $T_1$ . Pada proses tersebut selain pemindahan kalor dari reservoir dingin  $T_2$  ke reservoir  $T_1$ , terjadi pula perubahan usaha menjadi kalor yang ikut dibuang di  $T_1$ .

### b. Kelvin - Planck (Perpetom Mobiles II)

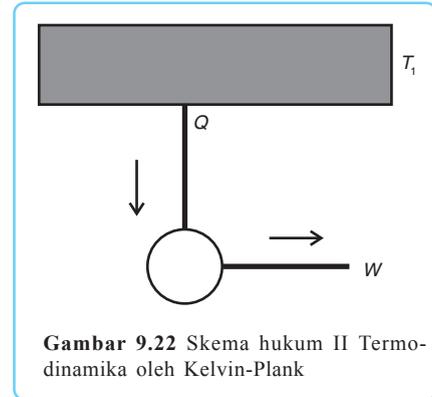
Perumusan Kelvin-Planck tentang hukum II Termodinamika secara sederhana dapat dinyatakan sebagai berikut. **Tidak mungkin suatu mesin mengisap panas dari reservoir dan mengubah seluruhnya menjadi usaha.**

Sebagai contoh, perhatikan proses yang terjadi pada motor bakar dan motor bensin berikut.

- 1) Mula-mula campuran uap bensin dan udara dimasukkan ke dalam silinder dengan cara menarik pengisap.



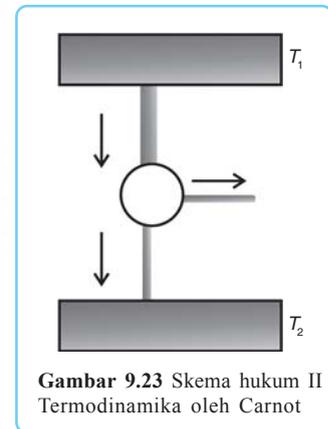
- 2) Campuran tersebut kemudian dimampatkan dengan cara menekan pengisap sehingga suhu dan tekanannya naik.
- 3) Selanjutnya, campuran dibakar dengan loncatan bunga api listrik. Proses pembakaran ini menghasilkan campuran dengan suhu dan tekanan yang sangat tinggi sehingga volume campuran tetap (proses isokhorik).
- 4) Campuran hasil pembakaran menjadi mengembang dan mendorong pengisap. Sedangkan tekanan dan suhunya turun, tetapi masih lebih tinggi dari tekanan dan suhu di luar.
- 5) Katub pada silinder terbuka sehingga sebagian campuran tersebut ada yang keluar.
- 6) Akhirnya pengisap mendorong hampir seluruh campuran hasil pembakaran itu keluar.



Gambar 9.22 Skema hukum II Termodinamika oleh Kelvin-Planck

### c. Sadi Carnot

Dari semua mesin yang bekerja dengan menyerap kalor dari reservoir panas dan membuang kalor pada reservoir dingin efisiensinya tidak ada yang melebihi mesin Carnot. Ciri khas mesin Carnot ialah pemanasan dan pendinginannya, yaitu pengisapan dan pelepasan panasnya berlangsung secara isotermik, sedangkan pengembangan dan penekanannya berlangsung secara adiabatik. Dengan demikian mesin Carnot dapat dibalik (*reversible*), karena proses isotermik maupun adiabatik selalu dapat dibalik. Dengan memberikan usaha mekanik  $W$  pada sistem, mesin akan melepas panas  $Q_1$  dari bagian yang didinginkan serta melepas panas sebanyak  $Q_2$  keluar. Jenis-jenis mesin selain mesin Carnot tidak dapat dibalik. Dengan menerapkan hukum II Termodinamika dapat ditunjukkan bahwa karena dapat dibalik, mesin Carnot memiliki efisiensi yang sama.



Gambar 9.23 Skema hukum II Termodinamika oleh Carnot

Dengan demikian, **hukum II Termodinamika** dapat dinyatakan sebagai berikut.

**Kalor tidak mungkin seluruhnya dapat berubah menjadi energi mekanik (kerja) atau efisiensi suatu mesin tidak mungkin 100%.**

**Hukum II Termodinamika**

## C. Hukum III Termodinamika

**Hukum III Termodinamika** menyatakan bahwa entropi dari semua kristal-kristal padat mendekati nol pada saat suhunya mendekati nol mutlak. Dengan kata lain, semua zat akan kehilangan energi pada saat suhunya nol mutlak. Itulah sebabnya orang-orang menyimpan bahan makanan dalam *freezer* untuk mempertahankan perubahan energi dari bahan makanan itu dan mempertahankannya dari kerusakan.

**Hukum III Termodinamika**

**Entropi** adalah munculnya efek ketidakteraturan atau kerusakan pada saat terjadi peningkatan energi pada suatu sistem. Semakin tinggi entropi, semakin tinggi ketidakteraturannya. Perubahan pada sistem tertutup cenderung menuju entropi yang lebih tinggi atau menuju ketidakteraturan yang lebih tinggi. Menurut Clausius, jika suatu sistem pada suhu mutlak mengalami suatu proses *reversible* dengan menyerap sejumlah kalor maka kenaikan atau perubahan entropi dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{\Delta Q}{T} \quad \dots (9.40)$$

**Keterangan:**

- $\Delta S$  : perubahan entropi (J/K)
- $S_1$  : entropi mula-mula (J/K)
- $S_2$  : entropi akhir (J/K)
- $T$  : temperatur (K)
- $\Delta Q$  : kalor yang diberikan pada sistem (J)

Asas entropi yang dikemukakan Clausius mengatakan bahwa alam raya (*universe*) sebagai sistem terisolasi sehingga proses di dalamnya berlangsung secara adiabatik. Entropi alam raya cenderung naik ke nilai maksimum. Demikian pula yang berlangsung di bumi sebagai bagian dari alam raya.

Kenaikan entropi selalu diikuti pula dengan ketidakteraturan. Karena penggunaan energi untuk usaha berlangsung terus-menerus, entropi di bumi haruslah bertambah terus dan ketidakteraturannya juga harus bertambah. Kecenderungan ini dapat ditahan dengan adanya fotosintesis. Dalam proses ini energi matahari yang tersebar dikumpulkan menjadi energi kimia yang terkonsentrasi dalam molekul gula. Dengan proses ini entropi bumi diturunkan dan ketidakteraturan bertambah. Karena itu, fotosintesis disebut juga *negentropi* (=entropi negatif). Akan tetapi, penurunan entropi di bumi disertai oleh naiknya entropi di matahari. Inilah hukum alam, penurunan entropi di suatu tempat hanya mungkin terjadi dengan naiknya entropi di tempat lain. Misalnya, lemari es menurunkan entropi di dalam ruangan lemari es, tetapi pada saat yang sama lemari es tersebut menaikkan entropi di luar.



## Sebaiknya Tahu

### Kamera Panas



Gambar 9.24 Kamera panas

Kemajuan iptek di bidang pemanfaatan energi kalor dipadu dengan teknologi kamera menghasilkan alat teknologi yang disebut kamera panas. Kamera ini dapat merekam orang yang langsung ditayangkan melalui monitor. Unikny gambar yang ditunjukkan monitor bukanlah sosok naturalis melainkan merekam efek panas dan dingin pada tubuh dan benda-benda sekelilingnya.



## Rangkuman

1. Persamaan hukum I Termodinamika dapat ditulis:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

2. Usaha dalam proses isobarik:

$$\Delta W = P \cdot \Delta V$$

3. Usaha dalam proses isokhorik:

$$\Delta W = 0$$

4. Usaha dalam proses isotermik:

$$W = nRT \ln$$

5. Usaha dalam proses adiabatik:

$$\Delta U = -\Delta W$$

6. Efisiensi mesin kalor:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \text{ atau } \eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% \text{ atau } \eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$

7. Efisiensi mesin pendingin:

$$\eta = \frac{W}{Q_2} \times 100\% \text{ atau } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} \times 100\% \text{ atau } \eta = \frac{Q_1}{Q_2} \times 100\%$$

8. Koefisien *performance* mesin pendingin atau koefisien daya guna adalah sebagai berikut.

$$K = \frac{Q_2}{W}$$

$$K = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \text{ atau } K = \frac{Q_1}{W}$$



## Soal-soal Uji Kompetensi

### A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa . . . .
  - kalor tidak dapat masuk ke dalam dan ke luar dari suatu sistem
  - energi adalah kekal
  - energi dalam adalah kekal
  - suhu adalah tetap
  - sistem tidak mendapat usaha dari luar
- Dua bejana *A* dan *B* volumenya sama berisi udara yang suhu dan massanya sama. Udara di dalam bejana *A* dipanaskan pada tekanan tetap sedangkan udara di dalam bejana *B* dipanaskan pada volume tetap. Jika jumlah kalor yang diberikan pada bejana *A* dan *B* sama maka . . . .
  - kenaikan suhu udara di *A* dan di *B* sama
  - perubahan energi dalam di *A* dan di *B* sama
  - kenaikan suhu udara di *A* lebih kecil dari di *B*
  - kenaikan suhu udara di *A* lebih besar dari di *B*
  - salah semua
- 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 . . . .
  - $W = 0, \Delta T > 0$
  - $W = 0, \Delta T < 0$
  - $W > 0, \Delta T = 0$
  - $W < 0, \Delta T = 0$
  - $W < 0, \Delta T = 0$
- Sebuah mesin Carnot bekerja di antara 2 reservoir bersuhu  $527^\circ\text{C}$  dan  $127^\circ\text{C}$ . Jika reservoir suhu tinggi diturunkan menjadi  $227^\circ\text{C}$  maka efisiensi pertama dan terakhir adalah . . . .
  - 20% dan 30%
  - 20% dan 40%
  - 20% dan 50%
  - 30% dan 50%
  - 50% dan 20%
- Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi 800 K mempunyai efisiensi sebesar 40%. Agar efisiensinya naik menjadi 50%, suhu reservoir suhu tinggi dinaikkan menjadi . . . .
  - 900 K
  - 960 K
  - 1.000 K
  - 1.180 K
  - 1.600 K
- Sebuah mesin Carnot beroperasi pada suhu  $47^\circ\text{C}$  dan  $127^\circ\text{C}$ , menghasilkan usaha 1.000 joule. Panas yang dibuang ke reservoir bersuhu rendah sebesar . . . .
  - 2.000 J
  - 3.000 J
  - 4.000 J
  - 5.000 J
  - 6.000 J
- Suhu dalam ruangan sebuah kulkas  $17^\circ\text{C}$ , sedangkan di luar  $27^\circ\text{C}$ . Jika kalor yang diserap kulkas 5.800 J/s, besar daya yang dibutuhkan adalah . . . .
  - 100 watt
  - 150 watt
  - 175 watt
  - 200 watt
  - 225 watt
- Koefisien daya guna suatu mesin pendingin adalah 7. Jika temperatur reservoir yang bersuhu tinggi adalah  $27^\circ\text{C}$ , temperatur reservoir yang lain bersuhu . . . .
  - $-0,5^\circ\text{C}$
  - $-4,74^\circ\text{C}$
  - $22,3^\circ\text{C}$
  - $40,35^\circ\text{C}$
  - $69,9^\circ\text{C}$
- Sebuah mesin bekerja pada reservoir bersuhu tinggi 500 K dan reservoir bersuhu rendah 350 K. Mesin tersebut menghasilkan usaha sebesar  $10^4$  joule. Efisiensi mesin tersebut adalah . . . .

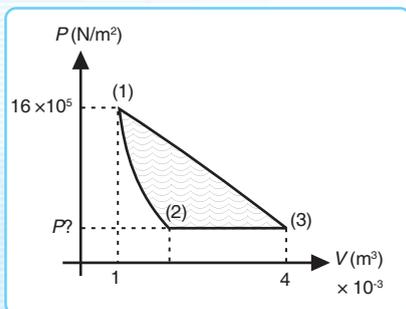
- a. 30 %
- b. 33 %
- c. 42 %
- d. 66 %
- e. 70 %

10. Suatu mesin menyerap 150 kalori dari reservoir 400 K dan melepas 90 kalori ke reservoir bersuhu 200 K. Efisiensi mesin tersebut adalah . . . .

- a. 30 %
- b. 40 %
- c. 50 %
- d. 60 %
- e. 80 %

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

1. Diagram di bawah ini menunjukkan tiga proses untuk suatu gas ideal. Di titik 1 suhunya 600 K dan tekanannya  $16 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ , sedangkan volumenya  $10^{-3} \text{ m}^3$ . Di titik 2 volumenya  $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ . Proses 1–2 dan 1–3 berupa proses isotermik dan adiabatik. ( $\gamma = 1,5$ )

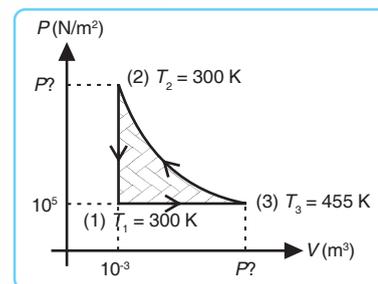


- a. Di antara proses 1–2 dan 1–3 manakah yang termasuk proses isotermik dan mana adiabatik? Bagaimana kita dapat mengetahuinya?
  - b. Hitunglah tekanan di titik 2 dan 3.
  - c. Hitunglah suhu di titik 2 dan 3.
  - d. Hitunglah volume di titik 3 pada proses itu!
2. Mula-mula 2 mol zat asam (gas diatomik) suhunya  $27^\circ\text{C}$  dan volumenya  $0,02 \text{ m}^3$ . Gas mengembang secara isobarik sehingga volumenya

menjadi dua kali lipat. Kemudian gas dikembangkan secara adiabatik hingga suhunya seperti suhu awal. Jika  $R = 8,317 \text{ J/mol.K}$ , tentukan besar:

- a. energi dalam total,
- b. panas yang ditambahkan,
- c. usaha yang dilakukan,
- d. volume pada akhir proses!

3. Sebuah mesin pemanas menggerakkan gas ideal monoatomik sebanyak 0,1 mol menurut garis tertutup dalam diagram  $P$ - $V$  pada gambar di bawah ini. Proses 2–3 adalah proses adiabatik.



Tentukan:

- a. suhu dan tekanan pada titik 1, 2, dan 3,
  - b. usaha total yang dilakukan gas!
4. Gas oksigen BM 32 massanya 0,5 kg menempati volume  $8.000 \text{ cm}^3$  pada temperatur  $27^\circ\text{C}$ . Tentukan usaha yang diperlukan untuk mengurangi volume menjadi  $4.000 \text{ cm}^3$ , jika:
- a. proses berlangsung isobarik,
  - b. proses berlangsung isotermik!
5. Mesin pendingin ruangan menyerap kalor  $5.000 \text{ J}$  dalam waktu 1 detik. Jika suhu ruangan akan dipertahankan sebesar  $20^\circ\text{C}$ , sedangkan suhu lingkungan tempat pembuangan kalor adalah  $28^\circ\text{C}$ , tentukan daya listrik yang dibutuhkan!

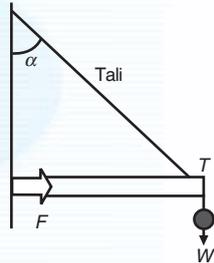


## Soal-soal Akhir Semester 2

### A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Sistem pada gambar berikut berada dalam keadaan setimbang. Berat batang dan tali diabaikan. Gaya-gaya yang bekerja pada sistem adalah  $T$ ,  $F$ , dan  $w$ . Manakah di antara pernyataan berikut yang tidak benar?

- a.  $F^2 + w^2 = T^2$   
 b.  $F = w \operatorname{tg} \alpha$   
 c.  $T = w \operatorname{sec} \alpha$   
 d.  $F$  dan  $w$  adalah komponen gaya  $T$   
 e.  $w = T \cos \alpha$



2. Seseorang memikul dua beban dengan tongkat homogen  $AB$  yang panjangnya 1,5 m. Beban yang satu di ujung  $A$  dan yang lainnya di ujung  $B$ . Beban di  $A$  beratnya 100 N dan di  $B$  500 N. Supaya batang  $AB$  setimbang bahu orang tersebut harus ditempatkan pada . . . .

- a. 0,2 m dari  $B$   
 b. 0,25 m dari  $B$   
 c. 0,3 m dari  $B$   
 d. 0,5 m dari  $B$   
 e. 0,75 m dari  $B$

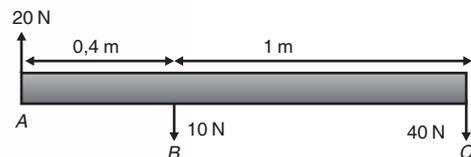
3. Seorang penari balet berputar 3 putaran per sekon dengan lengan direntangkan, saat itu momen inersianya 8  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ . Jika kedua lengannya dirapatkan sehingga momen inersianya menjadi 2  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$  maka frekuensinya menjadi . . . putaran per sekon.

- a. 0,75  
 b. 3  
 c. 5,3  
 d. 8  
 e. 12

4. Bola pejal menggelinding pada bidang kasar dengan sudut  $37^\circ$ . Percepatan yang dialami bola pejal tersebut adalah . . . .

- a. 4,0 m/s  
 b. 4,3 m/s  
 c. 3,0 m/s  
 d. 5,7 m/s  
 e. 5,3 m/s

5. Perhatikan gambar berikut ini! Bila massa batang  $AB$  diabaikan maka besar dan titik tangkap gaya resultannya adalah . . . .



- a. 30 N dan 0,7 m di kiri  $A$   
 b. 30 N dan 0,7 m di kanan  $A$   
 c. 30 N dan 1,0 m di kiri  $A$   
 d. 30 N dan 2,0 m di kanan  $A$   
 e. 30 N dan 2,0 m di kiri  $A$

6. Sebuah pipa silindris yang lurus mempunyai dua macam penampang, masing-masing luasnya 200  $\text{mm}^2$  dan 100  $\text{mm}^2$ . Pipa tersebut diletakkan secara horizontal dan air di dalamnya mengalir dari penampang besar ke penampang kecil. Apabila kecepatan arus di penampang besar adalah 2 m/s maka kecepatan arus di penampang kecil adalah . . . .

- a. m/s  
 b. m/s  
 c. 1 m/s  
 d. 2 m/s  
 e. 4 m/s

$\frac{1}{2}$

7. Sebuah tangki berisi air diletakkan di tanah. Tinggi permukaan air 1,25 m dari tanah. Pada ketinggian 0,8 m dari tanah terdapat sebuah lubang. Air akan mengalir dari lubang tersebut dengan kecepatan . . . . ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )
- 0,45 m/s
  - 3 m/s
  - 8 m/s
  - 9 m/s
  - 12,5 m/s
8. Sebuah jarum yang panjangnya 5 cm terletak pada lapisan permukaan air. Tegangan permukaan air pada suhu  $20^\circ\text{C}$  adalah 72,8 dyne/cm. Supaya jarum tidak tenggelam, berat maksimumnya . . . .
- 728 dyne
  - 782 dyne
  - 827 dyne
  - 872 dyne
  - 928 dyne
9. Dua lempeng gelas ditahan vertikal pada jarak 0,5 mm satu sama lain, kemudian bagian bawah dimasukkan dalam alkohol. Jika massa jenis alkohol  $0,79 \text{ g/cm}^3$  dan tegangan permukaannya 22,6 dyne/cm, alkohol akan naik setinggi . . . .
- 1 cm
  - 1,17 cm
  - 1,71 cm
  - 2 cm
  - 2,17 cm
10. Sebuah pesawat mempunyai lebar sayap total  $15 \text{ m}^2$ . Jika kecepatan aliran udara di atas dan di bawah sayap masing-masing 60 m/s dan 30 m/s serta massa jenis udara  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , besarnya gaya ke atas yang dialami pesawat adalah . . . .
- 16.200 N
  - 20.100 N
  - 24.300 N
  - 30.500 N
  - 34.600 N
11. Suatu gas ideal berada dalam tabung pada tekanan 4 atm, gas tersebut dipanaskan secara isotermik sehingga volumenya menyusut 20 %. Tekanan gas tersebut mengalami . . . .
- kenaikan sebesar 20 %
  - penurunan sebesar 20 %
  - kenaikan sebesar 25 %
  - penurunan sebesar 25 %
  - kenaikan sebesar 80 %
12. Suatu tabung berisi gas ideal dimampatkan secara adiabatik. Pada proses ini berlaku . . . .
- $W < 0$  dan  $\Delta T > 0$
  - $W < 0$  dan  $\Delta T = 0$
  - $W > 0$  dan  $\Delta T < 0$
  - $W = 0$  dan  $\Delta T < 0$
  - $W > 0$  dan  $\Delta T > 0$
13. Sejumlah gas berada dalam ruang tertutup yang volumenya 2,25 liter, tekanannya 1 atm, dan suhunya  $27^\circ\text{C}$ . Gas tersebut dipanaskan dengan tekanan tetap sehingga suhunya menjadi  $127^\circ\text{C}$ . Besar usaha yang dilakukan gas adalah . . . joule. ( $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$ )
- 40
  - 75
  - 160
  - 438
  - 833
14. Pada suhu tinggi besar tetapan Laplace untuk gas diatomik adalah . . . .
- 1,28
  - 1,33
  - 1,4
  - 1,67
  - 1,8
15. Empat mol gas ideal diatomik dinaikkan suhunya dari  $27^\circ\text{C}$  menjadi  $77^\circ\text{C}$ . Pada volume tetap  $R = 8,31 \text{ J/mol K}$ , kalor yang dibutuhkan pada proses tersebut sebesar . . . .

- a. 1.572 J  
 b. 2.050 J  
 c. 2.493 J  
 d. 3.725 J  
 e. 4.155 J
16. Jika suatu sistem menyerap kalor sebesar 200 J dan pada saat yang sama melakukan usaha sebesar 125 J maka pada sistem terjadi . . . .  
 a. kenaikan energi dalam 1,6 J  
 b. penurunan energi dalam 1,6 J  
 c. penurunan energi dalam 75 J  
 d. kenaikan energi dalam 75 J  
 e. kenaikan energi dalam 325 J
17. Efisiensi suatu mesin Carnot 65 %. Jika reservoir suhu tingginya 727 °C, besar suhu reservoir yang lain adalah . . . .  
 a. 63 °C  
 b. 77 °C  
 c. 153 °C  
 d. 276 °C  
 e. 350 °C
18. Lima mol gas yang berada dalam tangki yang volumenya 40 L dan suhu 20 °C mempunyai tekanan atm. Jika 20 mol gas tersebut berada dalam tangki yang volumenya 100 L dan suhu 87 °C maka tekanannya sebesar . . . .  
 a. 6 atm  
 b. 5,9 atm  
 c. 5,5 atm  
 d. 9,5 atm  
 e. 7,5 atm
19. Energi kinetik atom gas helium pada suhu 27 °C adalah . . . .  
 a.  $6,21 \cdot 10^{-19}$  J  
 b.  $6,21 \cdot 10^{-20}$  J  
 c.  $6,21 \cdot 10^{-21}$  J  
 d.  $6,21 \cdot 10^{-22}$  J  
 e.  $6,21 \cdot 10^{-23}$  J
20. Suhu awal suatu gas adalah 20 °C. Gas tersebut mengembang secara adiabatik sehingga volumenya menjadi 2 kali volume awal. Jika  $\gamma = 1,5$  maka suhu akhir gas tersebut adalah . . . .  
 a. 14,142 °C  
 b. 14,124 °C  
 c. 15,142 °C  
 d. 15,124 °C  
 e. 16,124 °C
21. Tegangan permukaan air pada suhu 20 °C adalah 72,8 dyne/cm. Supaya air dapat naik 5 cm dalam pipa gelas pada suhu tersebut, diameter dalamnya harus . . . .  
 a. 0,4 mm  
 b. 0,5 mm  
 c. 0,6 mm  
 d. 0,7 mm  
 e. 0,8 mm
22. Dalam sistem cgs tegangan permukaan dinyatakan dengan . . . .  
 a. dyne  
 b. dyne.cm  
 c. dyne/cm  
 d. dyne/cm<sup>2</sup>  
 e. dyne.cm<sup>2</sup>
23. Ketinggian air di dalam sebuah tangki adalah 2,5 m di atas dasarnya. Bila di dasar tangki itu dibuat lubang kecil maka air akan keluar dengan kecepatan . . . .  
 a. 5 m/s  
 b. 6 m/s  
 c. 7 m/s  
 d. 8 m/s  
 e. 9 m/s
24. Sebuah bola pejal menggelinding dari keadaan diam menuruni bidang miring kasar yang membentuk sudut 30° dengan arah mendatar. Kelajuan linear bola ketika sudah menempuh lintasan sepanjang 3,5 m adalah . . . m/s.

- a. 6
- b. 5
- c. 4
- d. 3
- e. 2

25. Gerak menggelinding terjadi karena . . . .

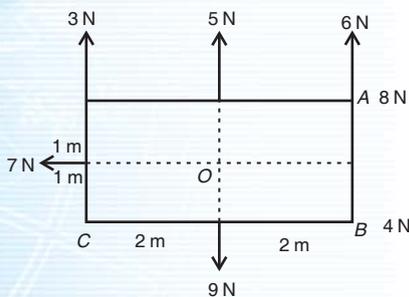
- a. gaya yang diberikan jumlahnya tidak nol
- b. jumlah torsi tidak nol
- c. jumlah gaya dan jumlah torsi tidak nol
- d. hanya bisa terjadi pada bidang miring
- e. dapat terjadi pada bidang yang licin sempurna

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

1. Seorang tukang cat dengan massa 55 kg mengatur papan homogen yang beratnya 60 N dengan kuda-kuda di B dan C seperti pada gambar. Panjang  $AD = 4$  m,  $AB = CD = 1$  meter. Jarak kaleng cat yang bermassa 2 kg dari A adalah 0,5 m. Secara perlahan ia mengecat sambil menggeser ke kanan. Pada jarak berapa meter dari C dia dapat menggeser sebelum papan terjungkit?



2. Perhatikan gambar berikut!



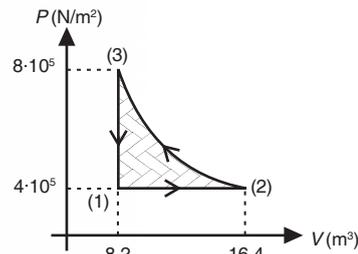
Tentukan jumlah aljabar momen gaya dengan pusat:

- a. titik A
- b. titik B
- c. titik C
- d. titik O

3. Pesawat terbang modern dirancang untuk gaya angkat  $1.300 \text{ N/m}^2$  penampang sayap. Anggap udara mengalir melalui sayap sebuah pesawat terbang dengan garis arus aliran udara. Jika kecepatan aliran udara yang melalui bagian yang lebih rendah adalah  $100 \text{ m/s}$ , berapa kecepatan aliran udara di sisi atas sayap untuk menghasilkan gaya angkat sebesar  $1.300 \text{ N/m}^2$  pada tiap sayap? (Massa jenis udara  $1,3 \text{ kg/m}^3$ ).

4. Sebuah arca perak dalamnya berongga. Berat arca  $10^5 \text{ dyne}$ . Jika arca tersebut dicelupkan dalam minyak yang mempunyai  $\rho = 0,8 \text{ gr/cm}^3$  beratnya menjadi  $8 \cdot 10^4 \text{ dyne}$ . Berapa volume rongga yang terdapat di dalam arca bila  $\rho \text{ perak} = 10,5 \text{ gr/cm}^3$  dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ?

5. Gas sebanyak 2 mol dengan  $c_v = 12,6 \text{ J/mol.K}$  menjalani garis tertutup (1), (2), dan (3). Proses 2-3 berupa pemampatan isotermik.



Hitunglah untuk tiap-tiap bagian garis tertutup itu:

- a. usaha oleh gas,
- b. panas yang ditambahkan pada gas,
- c. perubahan energi dalamnya.

6. Gas nitrogen dengan BM 28 memenuhi persamaan gas ideal. Bila gas nitrogen yang mempunyai massa 84 gram memuai isotermik pada suhu  $27^\circ\text{C}$  dari volume  $4.000 \text{ cm}^3$  menjadi  $8.000 \text{ cm}^3$  dan konstanta gas umum  $R = 3,2 \cdot 10^7 \text{ erg/mol.K}$ , hitunglah usaha gas tersebut!

7. Sebuah mesin Carnot yang reservoir suhu dinginnya  $27^\circ\text{C}$  memiliki efisiensi 40 %. Jika efisiensinya

dinaikkan menjadi 50 % berapa derajat Celcius reservoir suhu tinggi harus dinaikkan?

8. Dua mol air massanya 20 kg. Jika  $R = 0,0821 \text{ atm.liter/mol.K}$ , berapa jarak rata-rata antarmolekul pada tekanan 1,5 atm dan suhu 400 K?
9. Sebuah pipa lurus mempunyai dua macam penampang, masing-masing  $0,1 \text{ m}^2$  dan  $0,05 \text{ m}^2$ . Pipa tersebut diletakkan miring, sehingga penampang kecil berada 2 m lebih tinggi daripada penampang besar. Tekanan air pada penampang kecil adalah  $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  dan laju air pada penampang besar 5 m/s.

Tentukanlah:

- a. laju air dalam penampang kecil dan tekanan air pada penampang besar,
  - b. volume air yang melalui pipa per-menit.
10. Udara dengan konstanta Laplace 1,4 memuai adiabatik dari volume  $500 \text{ cm}^3$  menjadi  $1.000 \text{ cm}^3$ . Jika tekanan udara 2 atm, jumlah massa udara 1 g, dan konstanta udara setiap mol =  $2,8 \cdot 10^7 \text{ erg/g}$ , berapakah penurunan suhu udara itu?

$$\frac{R}{n}$$

# Glosarium

adhesi	: gaya tarik menarik antara partikel-partikel yang tidak sejenis
analogi	: kesesuaian penalaran antara beberapa hal
arus <i>streamline</i>	: arus lengkung tak bersudut
astronomi	: cabang ilmu fisika yang mempelajari tentang jagat raya secara ilmiah
asumsi	: pendapat pribadi terhadap suatu kasus berdasarkan penjelasan yang sudah ada sebelumnya
benda tegar	: benda padat yang tidak berubah bentuk apabila dikenai gaya luar
besaran vektor	: besaran yang memiliki besar dan arah
dinamika	: cabang dari ilmu fisika yang mempelajari gerak dengan memperhitungkan gaya-gaya yang menyertainya
diskret	: terputah-putah dan tidak kontinu
efisiensi	: persentase perbandingan antara nilai keluaran dengan nilai masukan
ekuipartisi energi	: pembagian energi dalam sistem tertutup
energi kinetik rotasi	: energi gerak perputaran
energi kinetik translasi	: energi gerak pergeseran
energi kinetik	: energi yang dimiliki oleh benda yang bergerak
energi potensial	: energi yang dimiliki oleh benda karena posisi ketinggiannya
entitas	: satu kesatuan yang memiliki kesamaan sifat
fluida	: zat alir yang berupa zat cair dan zat gas
fluida dinamik	: fluida yang mengalir
fluida ideal	: fluida yang memiliki ciri-ciri istimewa dan hanya ada di angan-angan tidak dalam kenyataan
fluida sejati	: fluida yang ada dalam kenyataan
fluida statik	: fluida yang tidak mengalir
fungsi sinusoida	: fungsi maksimum-minimum yang mengikuti gelombang transversal
gas diatomik	: gas yang molekulnya terdiri atas dua atom
gas monoatomik	: gas yang molekulnya hanya terdiri atas satu atom
gas poliatomik	: gas yang molekulnya terdiri atas banyak atom
gaya	: dorongan atau tarikan pada benda yang dapat menimbulkan percepatan
gaya pegas	: gaya yang ditimbulkan oleh pegas, disebut juga gaya Hooke
gejala kapilaritas	: gaya dorong pada pembuluh kapiler
geometri	: ilmu ukur sudut ruang
gerak harmonik	: gerak bolak-balik secara beraturan
gerak rotasi	: gerak perputaran pada porosnya
gerak translasi	: gerak lurus tanpa rotasi
grafik kartesius	: grafik pada bidang yang dipetakan terhadap sumbu $X$ dan sumbu $Y$
grafik koordinat polar	: grafik kartesius yang dipetakan berdasarkan resultan dan sudut elevasi
gravitasi	: tarikan oleh suatu benda terhadap benda lain

gravitasi bumi	: gaya tarik dari pusat bumi
hukum kekekalan	: momentum sudut awal sama dengan momentum sudut akhir
integral	: kenaikan derajat suatu fungsi dalam kalkulus
kala revolusi	: periode perputaran suatu benda mengelilingi pusat orbit
kekekalan energi	: energi hanya dapat berubah bentuk, tidak bisa hilang dan tidak dapat diciptakan
kekekalan momentum	: momentum bernilai kekal, artinya jumlah momentum sebelum terjadi tumbukan dan sesudah tumbukan adalah sama
kelembaman	: kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan keadaan semula
kerangka acuan	: sistem koordinat yang dipakai untuk menentukan letak gejala-gejala fisika
keseimbangan labil	: kesetimbangan pada suatu benda di mana setelah gangguan yang diberikan atau dialami benda dihentikan, benda tidak kembali ke posisi kesetimbangan semula, bahkan memperbesar gangguan tersebut
keseimbangan stabil	: kesetimbangan suatu benda di mana setelah gangguan yang diberikan pada benda dihentikan, benda akan kembali ke posisi kesetimbangan semula
kesetimbangan indiferen	: kesetimbangan pada suatu benda di mana gangguan yang diberikan tidak mengubah posisi benda
koefisien gesek	: konstanta yang menjadi ukuran kekasaran suatu bidang permukaan
koefisien restitusi	: koefisien kelentingan pada peristiwa tumbukan
koefisien viskositas	: derajat kekentalan suatu fluida
kohesi	: gaya tarik menarik antara partikel-partikel yang sejenis
linear	: lurus
manometer	: alat pengukur tekanan dalam ruang tertutup
meniskus cekung	: permukaan fluida dengan sudut kontak $< 90^\circ$
meniskus cembung	: permukaan fluida dengan sudut kontak $> 90^\circ$
mesin kalor	: mesin yang mengubah energi panas menjadi energi mekanik
modulus	: konstanta
modulus elastis	: konstanta yang dimiliki oleh bahan-bahan elastis
modulus young	: modulus elastis
momen gaya	: hasil kali antara gaya dengan jarak terpendek gaya ke sumbu putar
momen inersia	: momen kelembaman yang dimiliki oleh benda
momentum	: hasil kali massa dengan kecepatan
momentum linear	: hasil kali antara massa dengan kecepatan
momentum sudut	: hasil kali antara momen inersia dengan kecepatan sudut
neraca Cavendish	: alat yang digunakan Cavendish untuk mengukur percepatan gravitasi bumi
neraca torsi	: alat untuk menentukan tegangan permukaan

notasi skalar	: tata cara penulisan besaran skalar
notasi vektor	: penulisan suatu besaran dengan memperhatikan besar dan arahnya terhadap sumbu $X$ , $Y$ , dan $Z$
orbit planet	: lintasan planet mengelilingi matahari
partikel	: benda titik di mana setiap bagian-bagiannya bergerak bersama-sama
pipa kapiler	: pipa dengan pembuluh berdiameter sangat kecil
reservoir	: sistem mesin penghasil energi panas
resultan	: jumlah
reversible	: dapat balik
rotasi	: perputaran benda pada porosnya
rotasi benda tegar	: perputaran benda pada porosnya di mana benda tidak mengalami perubahan bentuk
sinusoida	: mengikuti fungsi sinus trigonometri
sudut elevasi	: sudut yang dibentuk oleh suatu lintasan terhadap sumbu horizontal
tekanan hidrostatik	: tekanan yang ditimbulkan zat cair pada kedalaman tertentu
torsi	: momen gaya
translasi	: pergeseran linier
<i>universe</i>	: alam raya
vektor posisi	: kedudukan suatu benda dalam notasi vektor
venturimeter	: alat untuk menentukan kecepatan aliran fluida
viskositas	: kekentalan fluida

# Indeks

## A

adhesi 150, 151, 152, 155  
adiabatik 205, 217, 218, 221, 222, 223  
*air conditioner* (AC) 219  
amplitudo 59

## B

bandul sederhana 58, 59, 60, 75  
benda homogen 123, 131  
benda tegar 120, 122, 123, 126, 140, 146  
bilangan Avogadro 184

## D

daya 80, 92, 93, 96  
derajat kebebasan 191, 192, 193  
diatomik 193, 194, 196, 206, 212, 213, 214  
dinamika rotasi 126

## E

efisiensi 92, 93, 218, 219, 222, 225, 227  
elastisitas 58, 71  
energi 80, 83, 84, 86, 89, 90, 92, 93, 94  
energi dakhil 210  
energi dalam 191, 193, 196, 205, 210, 211, 213, 215, 216, 219  
energi kinetik 66, 76, 80, 83, 86, 87, 89, 96, 106, 107, 128, 129, 190, 191, 192, 193, 196, 210, 211  
energi kinetik gas 182, 188, 190, 191  
energi kinetik rotasi 191, 193, 196  
energi kinetik total 129, 146  
energi kinetik translasi 191, 192, 193, 196  
energi mekanik 83, 87, 96, 129, 146, 193  
energi potensial 66, 76, 80, 83, 84, 85, 87, 89, 96, 210  
energi potensial gravitasi 84, 89  
energi potensial gravitasi Newton 84  
energi potensial pegas 84, 85  
energi total/mekanik 66, 76  
entropi 225, 226  
evaporator 224

## F

fisika klasik 48  
fluida dinamik 150, 165, 166, 168, 173  
fluida statik 150, 151, 159  
frekuensi 58, 59, 60, 61, 75

## G

gas ideal 182, 183, 188, 189, 191, 196, 202, 209, 211, 214, 215, 219  
gaya 81, 82, 84, 85, 89, 90  
gaya Archimedes 160, 164  
gaya gravitasi 40, 41, 42, 51  
gaya hidrostatis 150, 159, 176  
gaya Hooke 75  
gaya ke atas 161, 163, 176  
gaya pegas 58, 60, 75  
gaya pemulih 59, 60, 61, 75  
gaya putar 122  
gaya sentripetal 46, 51, 52  
gaya Stokes 160  
gaya tarik 72, 76  
gaya tekan ke atas 160  
gerak harmonik sederhana 58, 60, 61, 64, 65, 66, 67, 75, 76  
gerak lurus 2, 3, 14, 28, 29, 34  
gerak lurus beraturan (GLB) 3, 23  
gerak lurus berubah beraturan (GLBB) 3, 14, 23  
gerak melingkar 2, 3  
gerak melingkar beraturan (GMB) 27, 28  
gerak melingkar berubah beraturan (GMBB) 27  
gerak parabola 22, 24, 34  
gerak rotasi 121, 122, 126, 136, 137, 138, 139, 140, 193  
gerak translasi 121, 126, 136, 137, 138, 139, 140, 192, 193  
geseran 72  
getaran 58, 59, 60, 63, 66

## H

Henry Cavendish 41  
hukum aksi-reaksi 50  
hukum Archimedes 150, 160, 161, 162, 176  
hukum Bernoulli 150, 168, 169, 176  
hukum Boyle 183, 186  
hukum Boyle-Gay Lussac 182, 185, 186  
hukum Gay-Lussac 202, 204  
hukum gravitasi Newton 40, 41, 44, 45, 47, 51, 54  
hukum Hooke 60, 61  
hukum Kepler 44  
hukum I Kepler 45, 54  
hukum II Kepler 45, 54  
hukum III Kepler 45, 46, 54

hukum Newton 40, 44, 46, 47, 48  
hukum I Newton 48, 49, 54  
hukum II Newton 49, 50, 54  
hukum III Newton 50, 54  
hukum Termodinamika 200  
hukum I Termodinamika 200, 210, 211, 213, 227  
hukum II Termodinamika 216, 224, 225  
hukum III Termodinamika 225  
hukum kekekalan energi 105, 106, 107, 129, 146, 168  
hukum kekekalan energi mekanik 66, 87, 96  
hukum kekekalan momentum 100, 103, 104, 105, 106, 107, 111  
hukum kekekalan momentum rotasi 146  
hukum kekekalan momentum sudut 120, 128  
hukum Pascal 150, 158, 176  
hukum Stokes 150, 164, 176  
hukum utama hidrostatis 150, 159

## I

impuls 100, 102, 111, 188  
Isaac Newton 41  
isobarik 185, 222, 223  
isokhorik 185, 221, 222  
isometrik 185  
isotermal 185  
isotermik 185  
isotermis 217, 218

## J

Johanes Kepler 45, 47

## K

kalor jenis 207, 208, 209, 212, 214  
kapasitas kalor 207, 208, 209  
katrol 120, 136, 137  
kecepatan 6, 11, 13, 14, 17, 20, 24, 27, 34, 35  
kecepatan rata-rata 9, 10, 11, 34  
kecepatan sesaat 9, 11, 12, 19, 20, 34  
kecepatan sudut 27, 28, 29, 31, 32  
kecepatan sudut rata-rata 29, 35  
kecepatan sudut sesaat 29, 35  
kelajuan 6, 9, 27, 34, 51, 52, 54  
kelembaman 120  
Kelvin-Planck 224  
kerangka acuan 3  
kesetimbangan 120, 121, 145, 146

kesetimbangan indeferen 145  
kesetimbangan labil 145  
kesetimbangan stabil 145  
kinematika 2  
koefisien performance 220, 227  
koefisien restitusi 100, 106, 107, 109, 110, 111, 112  
koefisien viskositas 164  
kohesi 150, 151, 152, 155  
kompresor 224  
kondensor 224  
konstanta getaran 75  
konstanta Laplace 205  
konstanta pegas 61, 62, 75  
koordinat kartesius 4, 5, 6, 9, 28  
koordinat polar 4, 5, 28

**L**  
lingkungan 200, 201

**M**  
mampatan 72  
massa jenis 142  
medan gravitasi 40, 42, 54  
meniskus cekung 151  
meniskus cembung 151  
mesin Carnot 217, 218, 219, 220, 225  
modulus elastis 72, 73, 76  
modulus Young 72  
momen gaya 120, 121, 141, 145  
momen inersia 120, 122, 123, 126, 131, 132, 134, 135, 136, 146  
momen kelembaman 122, 126, 146  
momen kopel 141  
momen putar 120, 145  
momentum 100, 101, 106, 107, 111, 126, 188  
momentum linear 103, 106  
momentum sudut 120, 126, 127, 128  
monoatomik 193, 194, 196, 206, 212, 213, 214

**N**  
negentropi 226  
neraca Cavendish 41

**P**  
partikel 41, 54, 122, 126, 127, 128, 129, 140, 141, 146, 183, 184  
percepatan 2, 3, 17, 18, 19, 20, 23, 34, 35, 48, 49, 50, 54, 65, 75  
percepatan gravitasi 24, 42, 54, 59  
percepatan rata-rata 17, 18, 19, 34  
percepatan sesaat 17, 19, 34, 35  
percepatan sudut 27, 28, 29, 31, 32  
percepatan sudut rata-rata 31, 35  
percepatan sudut sesaat 31  
periode 58, 59, 60, 61, 75  
perlajuan 34  
perpindahan 2, 6, 7, 9, 11, 14, 28, 34, 80, 81, 96  
persamaan Bernoulli 169, 170, 171, 172  
persamaan gas ideal 184  
persamaan kontinuitas 150, 166, 167, 171  
poliatomik 193, 194, 196, 206, 213  
posisi sudut 28, 35  
prinsip ekuipartisi energi 191, 192  
proses adiabatik 205, 215, 225, 227  
proses isobarik 204, 208, 211, 214, 216, 227  
proses isokhorik 204, 205, 208, 211, 213, 216, 225, 227  
proses isotermik 202, 214, 215, 225, 227  
proses Joule-Kelvin 224  
proses *reversible* 226

**R**  
regangan 72, 73, 76  
reservoir 224, 225  
resultan 121, 122, 145  
resultan gaya 89, 90, 96, 160  
resultan vektor 41  
rotasi 120, 121, 128  
Rudolf Clausius 224, 226

**S**  
Sadi Carnot 218, 225  
*shock absorber* 58, 60  
siklus 216, 217

siklus Carnot 217, 218, 219, 220  
siklus diesel 222,  
siklus *irreversible* 217  
siklus Otto 221, 222  
siklus Rankine 223  
siklus *reversible* 217  
siklus termodinamika 200, 216, 217  
silinder 120, 123, 132  
simpangan 59, 60, 61, 62, 64, 65, 75  
sistem 200, 201, 202, 203, 210, 213, 214, 215, 216, 226

**T**  
tegangan permukaan 150, 152, 153, 155  
tekanan hidrostatik 156, 157, 158, 159, 176  
teori kinetik 182  
teori kinetik gas 182, 183  
termodinamika 200, 201, 202, 210, 216  
tetapan gravitasi 41  
titik acuan 3, 6, 9, 28  
titik berat 120, 141, 142  
torsi 120, 122, 128, 145  
translasi 121  
tumbukan 100, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 183, 188  
tumbukan elastis sebagian 107, 112  
tumbukan elastis sempurna 106, 112  
tumbukan tidak elastis 106, 107, 112

**U**  
usaha 80, 81, 82, 89, 90, 93, 96, 153, 168, 200, 201, 203, 205, 210, 211, 214, 216, 220, 227

**V**  
vektor 5, 6, 7, 9, 13, 41, 42, 101, 126, 127, 141  
vektor posisi 5, 6, 9, 13  
vektor satuan 5  
venturimeter 150, 170, 171  
viskositas 175, 176  
volume 182, 183, 185, 189

# Kunci Jawaban Soal Terpilih

## Soal-soal Uji Kompetensi Bab 1

### A. Pilihan Ganda

- b
- a
- e
- a
- c

### B. Uraian

- $5 \mathbf{i} + 5\sqrt{3} \mathbf{j}$
- a.  $19 \mathbf{i} + 96 \mathbf{j}$   
b.  $4 \mathbf{i} + 24 \mathbf{j}$
- a.  $\omega = 122 \text{ rad/s}$   
b.  $\alpha = 54 \text{ rad/s}^2$   
c.  $\omega = 38 \text{ rad/s}$   
d.  $\alpha = 30 \text{ rad/s}^2$

## Soal-soal Uji Kompetensi Bab 2

### A. Pilihan Ganda

- a
- b
- b
- c
- b
- c

### B. Uraian

- $F = 8,0064 \text{ N}$
- $g = 0$

## Soal-soal Uji Kompetensi Bab 3

### A. Pilihan Ganda

- a
- a
- e
- c
- c

### B. Uraian

- a.  $A = 4 \text{ cm}$   
b.  $f = 8 \text{ Hz}$   
c.  $T = 0,125 \text{ sekon}$   
d.  $v = 200,96 \text{ cm/s}$   
e.  $a = 0$   
f.  $\varphi = \frac{1}{2}$
- a.  $\sigma = 63,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$   
b.  $c = 5 \cdot 10^{-3}$   
c.  $E = 1,27 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- a.  $a = 2,46 \cdot 10^5 \sin 50 \pi t$   
b.  $a_{\text{maks}} = 2,46 \cdot 10^5 \text{ cm/s}^2$   
c.  $t = 2 \cdot 10^{-3} \text{ sekon}$

- $y = 9,5 \text{ cm}$
- $v = 62,65 \text{ cm/s}$

## Soal-soal Uji Kompetensi Bab 4

### A. Pilihan Ganda

- e
- d
- b
- b
- d

### B. Uraian

- $v_t = 6,32 \text{ m/s}$
- $E_t = 8,001 \text{ joule}$

## Soal-soal Uji Kompetensi Bab 5

### A. Pilihan Ganda

- d
- c
- b
- d
- e

### B. Uraian

- a.  $p_1 = -20 \text{ kg.m/s}$   
b.  $p_2 = 30 \text{ kg.m/s}$   
c.  $\Delta p = 50 \text{ kg.m/s}$   
d.  $l = 50 \text{ kg.m/s}$   
e.  $F = 5000 \text{ N}$
- a.  $c = \frac{1}{3}$   
b.  $v' = 2\sqrt{5} \text{ m/s}$   
c.  $h_4 = \frac{1}{81} \text{ s}$
- $E_{\text{kehilangan}} = 240 \text{ joule}$

## Soal-soal Akhir Semester 1

### A. Pilihan Ganda

- e
- d
- d
- d
- a
- a
- c
- e
- c
- c
- b
- a
- b

### B. Uraian

- a.  $\mathbf{r} = 3 \mathbf{i} + 4 \mathbf{j}$   
b.  $r_x = 3 \mathbf{i}$   
c.  $r_y = 4 \mathbf{j}$

- d.  $|r| = 5 \text{ m}$   
 e.  $\tan \theta = 53^\circ$
3. 0  
 5. 45,4 N  
 7. a. 5 m/s dan 12 m/s  
 b. 7,06 m/s dan 7,06 m/s  
 9.  $r = 24 \text{ i}$  dan  $\tan \theta = 0$

#### Soal-soal Uji Kompetensi Bab 6

- A. Pilihan Ganda  
 2. e                    8. e  
 4. d                    10. e  
 6. b
- B. Uraian  
 2. a.  $K = 112,5 \text{ N}$   
 b.  $N = 215,6 \text{ N}$  ke arah sumbu Y positif  
 4.  $E_k = 3375,45 \text{ J}$

#### Soal-soal Uji Kompetensi Bab 7

- A. Pilihan Ganda  
 1. a                    7. c  
 3. c                    9. c  
 5. a
- B. Uraian  
 1.  $V_L = 670,2 \text{ m/s}$   
 3. a.  $P_2 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$   
 b.  $P_2 = 1,35 \cdot 10^4 \text{ Pa}$   
 5.  $80.000 \text{ dyne/cm}^2$

#### Soal-soal Uji Kompetensi Bab 8

- A. Pilihan Ganda  
 2. b                    8. b  
 4. b                    10. c  
 6. c
- B. Uraian  
 2.  $E_k = 1429,7 \text{ J}$   
 4.  $\Delta t = 0,629 \text{ sekon}$

#### Soal-soal Uji Kompetensi Bab 9

- A. Pilihan Ganda  
 1. b                    7. d  
 3. b                    9. a  
 5. b
- B. Uraian  
 1. a. 1–2 = isotermik  
 1–3 = adiabatik  
 b.  $P_2 = P_3 = 4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$   
 c.  $T_2 = 600 \text{ K}$ ,  $T_3 = 260,2 \text{ K}$   
 d.  $V_3 = 5,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
3. a.  $T_1 = T_2 = 300 \text{ K}$   
 $T_3 = 455 \text{ K}$   
 $P_1 = P_3 = 10^5 \text{ N/m}^2$   
 $P_2 = 6,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$   
 b.  $W_t = 245,3098 \text{ J}$
5.  $W = 136,5 \text{ watt}$

#### Soal-soal Akhir Semester 2

- A. Pilihan Ganda  
 2. b                    14. c  
 4. b                    16. d  
 6. e                    18. b  
 8. a                    20. a  
 10. c                    22. c  
 12. c                    24. b
- B. Uraian  
 2. a. 92,32 N.m  
 b. 94,418 N.m  
 c. 120,96 N.m  
 d. 80,769 N.m  
 4.  $V = 190,48 \text{ cm}^3$   
 6.  $W = 1,996 \cdot 10^{10} \text{ erg}$   
 8.  $r = 2,59 \cdot 10^{-8} \text{ m}$   
 10.  $\Delta t = 12,18 \text{ K}$

## Daftar Pustaka

- Alonso, M. dan Finn, E.D. 1980. *Fundamental University Physics*. New York: Addison Wesley Longman.
- Badan Standar Nasional Pendidikan, Depdiknas. 2006. *Standar Isi Pelajaran Fisika Sekolah Menengah Atas*. Jakarta: Depdiknas.
- Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. 2002. *Soal-Soal Ujian Masuk Perguruan Tinggi Negeri tahun 1987 sampai tahun 2002*. Jakarta: Depdikbud.
- Departemen Pendidikan Nasional. 2003. *Soal-Soal Ebtanas dan Soal-Soal UAN*. Jakarta: Depdiknas.
- Halliday, David; Resnick, Robert; and Walker, Jearl. 2001. *Fundamental of Physics*. New York: John Wiley & Sons.
- <http://www.doctrionics.co.uk/meter.htm>
- <http://en.wikipedia.org/wiki>
- Microsoft. 2005. *Encharta Library 2005*. USA: Microsoft Corp.
- Sears, F.W. Zemanski. 1986. *University Physics*. New York: Addison Wesley Longman.
- Sears, Francis, W. dan Salinger, Gerhard, L. 1982. *Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics. Third Edition*. New York: Addison–Wesley.
- Setyawan, Lilik. H. 2004. *Kamus Fisika Bergambar*. Bandung: Pakar Raya.
- Spiegel, Murray, R. 1983. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Theoretical Mechanics. SI (Metric Edition)*. Singapore: Mc Graw–Hill.
- Surya, Yohanes. 1996. *Olimpiade Fisika*. Jakarta: Primatika Cipta Ilmu.
- Sutrisno. 1984. *Fisika Dasar*. Bandung: Penerbit ITB.
- Tim Redaksi Dorling Kinderley. 1997. *Jendela IPTEK*, Cetakan Pertama. Jakarta: Balai Pustaka.
- Wilardjo, Liek dan Murniah, Dad. 2000. *Kamus Fisika*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Woodford, Chris, 2006. *Jejak Sejarah Sains Gravitasi*. Bandung: Pakar Raya.

ISBN 978-979-068-233-7 (No.Jil.Lengkap)  
ISBN 978-979-068-235-1

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 tentang Penetapan Buku Teks yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk Digunakan dalam proses pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET)Rp. 15.916,-